

УДК 622.2:004.45
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-8-36-44

СОВРЕМЕННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.Т. Мокешова

Аннотация. Приведен обзор современных программных инструментов для моделирования геомеханических процессов и оптимизации горных работ. Описаны ключевые функции и возможности каждой программы, а также их роль в повышении безопасности и эффективности горных работ. Рассмотрены методы численного моделирования, анализ устойчивости горных массивов, прогнозирование геомеханических рисков и предотвращение аварийных ситуаций. Особое внимание уделено интеграции программных решений с геологическими и геофизическими данными для более точного моделирования и анализа. Приведены примеры использования программ в реальных проектах, демонстрирующие их практическую ценность и эффективность. Обсуждаются вопросы интероперабельности различных программных продуктов, возможности их совместного использования и интеграции в единые информационные системы управления горными предприятиями.

Ключевые слова: проектирование; геомеханика; геотехнический анализ; механика горных пород; коэффициент безопасности; инструментарий.

ГЕОМЕХАНИКАЛЫК ПРОЦЕССТЕРДИ МОДЕЛДӨӨ ҮЧҮН АЗЫРКЫ ПРОГРАММАЛЫК КАМСЫЗДОЛОП

А.Т. Мокешова

Аннотация. Макалада геомеханикалык процесстерди моделдөө жана тоо-кен иштерин оптималдаштыруу үчүн азыркы программалык куралдарга сереп берилген. Ар бир программанын негизги функциялары жана мүмкүнчүлүктөрү, ошондой эле алардын тоо-кен иштеринин коопсуздугун жана натыйжалуулугун жогорулатуудагы ролу баяндалат. Сандык моделдөө ыкмалары, тоо кыркаларынын туруктуулугун талдоо, геомеханикалык тобокелдиктерди болжолдоо жана өзгөчө кырдаалдардан алдын алуусу каралат. Так моделдөө жана талдоо үчүн программалык чечимдерди геологиялык жана геофизикалык маалыматтар менен интеграциялоого өзгөчө көңүл бурулат. Программаларды реалдуу долбоорлордо колдонуунун мисалдары келтирилген, алардын практикалык маанисин жана натыйжалуулугун көрсөткөн. Ар кандай программалык продуктылардын өз ара иштешүүсү, аларды бөлүшүү жана тоо-кен ишканаларын башкаруунун бирдиктүү маалыматтык системаларына интеграциялоо мүмкүнчүлүктөрү талкууланат.

Түйүндүү сөздөр: долбоорлоо; геомеханика; геотехникалык талдоо; тоо тектеринин механикасы; коопсуздук коэффициенти; шаймандар.

MODERN SOFTWARE FOR MODELING GEOMECHANICAL PROCESSES

A.T. Mokeshova

Abstract. The article gives an overview of modern software tools for modeling geomechanical processes and optimizing mining operations. The key functions and capabilities of each program are described, as well as their role in improving the safety and efficiency of mining operations. Numerical modeling methods, stability analysis of rock massifs, geomechanical risk forecasting and accident prevention are considered. Special attention is paid to the integration of software solutions with geological and geophysical data for more accurate modeling and analysis. Examples of using the programs in real projects are given, demonstrating their practical value and efficiency. The issues of interoperability of different software products, the possibility of their joint use and integration into unified information systems for management of mining enterprises are discussed.

Keywords: design; geomechanics; geotechnical analysis; rock mechanics; safety factor; toolkit.

Введение. Геомеханика играет ключевую роль в успешной реализации горных проектов, включая строительство туннелей, разработку карьеров, подземное хранение и добычу полезных ископаемых [1]. Этот важный аспект инженерии требует точных и надежных инструментов для анализа и моделирования различных геомеханических процессов. В данной статье мы рассмотрим несколько ключевых программных решений, которые помогают инженерам в этой области эффективно решать сложные задачи.

Современный уровень проектирования горнотехнических сооружений характеризуется большой ролью моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива. Все объекты, связанные с проведением работ с земной поверхностью, такие как: разработка месторождений полезных ископаемых, строительство дорог, возведение плотин и насыпей так или иначе связаны с обеспечением устойчивости породных склонов. Оценка устойчивости может вестись методами сканирования и мониторинга объектов и методов моделирования НДС при проектировании и эксплуатации. Безусловно, все методы должны применяться в комплексе, объединяя и дополняя друг друга. Современное развитие цифровых систем моделирования позволяет создать достаточно адекватную и точную модель напряженно-деформированного состояния горного массива с учетом всего разнообразия свойств горных пород и механизмов разрушения [2].

В настоящее время на рынке программных систем предлагается сравнительно небольшое количество разнообразных программных продуктов по сравнению с подобными системами в других отраслях промышленности. Системы моделирования в геомеханике отличаются используемыми математическими моделями и численными методами, интерфейсом и возможностями. На рынке появляется все больше программ трехмерного моделирования, учитывающих динамические процессы геомеханики, сейсмическое влияние массовых взрывов и природных землетрясений.

В то же время отмечается недостаточное количество пакетов моделирования геомеханических процессов. Это объясняется сложностью в моделировании, неполнотой исходных данных, разнообразием свойств горных пород и механизмов разрушения, необходимостью интерфейса с другими информационными системами, используемых для подготовки исходных данных и анализа результатов. Следует отметить и сложность применения таких программ. Например, трехмерное моделирование требует значительных вычислительных ресурсов, которые могут предоставить кластерные вычислительные комплексы с возможностью распараллеливания вычислительных процедур [1]. Для конечно-элементного моделирования нужен большой объем исходных данных, поступающих из геоинформационных систем и геофизических измерений.

Приведем обзор наиболее распространенных программ моделирования напряженно-деформированного состояния.

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)

FLAC – это мощное программное обеспечение для численного моделирования геомеханических процессов. Оно широко используется в инженерной практике для анализа устойчивости склонов, деформации горных пород и гидрогеологических процессов. FLAC предоставляет возможность моделировать как статические, так и динамические процессы, что делает его идеальным инструментом для широкого спектра горных работ.

FLAC представляет собой программное обеспечение для численного моделирования для расширенного геотехнического анализа почвы, горных пород, подземных вод и наземных опор в двух измерениях. FLAC используется для анализа, тестирования и проектирования инженерами-геотехниками, гражданскими инженерами и горными инженерами. Оно предназначено для реализации любого вида инженерно-геологических проектов, требующих анализа непрерывности. FLAC использует явную конечно-разностную формулировку, которая может моделировать сложное поведение, такое как проблемы, состоящие из нескольких этапов, большие перемещения и деформации, нелинейное поведение материала или нестабильные системы (даже случаи текучести/разрушения на больших площадях или

полного разрушения), моделировать как статические, так и динамические процессы, что делает его идеальным инструментом для широкого спектра горных работ.

FLAC также является ценным инструментом, используемым для исследований в области механики горных пород и грунтов, особенно локализации и эволюции полос сдвига во фрикционных материалах. FLAC также используется в производственной сфере, где необходим анализ сильно деформируемых материалов.

FLAC/Slope

FLAC/Slope – наглядный континуальный анализ устойчивости склона на основе коэффициента безопасности в 2D. FLAC/Slope – это специальная, оптимизированная версия FLAC для оценки коэффициента безопасности (FoS) грунтовых и скальных склонов в двух измерениях с простой и быстрой настройкой модели и выполнением анализа. FLAC/Slope может моделировать проблемы устойчивости при широком разнообразии условий склона, включая: произвольную геометрию склона, несколько слоев, условия порового давления, неоднородные свойства грунта, поверхностную нагрузку и усиление конструкции (рисунок 1) [3].

FLAC3D

FLAC3D является трехмерной версией FLAC и предоставляет еще больший уровень детализации и гибкости для моделирования сложных трехмерных геомеханических систем. Он может использоваться для анализа различных геомеханических явлений, таких как обрушения горных пород, распределение напряжений в горных массивах и многое другое.

FLAC3D использует явную формулировку конечного объема, которая отражает сложное поведение моделей, состоящих из нескольких этапов, демонстрирующих большие смещения и деформации, нелинейное поведение материала или нестабильных (включая случаи текучести/разрушения на больших площадях или полного разрушения). Лицензии на бессрочную, ежемесячную и годовую аренду доступны либо в виде локального USB-ключа (который является портативным), либо в виде сетевого USB-ключа на несколько мест. Академические учреждения имеют право на специальные скидки. Континуальный анализ может быть применен к инженерному проектированию гражданских, горных и геотехнических выработок (например, склонов, туннелей, каверн, очистных забоев и т. д.) [3].

KATS – инструмент кинематического анализа для вероятностного и детерминированного анализа наклона

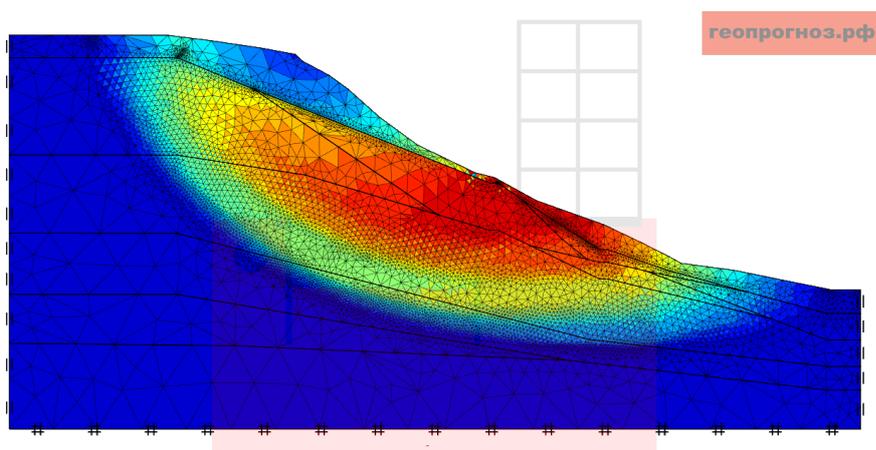


Рисунок 1 – Расчётная схема при оценке устойчивости склона

KATS (инструменты кинематического анализа склонов) – это инструмент, разработанный Itasca, который оценивает нестабильности, вызванные клиньями дневного освещения и плоскостными разрушениями, образующимися при взаимодействии различных конструктивных элементов с ориентацией данного склона (рисунок 2). Основное применение KATS – это анализ масштаба уступа, который понимается как первый шаг в процессе проектирования горных склонов для умеренных и качественных массивов горных пород. Также возможно выполнить кинематический анализ в масштабе между уступами.

В отличие от других инструментов, доступных в настоящее время на рынке геотехнического анализа, с помощью единого автоматизированного процесса KATS выполняет вероятностную или детерминированную оценку поведения большого числа конфигураций склона, определяемых многими структурными областями и многими ориентациями, и геометриями склона. Результаты анализа могут быть получены с использованием различных параметров, таких как потеря гребня, длина разлива, распределение углов наклона стенда и т. д. Все эти результаты позволяют геометрически определить углы между рампами (IRA), которые соответствуют критериям приемлемости, определенным при эксплуатации, с точки зрения стабильности и безопасности персонала и оборудования [4].

Преимущества KATS:

- Очень быстрый анализ (несколько минут компьютерного времени для полного вскрытия карьера).
- Простой и понятный в освоении.
- Большинство входных данных легко доступны на шахтах.
- Может быть откалиброван с учетом характеристик уклонов.
- Оценивает продолжительность разлива в режиме отказа (недоступно в других коммерческих программах).
- Может применять вероятностный подход для составления диаграмм кумулятивного частотного анализа (CFA) (недоступных в других коммерческих программах), что является типичной методологией для проектирования стендовых шкал.

Разработчик Itasca.

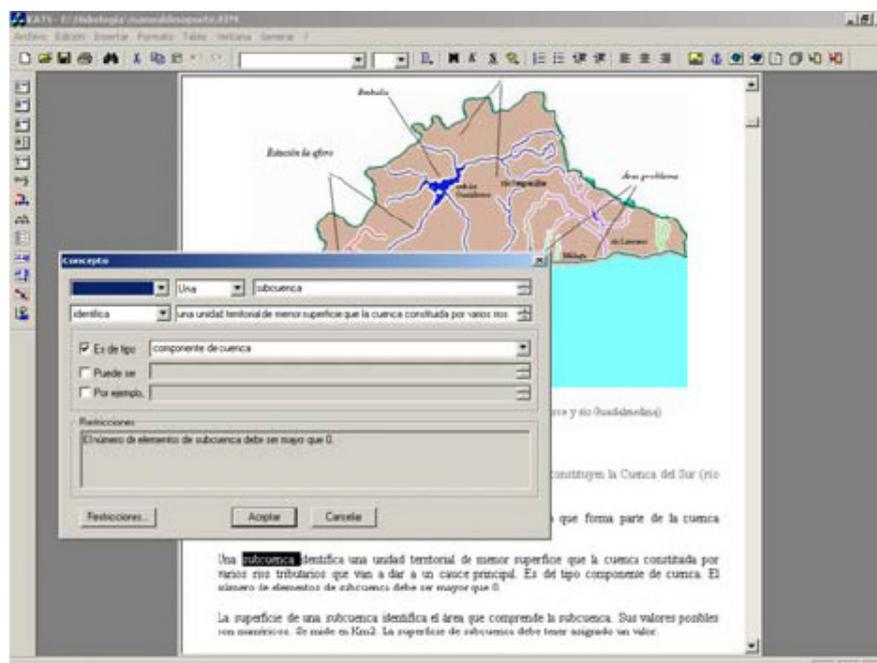


Рисунок 2 – Пример экрана, представленного инструментом KATS

ABAQUS

ABAQUS – это программа для конечно-элементного анализа, которая также может быть использована для моделирования геомеханических процессов. С ее помощью инженеры могут анализировать деформацию горных пород, поведение грунтов и другие геомеханические явления с использованием метода конечных элементов (рисунок 3).

Программный комплекс ABAQUS изначально был ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач с учетом всех видов нелинейностей, а также на проведение междисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма. Такая концепция выгодно отличает ABAQUS от других программ подобного уровня (программный комплекс ANSYS для анализа сильно нелинейных и быстротекущих процессов использует стороннюю программу LS-DYNA), что позволяет с его помощью в рамках единого подхода решать многоцелевые задачи, сочетая преимущества явной и неявной схем конечно-элементного анализа и их комбинацию.

Одной из важнейших особенностей программного комплекса ABAQUS является его универсальность. Данный пакет может использоваться на всех этапах проектирования и создания современных изделий и практически всеми расчетными, проектными и технологическими службами предприятия. Это, несомненно, один из серьезных критериев при решении вопроса о покупке данного программного комплекса.

ABAQUS предлагает открытый подход к решению сложных проблем и предоставляет неограниченные возможности по подключению пользовательских программ на всех этапах расчета конкретной задачи. Необходимо также отметить надежность программного комплекса ABAQUS – строгий контроль за сходимостью решений исследуемых процессов, автоматический выбор шага интегрирования, мониторинг задачи на всех этапах расчета, многочисленные функции контроля.

ABAQUS тесно интегрирован практически со всеми CAD-системами, имеет собственный мощный современный препостпроцессор ABAQUS/CAE. Возможна и связь через интерфейсы с другими программными продуктами, такими как ADAMS (кинематика и динамика узлов и механизмов), SYSNOISE (акустика и виброакустика), Moldflow (литье пластмасс) и FlowVision (аэро- и гидродинамика) [5].

Разработчиком является компания Dassault Systèmes.

RS2 (Phase2) и RS2 3D: Программное обеспечение для геотехнических расчетов

RS2, также известный как **Phase2**, представляет собой программное обеспечение для численного моделирования статических и динамических анализов стабильности склонов и подземных

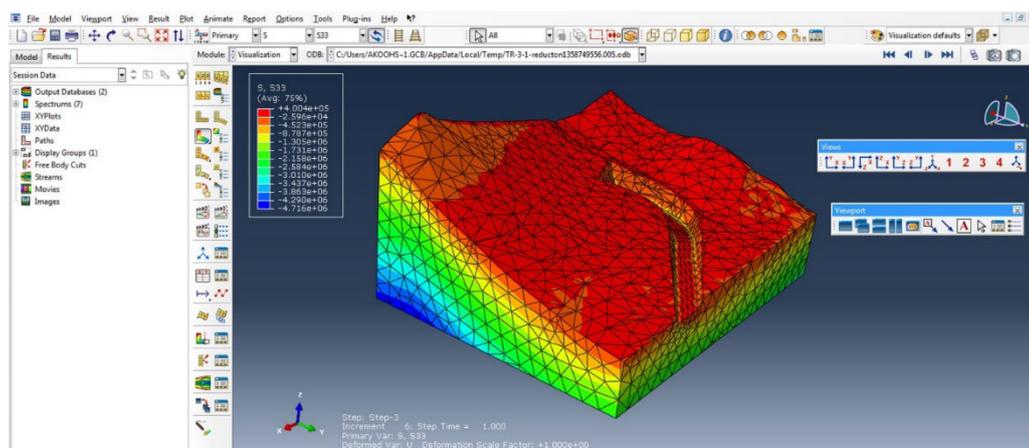


Рисунок 3 – Пример экрана, представленного инструментом ABAQUS

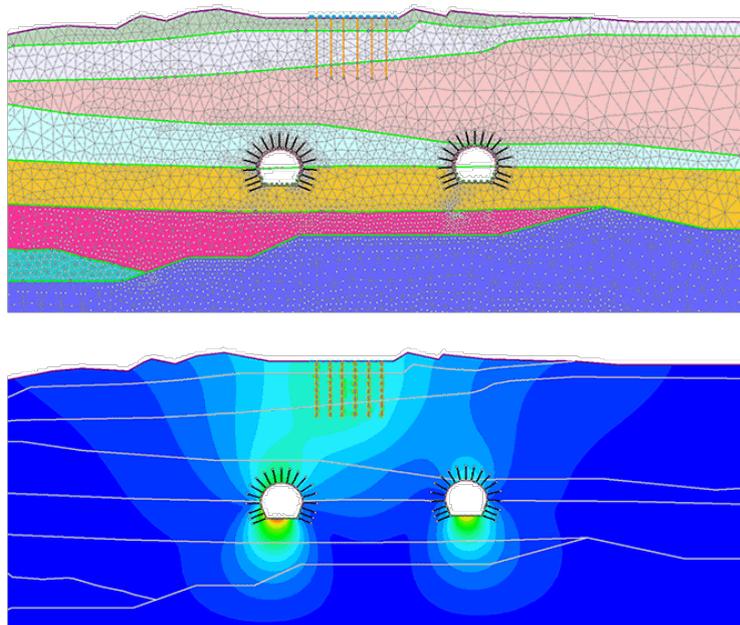


Рисунок 4 – Проект туннелирования

конструкций. Оно обеспечивает возможность моделирования различных условий горных массивов и проведения анализа их стабильности (рисунок 4).

Преимущества:

1. Расширенные возможности анализа: RS2 предлагает широкий спектр аналитических инструментов, включая метод предельного равновесия и метод конечных элементов, обеспечивая глубокое исследование геотехнических конструкций и феноменов.

2. Интуитивный интерфейс моделирования: благодаря интуитивному графическому интерфейсу, RS2 упрощает процесс моделирования, позволяя инженерам эффективно создавать и визуализировать сложные геологические и конструктивные модели.

3. Универсальность применения: RS2 легко адаптируется к различным геотехническим сценариям, обеспечивая точные результаты анализа в различных областях геотехники.

4. Параметрические исследования и анализ чувствительности: RS2 позволяет проводить параметрические исследования и анализ чувствительности, обеспечивая возможность исследования различных сценариев проектирования и их последствий.

RS2 3D представляет собой трехмерное расширение RS2, изменяя подход к геотехническому анализу и внедряя три измерения в процесс моделирования. Это расширение повышает достоверность и точность анализов, особенно в сценариях, где пространственная сложность геологических объектов требует трехмерного подхода.

Основные особенности RS2 3D:

1. Полноценный трехмерный анализ: RS2 3D преодолевает ограничения традиционного двухмерного анализа, обеспечивая более реалистичные и точные результаты за счет учета пространственной сложности геологических структур.

2. Расширенная визуализация и интерпретация: благодаря трехмерной визуализации RS2 3D предоставляет инженерам глубокое понимание геологических структур и процессов, облегчая принятие обоснованных решений.

3. Интеграция с геотехническими данными: RS2 3D позволяет интегрировать геотехнические данные сайта, такие как бурные пробой и геологические карты, в трехмерные модели, обеспечивая соответствие реальным условиям и повышая точность анализов.

Расширенные опции сетки и граничных условий: RS2 3D предоставляет расширенные алгоритмы построения сетки и опций граничных условий, разработанные специально для трехмерного анализа, обеспечивая возможность моделирования сложных геотехнических сценариев с высокой точностью [6].

Разработчик Rocscience Inc.

Plaxis – это программа для конечно-элементного анализа геотехнических проблем, включая геомеханические процессы, связанные с фундаментами, земляными и каменными сооружениями, а также другими геотехническими объектами.

Программное обеспечение Plaxis применяется во всем мире как на горных предприятиях, так и на других геотехнических объектах.

Таким образом, возможность применения программного продукта достаточно широкая [4].

Среди решаемых задач:

- оценка осадки поверхностных зданий;
- учёт влияния строительства на уже существующие объекты подземной коммуникации;
- обоснование строительства подземных парковок, глубины котлованов, устойчивости котлованов;
- моделирование поведения дренированных и недренированных грунтов;
- задачи водопонижения;
- анализ циклического воздействия на насыпи железнодорожного полотна;
- устойчивость уступов и бортов карьеров.

При простоте расчётов и пользовательского интерфейса от пользователя требуется постановка задачи и выбор физической модели поведения материалов, на основе которой необходимо произвести расчёт. Результаты могут быть представлены в виде проекций напряжений на соответствующие координатные оси, полных напряжений, эффективных напряжений, порового давления, проекциях деформаций, полных деформациях, приращениях деформаций, точек пластичности (точки граничного перехода). Эти данные могут быть автоматически (функционал заложен в алгоритм программы) сведены в таблицы. Таблицы впоследствии экспортируются. Можно осуществлять преобразования над полученными значениями в других программных комплексах таких, как MathCad. Это делается для того, чтобы выразить, например, через функцию прочности полученные величины для выявления критических значений [7].

Конструктивные элементы такие как: обделка тоннелей, стена в грунте, сваи, плиты фундаментных оснований – определяются с помощью инструментов программы. Результаты для конструктивных элементов помимо смещений, деформаций можно представить в виде осевых, касательных сил, изгибающих моментов.

Примеры расчётов в Plaxis и области применения

Ниже представлены некоторые примеры результатов моделирования, выполненных с применением программного обеспечения Plaxis (рисунки 5, 6).

Таким образом, Plaxis находит достаточно широкое применение при решении задач численного моделирования. С каждым годом ПО совершенствуется и дополняется новыми моделями поведения материала. Применение программного обеспечения Plaxis подтверждается эффективностью и точностью расчётов, что обуславливает преимущественную востребованность продукта на инженерном рынке перед другими программными комплексами, реализующими расчёт напряжённо-деформированного состояния породных и грунтовых массивов [5].

Разработчик Bentley Systems.

Заключение. Программное обеспечение для моделирования геомеханических процессов играет важную роль в оптимизации горных работ и повышении их безопасности. Рассмотренные в статье программы предоставляют инженерам возможность анализировать и прогнозировать поведение

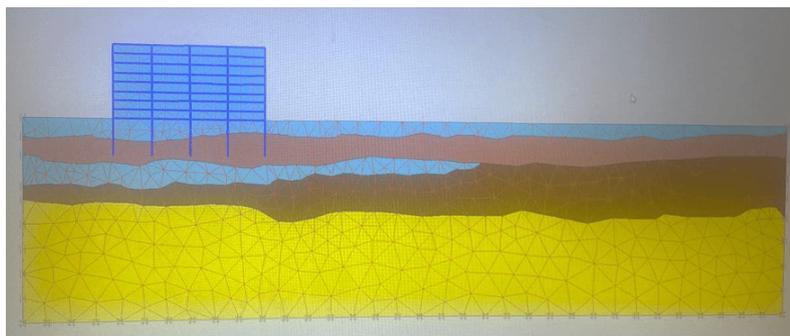


Рисунок 5 – Расчётная схема при оценке устойчивости зданий и параметров свайного основания. Сетка конечных элементов

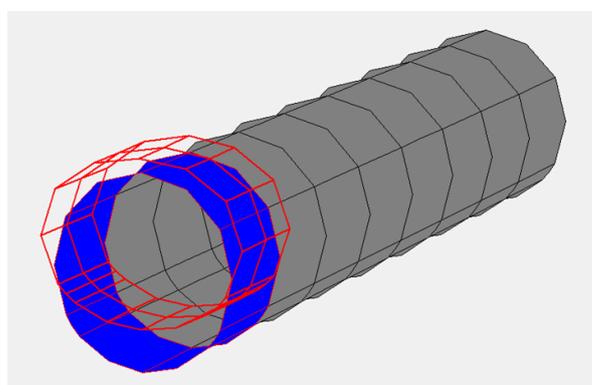


Рисунок 6 – Построение эпюры общих смещений в окрестности горной выработки

горных массивов, что позволяет принимать обоснованные решения при проектировании и эксплуатации горных объектов. Но вместе с тем остро стоит вопрос в модернизации этих программ, адаптации к реальным условиям и многообразию свойств горных пород и механизмов разрушений. Важным аспектом становится применение элементов искусственного интеллекта. Вопросы адаптации, экспертной оценки устойчивости, прогнозирование устойчивости горных склонов необходимо решать с помощью основ искусственного интеллекта.

Поступила: 24.06.24; рецензирована: 08.07.24; принята: 11.07.24.

Литература

1. Кудрявцев С.А. Использование метода конечных элементов в решении задач геотехники / С.А. Кудрявцев, В.Н. Парамонов, И.И. Сахаров, А.Г. Шашкин. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2014. 162 с.
2. Wicczorek G.F. Monitoring slope movements / G.F. Wicczorek and J.B. Snyder // Geological Monitoring: Boulder, Colorado. Geological Society of America. Pp. 245–271. DOI: 10.1130/2009 (дата обращения: 20.01.2024).
3. Рыжов С. ABAQUS – многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа / С. Рыжов // «САПР и графика» 1>2003. URL: <https://sapr.ru/article/6736> (дата обращения: 25.01.2024).
4. Голубев А.И. Комплексные расчеты гидротехнических сооружений в PLAXIS / А.И. Голубев, А.В. Селецкий / ООО НИП-Информатика // Инновации в строительстве. 2011. № 9. С. 58–60. URL: https://www.nipinfor.ru/construction/c_archive/10013/ (дата обращения: 12.03.2024).
5. Глинский Б.М. Технология суперкомпьютерного 3d моделирования сейсмических волновых полей в сложно построенных средах / Б.М. Глинский, В.Н. Мартынов, А.Ф. Сапетина // Вестник ЮУрГУ.

- Серия Вычислительная математика и информатика. 2015. Т. 4. № 4. URL:https://icmmg.nsc.ru/sites/default/files/pubs/ivmimg_sapetina_vestnikyuurgu.pdf (дата обращения: 20.03.2024).
6. Rocscience inc. Программный комплекс «Rocscience». RS3. Программа анализа методом конечных элементов. Руководство пользователя Rocscience. М.: Общество с ограниченной ответственностью «Современные изыскательские технологии», 2021. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-rukovodstvopolzovatelyars3rocscience.pdf> (дата обращения: 26.04.2024).
 7. Современное программное обеспечение для решения задач геомеханики / С.Ф. Усманов // Вестник КРСУ. 2008. Т. 8. № 1. С. 81–84. URL: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/129/5642> (дата обращения: 03.03.2024).