



DOI 10.37539/2949-1991.2023.7.7.003

УДК 622.831.1

Пономаренко Константин Борисович,

младший научный сотрудник лаборатории горного давления
и сдвигения горных пород ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород

**КОНВЕРГЕНЦИЯ СТЕНОК ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК
ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ПЕРЕМЫЧКИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА В ПРОЦЕССЕ
ПРОХОДКИ ВСТРЕЧНЫМИ ЗАБОЯМИ
НА ШАХТЕ ИМ. ГУБКИНА**

Аннотация: статья содержит обзор вопроса по теме определения напряженного состояния массива горных пород методом конечных элементов при образовании перемычки в процессе буровзрывной проходки выработок встречными забоями. На основе установленных сведений о физико-механических свойствах образцов породы и их применении в программном комплексе моделирования MIDAS GTS NX определено напряженно-деформированное состояние массива горных пород.

Ключевые слова: массив горных пород, физико-механические свойства, удароопасность, напряженное состояние, горная выработка, метод конечных элементов

Введение

Для обеспечения безопасности и прогноза устойчивости горных выработок на различных стадиях эксплуатации месторождений полезных ископаемых (МПИ), в частности при подземных горных работах, первоочередную важность приобретают вопросы напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива. Осведомленность о состоянии производственной среды при



оценке устойчивости и удароопасности горных массивов формируется при учете множества факторов: физико-механические свойства, структурная нарушенность, обводненность, газодинамика, начальное НДС массива и его изменение в процессе эксплуатации. С учетом вышеизложенных факторов, появляется необходимость расчетов для оценки напряженного состояния (НС) массива горных пород (МГП), что особенно актуально для МПИ опасных по газодинамическим явлениям, а также для МПИ склонных и опасных по горным ударам, которые внесены в перечень ФНиП [1]. Существующие комплексы методов оценки позволяют проводить натурные измерения НДС в МГП, однако спорным вопросом остается правомерность и достоверность установленных значений.

К методам определения НС МГП относятся: теоретические методы [2, 3]; методы геологии и геотектоники [2-5]; геомеханические методы разгрузки (основанные на измерении деформаций горных пород) и компенсационные методы нагрузки [7; 9; 10]; геофизические методы [8; 9; 20; 29]; методы определения НС по зонам действия взрыва исследования по которым изложены в [30-33]. Некоторые из них являются наиболее распространенными, но большинство из этих методов могут быть дорогостоящими, трудоемкими и времязатратными.

В современном мире, изучению и анализу НДС различных систем разработок, их конструкций и объектов при помощи компьютерного метода конечно-элементного моделирования посвящено большое количество как Российских [11-20], так и зарубежных [21-28] исследований. Для оценки удароопасности и прогнозирования разрушений МГП МПИ с учетом полей напряжений, широко распространены численные методы моделирования характера изменения НДС горных массивов. Зачастую на практике, результаты численного моделирования методом конечных элементов (МКЭ) НДС массива горных пород зависят от построения максимально приближенной к реальной действительности визуально идеализированной геометрической модели. МКЭ



позволяет оценить устойчивость горных выработок района наблюдений, а оптимальные сочетания натуральных методов измерений и численного моделирования позволяет обосновать выбор технических решений.

На основе установленных сведений о физико-механических свойствах образцов горной породы и их применении в расчетах, программным комплексом моделирования устанавливается НДС МГП и выполняется его обобщение. Здесь же многообразие условий формирования массива горных пород, его блочная структура и тектоника, наличие включений и неоднородность, общее взаимодействие элементов горного массива будут способствовать корректировке расчетов и нуждаться в натуральных измерениях процесса сдвижения, поскольку эти данные являются значимым источником об исходном и техногенном НДС МГП.

Применяемый комплекс взаимодополняющих исследований (теоретические и экспериментальные методы, натурные измерения, лабораторные исследования, методы моделирования) представляет возможным: эффективно изучать параметры НДС МГП, более объективно определить НДС, контролировать параметры НДС МГП и динамику их изменения в ходе ведения горных работ, прогнозировать геодинамические явления.

Цель статьи: методом конечных элементов численного моделирования определить напряженное состояние массива кварцитопесчаников на участке откаточного штрека (горизонт -125 м) шахты им. Губкина при сбойке горных выработок встречными забоями. Натурными наблюдениями экспериментально определить величину конвергенции (сближение, схождение) стенок горных выработок, сравнить результаты смещений и оценить достоверность метода моделирования.

В качестве *объекта исследования* рассматривается массив (выработка) пород кварцитопесчаников на участке откаточного штрека гор. -125 м шахты им. Губкина при сбойке горных выработок встречными забоями и НДС массива вмещающих пород в образованной перемычке.



Исследование выполнялось натурными измерениями величины конвергенции стенок горной выработки с помощью ленточного экстензометра и компьютерным моделированием напряженно-деформированного состояния массива пород методом конечных элементов с привлечением лабораторных испытаний по определению физико-механических свойств пород массива, которые участвуют в программном расчете.

Методика. Анализ научной литературы на предмет исследования НДС горного массива, проведение промышленно-экспериментальных исследований для определения величины конвергенции стенок выработки, моделировании НДС горного массива МКЭ, обсуждение его результатов, сравнение и оценка достоверности.

Общие сведения

Оценка НДС массива пород проводилась в откаточном штреке (горизонт - 125 м) шахты им. Губкина комбината «КМАруда». Исследования осуществлялись в перемычке при сбойке горных выработок встречными забоями. Проанализирована стадия образования целика во времени. Массив участка представлен плотным, трещиноватым кварцитопесчаником с коэффициентом крепости по М.М. Протоdjяконову (f) – 16-18. Геология исследуемого участка представлена на рис. 1.

Геометрические параметры выработки и свойства материала (определены при выполнении лабораторных испытаний в ОАО «ВИОГЕМ») для расчета приняты следующими: высота выработки (a) – 3 м; ширина выработки (b) – 4 м; сечение в свету ($S_{св}$) – 10,1 м²; глубина выработки от поверхности (H) – 313 м; ускорение свободного падения (g) – 9,8 м/с²; удельный вес (ρ) – 2582 кг/м³ = 2,6 г/см³; модуль упругости (E) – 704045 кгс/см² = 7*10¹⁰ Па; коэффициент Пуассона (μ) – 0,21; скорость продольной волны (c) – 5,5*10³ м/с; предел прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$) – 166 МПа.

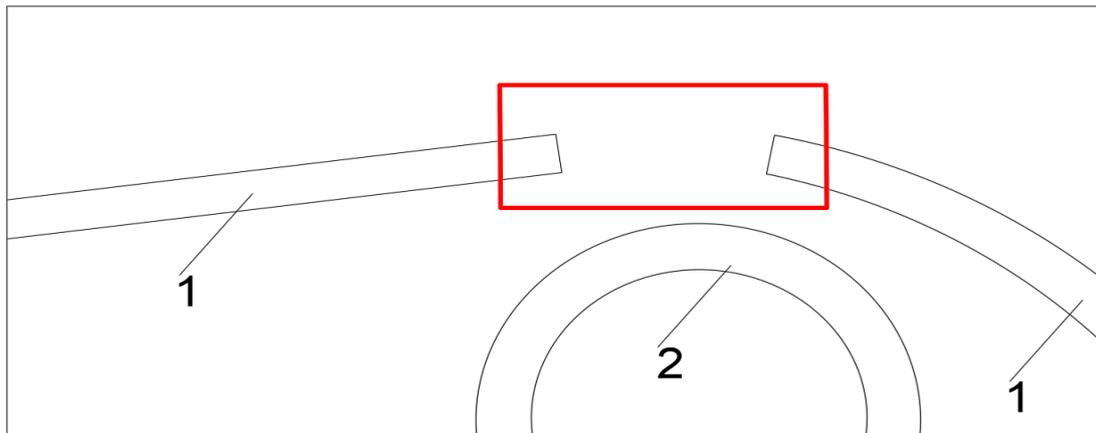


Рис. 1 – Схема образования перемычки при сбойке горных выработок;
1 – сходящиеся выработка, 2 – выработка находящиеся на удалении 5 м; район образования перемычке выделен красным прямоугольником

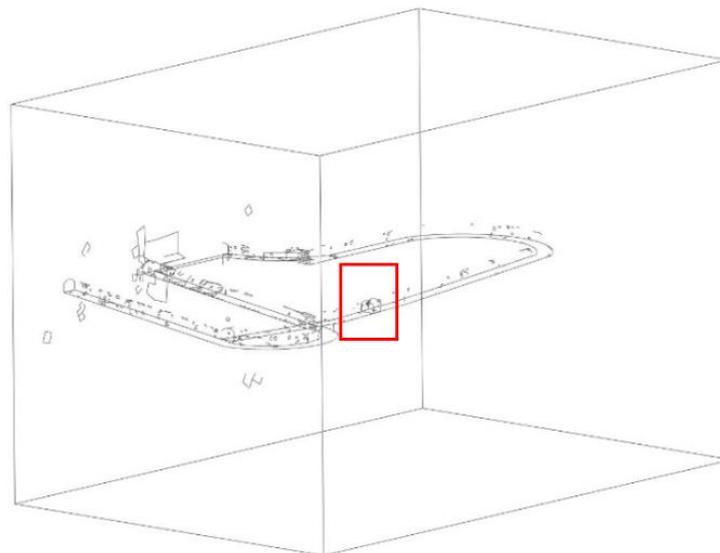


Рис. 2 – Аксонометрическая схема исследуемого участка горных выработок;
район образования перемычки и проведения натуральных измерений –
выделен красным прямоугольником

До образования горной выработки не нарушенный горный массив находится в естественном состоянии и обладает начальным НС от собственного веса. Отсюда, для определения НС массива пород с горной выработкой следует рассчитать начальное НС массива без выработки, а затем произвести его учет в модели как преднапряженное состояние. Гравитационное горное давление на глубине 313 м по формуле Динника А.Н. составляет 8,6 МПа.



Следует отметить, что на момент сбойки горной выработки в зоне влияния находится отработанная наклонная выработка (рис. 2; рис. 3), что расположена ниже места образования перемычки на расстоянии 5м.

Определение величины конвергенции стенок выработки. Измерение величины конвергенции выполнены при проходке горизонтальной выработки на полное сечение. В бортах выработки устанавливались репера для измерения расстояния ленточным экстензометром. Первый замер производился после установки реперов в забое выработки, второй замер после подвигания забоя буровзрывным методом и уборки горной массы. Схема участка представлена на рис. 1 и 2, анкера заложены в левой и правой стенках выработки на отмеченном участке на схеме. Результаты измеренных смещений представлены в табл.

Таблица

Величина конвергенции выработки ш. им Губкина (гор. 125м)

Замер до взрыва (1 замер) 03.08.22 г.	Замер после взрыва (2 замер) 04.08.22 г.	Замер после взрыва (3 замер) 17.08.22 г.
$L = 3379,78$ мм	$I_1 = 3380,81$ мм	$I_2 = 3380,99$ мм
$\Delta L_1 = I_1 - L = 1,03$ мм		$\Delta L_2 = I_2 - L = 1,21$ мм

Величина конвергенции стенок горной выработки после первого измерения составила 1,03 мм, после второго измерения смещение 1,21 мм.

Моделирование методом конечных элементов (МКЭ). В программном комплексе Midas GTS NX [6] численным моделированием МКЭ построена модель горной выработки, обрабатываемая встречными забоями (рис. 2, 3, 4). Для получения детального анализа векторно-силовых параметров напряжений, действующих на исследуемом участке, привлекались результаты лабораторных испытаний прочностных свойств горного массива установленных после отбора образцов с района наблюдений (указаны в общих сведениях выше).

Рассмотрим реализацию модели МКЭ на примере горизонтальной выработки, сооружаемой на глубине 313 м. Модель участка построена по упругопластическим свойствам поведения материала модели Мора-Кулона. Она позволяет получить достоверные результаты расчетов и широко используется при моделировании.



При построении выработок участка наблюдений для общего расчета НДС в программном комплексе использовались функции [6]:

1) для минимизации количества элементов проводилось автоматическое создание высококачественной гибридной сетки (рис. 3а);

2) условия закрепления основания путем автоматического создания граничных условий нагрузки от собственного веса, где перемещения по направлению X запрещаются по левой и правой границе, перемещения по направлению Y – по передней и задней границе, а перемещения по X и Y – по нижней границе модели (рис. 3б);

3) задание давления в виде распределенной силы на целевую геометрическую поверхность (8,6 МПа) как нагрузка от собственного веса на элементы модели (рис. 3а).

Геометрические параметры массива модели: длина – 150 м; ширина и высота модели – 100 м; массив насчитывает 245418 элементов (Elem.), а общее количество узлов 149554 (Node).

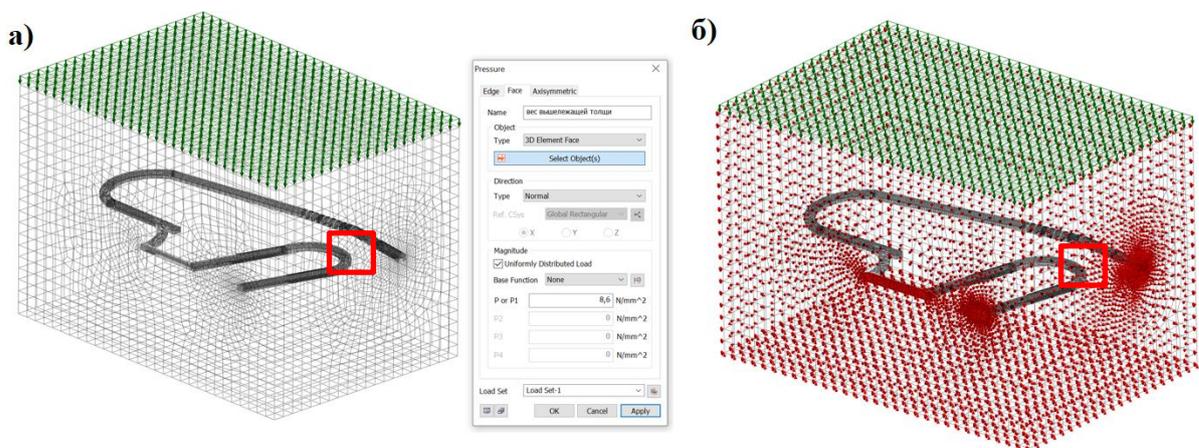


Рис. 3 – Массив модели и создание сетки конечных элементов; а) параметры давления от веса вышележащей толщи – 8,6 Н/мм² (МПа); б) условия закрепления основания и ограничение перемещений модели; район образования перемычки выделен красным прямоугольником

В образованной перемычке при сбойке горной выработки встречными забоями определялись максимальные значения вертикальных и горизонтальных напряжений МКЭ. В результате моделирования получены изображения



действующих сил напряжений массива в окрестностях горной выработки (рис. 4). Средствами ПО «Midas GTS NX» используя объемную картину получено конкретные значения напряжений с распределением по участку в процентах.

Результаты наблюдений

Проведение натуральных измерений с помощью ленточного экстензометра позволило установить величину конвергенции стенок выработки при проходке в откаточном штреке горизонта -125 м шахты им. Губкина комбината «КМАруда». За период с 03.08.22 – 17.08.22 г. средние горизонтальные смещения стенки выработки, установленные натурными измерениями, составляют – 0,57 мм.

Действующие горизонтальные смещения породных стенок массива при образовании в нем перемычки, рассчитанные при построении модели составляют – 0,55 мм (рис. 5). Данные натуральных измерений и расчета построенной модели горной выработки практически не отличаются друг от друга, что говорит о правомерности расчета модели.

При моделировании, значения процентного распределения установленных действующих напряжений МКЭ на участке наблюдений в перемычке составляют:

- Горизонтальные напряжения: от 15 до 21 МПа – 7,5%; от 10 до 15 МПа – 81,5%; от 1 до 10 МПа – 11%;
- Вертикальные напряжения: от 15 до 39 МПа – 15%; от 10 до 15 МПа – 65%; от 1 до 10 МПа – 20%.

По данным моделирования в образованной перемычке (у забоя) горизонтальные и вертикальные напряжения находятся в диапазоне от 5 до 25 МПа и не превышают его.

Таким образом, представленные результаты позволяют определять параметры напряженного состояния и задавать учет в модели МКЭ прочностных свойств породного массива. Представляется возможность использования результатов моделирования для прогноза устойчивости и удароопасности подземных горных выработок.

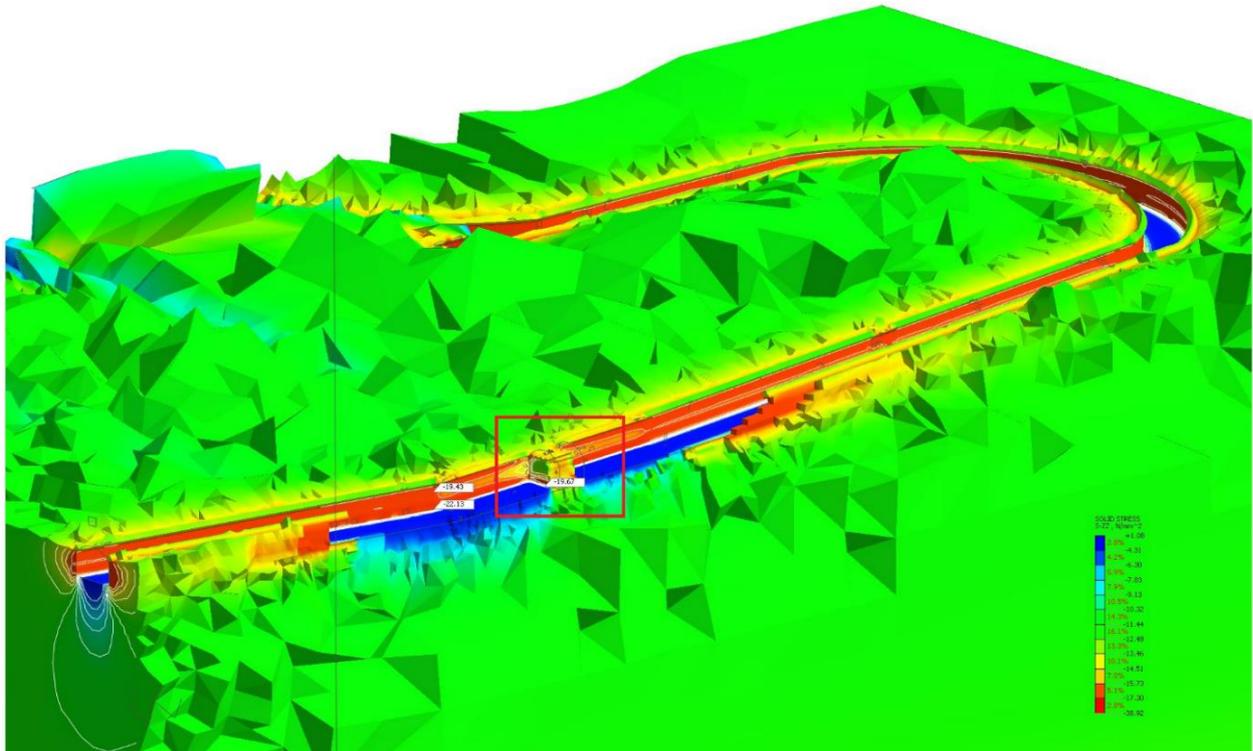


Рис. 4 – Общий вид модели и участка наблюдений;
образованная перемычка выделена красным прямоугольником

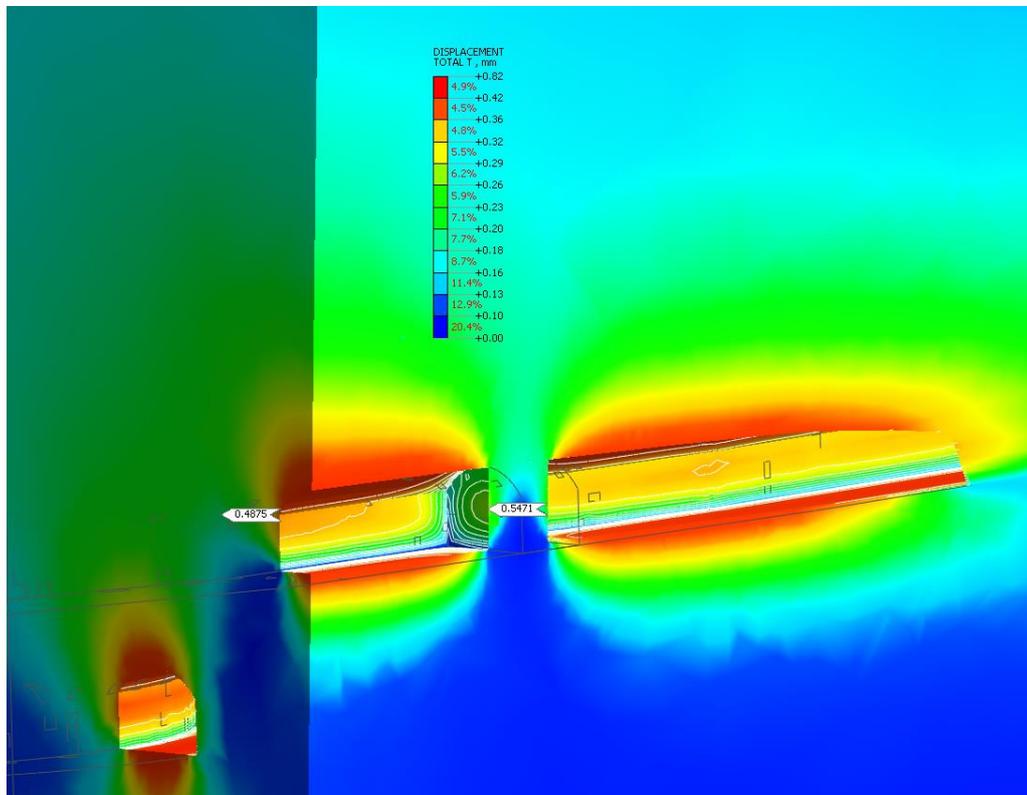


Рис. 5 – Результаты смещения породных стенок; образованная перемычка
при приближении забоев горной выработки

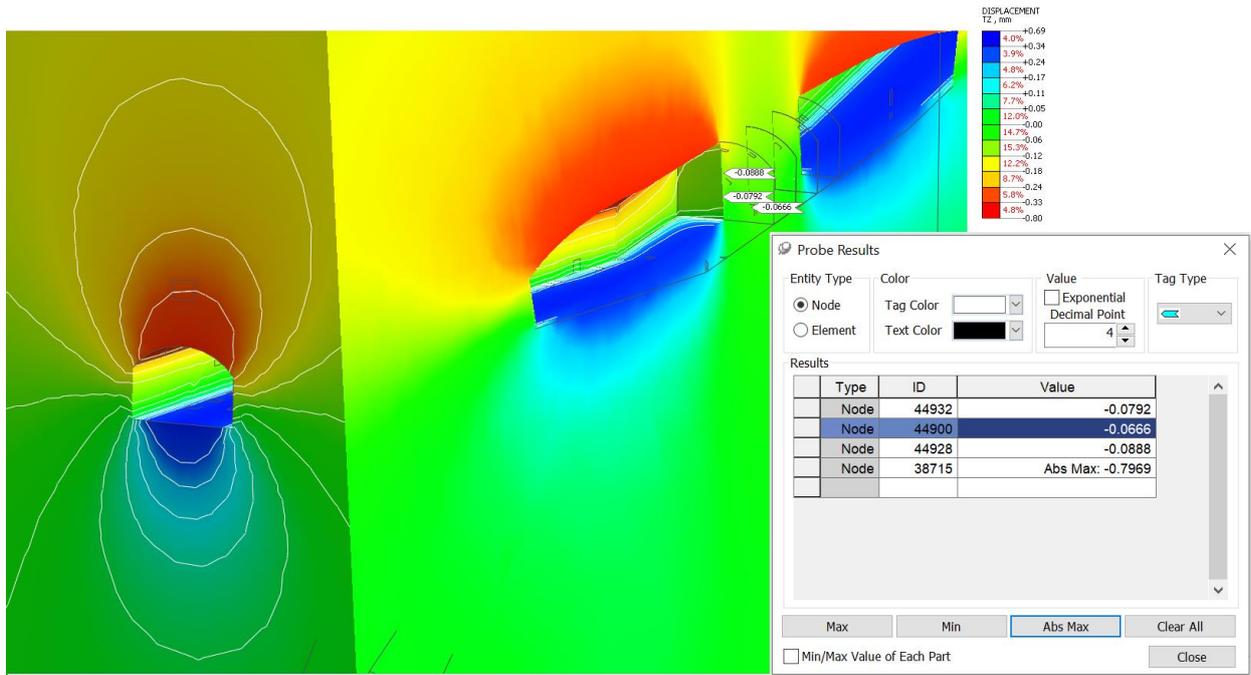


Рис. 6 – Действующие вертикальные смещения
в массиве при образовании перемычки

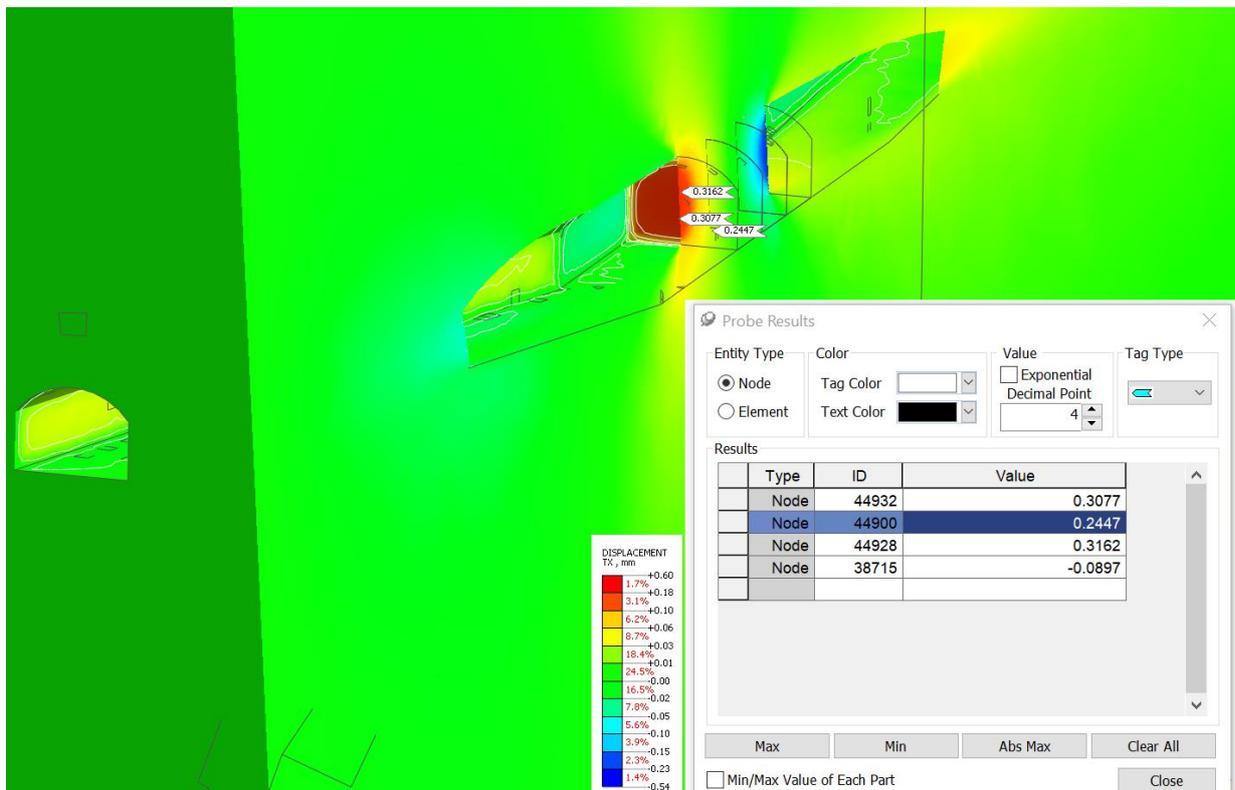


Рис. 7 – Действующие горизонтальные смещения
в массиве модели

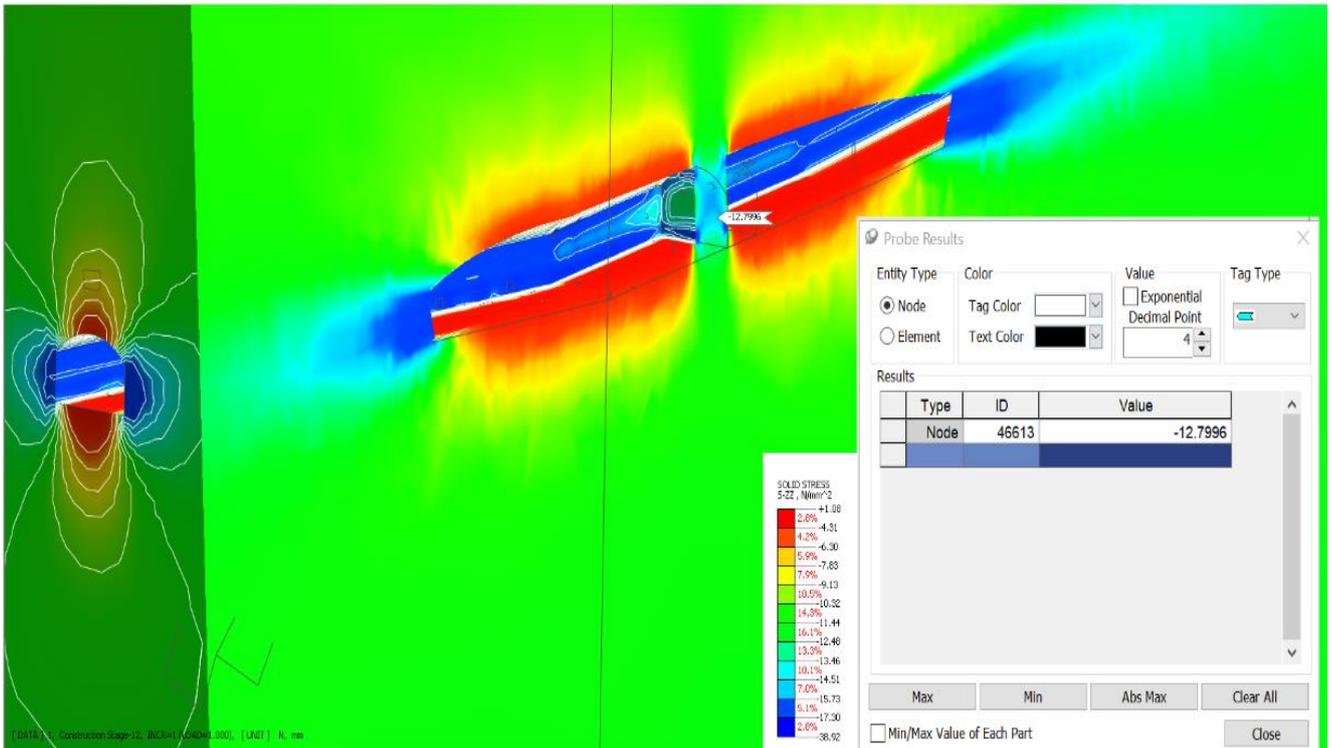


Рис. 8 – Действующие вертикальные напряжения в массиве модели

Выводы

1. Построение модели для определения значений напряжений и анализ научно-технической литературы по теме исследования позволил выделить несколько преимуществ и недостатков при использовании расчета МКЭ при моделировании. Основными преимуществами является общедоступная, легкая и понятная визуализация участка наблюдений; возможность получать конкретные значения параметров НДС и смещений массива в процентном соотношении при расчетах, а также возможность построения и анализа сложных участков конструктивных элементов (устойчивых размеров обнажений, целиков, камер, бункеров, горизонтальных и вертикальных выработок и их сопряжений). Среди недостатков следует выделить трудоемкость при расчетах в Midas GTS NX из-за большого количества элементов сложной конструкции, а также и рендеринг при импорте из систем автоматизированного проектирования и черчения.

2. Установленная натурными измерениями средняя величина конвергенции стенки выработки в массиве кварцитопесчаника гор. -125 м. шахты им. Губкина



комбината «КМАруда» – 0,57 мм, а горизонтальные смещения породных стенок массива при образовании в нем перемычки, рассчитанные при построении модели составляют – 0,55 мм, это говорит о правомерности расчета модели.

3. Согласно дополнительным требованиям при ведении взрывных работ в подземных выработках приказа Ростехнадзора от 8 декабря 2020 г. № 505 «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: взрывные работы при проведении выработок встречными забоями и сбойке выработок производится с соблюдением условий [1]:

- одновременное взрывание шпуровых зарядов во встречных забоях запрещается;
- когда размер целика между встречными забоями составит 7 м, работы должны проводиться только из одного забоя (при этом необходимо бурить опережающие шпуров глубиной на 1 м больше, чем глубина заряжаемых шпуров).

4. Значения установленных действующих напряжений на участке наблюдений при моделировании:

- Горизонтальные напряжения: от 15 до 21 МПа – 7,5%; от 10 до 15 МПа – 81,5%; от 1 до 10 МПа – 11%;

- Вертикальные напряжения: от 15 до 39 МПа – 15%; от 10 до 15 МПа – 65%; от 1 до 10 МПа – 20%.

По данным моделирования участка наблюдений в образованной перемычке (у забоя) горизонтальные и вертикальные напряжения находятся в диапазоне от 5 до 39 МПа и не превышают его.

5. Для прогноза устойчивости и удароопасности горных выработок представляется возможным использование результатов моделирования.

Данное исследование и его результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций по безопасному ведению горных работ при буровзрывной проходке выработок, включающие установление склонности массива к горным ударам, определения степени удароопасности, а также для выбора способа крепления сходящихся горных выработок.



Список литературы:

1. **ФНиП.** Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», – приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 г. № 505.
2. **Казикаев Д.М.** Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд // - Москва: Недра, 1981. -288 с.
3. **Петухов И.М.** Развитие теории горных ударов // Сб. научн. трудов ВНИМИ. – Горные удары. – Л.: изд. ВНИМИ, 1989. С. 4-10.
4. **Гзовский М.В.** Основы тектонофизики // М. Наука. 1975.
5. **Гущенко О.И.** Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М., 1979. С. 7-25.
6. **Пособие по расчетам в программном комплексе MIDAS GTS NX.** Online manual – Geo Technical Analysis System, (v2.1), 2015 г.
7. **Сергеев, С.В., Сеница И.В.** Геомеханическое сопровождение подземной отработки железных руд на комбинате «КМАруда» // Горный журнал. 2019. N8. С. 30-33. DOI: 10.17580/gzh.2019.08.05.
8. **Хмелинин А.П.** Разработка комплексного геофизического метода для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения // Новосибирск: ИГД СО РАН. 2014. 165 с.
9. **Шкуратник, В.Л.** Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород // М.: МГГУ. 2012. 112 с.
10. **Зубков А В., Феклистов Ю.Г., Липин Я.И., Худяков С.В.** Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования // Проблемы недропользования. 2016. N4. С. 41-49. DOI: 10.18454/2313>1586.2016.04.041.
11. **Кириенко Ю.А.** Обоснование конструкции крепи сопряжения шахтного ствола, пройденного в солях // ГИАБ. 2022. №6. С. 20-34. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.



12. **Неверов С.А., Шапошник Ю.Н., Никольский А.М.** Анализ напряженно-деформированного состояния массива пород при отработке предохранительного целика вертикального ствола // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. С. 200-210. DOI: 10.33764/2618-981 X-2019-2-4-200-211.

13. **Конурин А.И., Щукин С.А., Неверов А.А.** Отработка предохранительного подкарьерного целика в условиях его подработки подземными работами // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. С. 77-87. DOI: 10.33764/2618-981 X-2019-2-4-77-88.

14. **Харисов Т.Ф., Харисова О.Д.** Геомеханическое обоснование параметров устойчивости камер и целиков в сложных горно-геологических условиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. N7. С. 25-33. DOI 10.18799/24131830/2019/7/2173.

15. **Харисов Т.Ф., Харисова О.Д.** Исследование устойчивости массива в процессе разработки месторождения в сложных горно-геологических условиях // Проблемы недропользования. 2019. N2. С. 79-87. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.02.079.

16. **Щербаков С.С., Шемет Л.А., Насань О.А.** Компьютерное моделирование объемной повреждаемости в окрестностях горной выработки // Доклады БГУИР. 2020. 18(7). С. 47-54. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-47-54>.

17. **Андрейко С.С., Некрасов С.В.** Вычислительная схема оценки напряженно-деформированного состояния кусочно-однородной трехмерной упругой среды на основе непрямого метода граничных элементов // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. N16. С. 86-97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.10.

18. **Андрейко С. С.** Геомеханическое обоснование применения вогнуто-плоской формы забоя горной выработки для управления внезапными отжимами призабойной части пород // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2016. Т.15, N18. С. 80-90. DOI: 10.15593/22249923/2016.18.9.



19. **Потемкин Д.А., Трушко О.В.** Формирование зоны сдвижения в грунтовом массиве при строительстве наклонных транспортных тоннелей // Проблемы современной науки и образования. 2016. С. 284-289.
20. **Плешко М.С., Плешко М.В., Войнов И.В., Костюхов А.В.** Анализ напряженно-деформированного состояния обделки двухпутного тоннеля на различных стадиях размораживания грунтового массива // ГИАБ. 2019. N10. С. 160-171. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-160-171.
21. **Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y.** A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. 85. pp. 406-417.
22. **H. Cai, Z. Liu, S. Li, T. Zheng.** Improved analytical prediction of ground frost heave during tunnel construction using artificial ground freezing technique, *Tunn. Undergr // Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. V.92. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103050.
23. **Julius K. von Ketelhodt, Thomas Fechner, Musa S.D. Manzi, Raymond J. Durrheim.** Joint inversion of cross-borehole P-waves, horizontally and vertically polarized S-waves: tomographic data for hydro-geophysical site characterization // *Near Surface Geophysics*. 2018. N16. pp. 529-542. DOI: <https://doi.org/10.1002/nsg.12010>.
24. **Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W.** A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. 72. pp. 55-63. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.004.
25. **Shanshan Hou, Yugui Yang, Chengzheng Cai, Yong Chen, Fulin Li, Dawei Lei.** Modeling heat and mass transfer during artificial ground freezing considering the influence the influence of water seepage // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. 194(1):123053. pp. 1-17. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123053.



26. *Zhu Z., Fang Z., Xu F., Han Z., Guo X., Ma C.* Model test study on the rock mass deformation law of a soft rock tunnel under different ground stresses // *Front. Earth Sci.* 2022. 10:962445. pp. 1-16. DOI:10.3389/feart.2022.962445.

27. *Fhatuwani Sengani.* Characterisation of rock fracturing ahead of the preconditioned mining faces in a hard rock mining // *Arabian Journal of Geosciences.* 2022. 13(4). pp. 1-12. DOI:10.1007/s12517-020-05720-0.

28. *Lei Zhou, Leijun Ma, Zheming Zhu, Yuqing Dong.* Study of the coupling effect of elliptical cavities and cracks on tunnel stability under dynamic loads // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* 2022. 121(11):103502. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103502.

29. *Ляшенко В.И.* Развитие научно-технических основ мониторинга состояния горного массива сложноструктурных месторождений // *ГИАБ.* 2017. N2. С. 109-135.

30. *Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б.* Разработка метода определения напряженного состояния горного массива при взрывной проходке выработок // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2022. – N8. – С. 27–37. DOI:10.25018/0236_1493_2022_8_0_27.

31. *Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б.* Оценка достоверности взрывного метода определения напряженного состояния горного массива // *Взрывное дело.* 2022. N137/94. С.138-152.

32. *Тюпин В.Н., Пономаренко К.Б.* Определение напряженного состояния массива железистых кварцитов взрывным методом при проходке горных выработок // *Взрывное дело* N135/95. 2022.