ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья
Геотехнология и инженерная геология

Моделирование напряженно-деформированного состояния забоя горной выработки вблизи опасных по газодинамическим явлениям зон

С.Г.Гендлер, Н.Е.Мороз✉
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Гендлер С.Г., Мороз Н.Е. Моделирование напряженно-деформированного состояния забоя горной выработки вблизи опасных по газодинамическим явлениям зон // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 91-98. EDN PSAKKB

Аннотация
Проходка горных выработок в прочных доломитах на руднике «Интернациональный» буровзрывным способом осложнена газодинамическими явлениями, представляющими собой выбросы породы и газа. Наличие трещинных зон и значительного горного давления породных толщ на глубине свыше 1000 м предопределило реализацию вторичного разрушения пород из забоя вскрывающих выработок. В статье представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния забоя горной выработки опасных по газодинамическим явлениям зон, характерных для геомеханических условий месторождения кимберлитовой трубки «Интернациональная». Моделирование напряженно-деформированного состояния выполнено методом конечных элементов в отечественном программном комплексе CAE Fidesys. Рассмотрены 18 геомеханических ситуаций расположения забоя горной выработки на расстоянии 2, 4, 6 м до зон интенсивной трещиноватости мощностью 2, 4, 6 м с наличием в них газа и без газа. Все расчетные схемы строились в объемной постановке на глубине 1500 м с вертикальными напряжениями, равными 40 МПа, что соответствует теории профессора А.Н.Динника. Горизонтальные напряжения задаются на боковых гранях расчетных моделей через вынужденные перемещения из условия действия равнокомпонентного сжатия, что соответствует боковому распору, равному 1. Параметры равнокомпонентного или близкого к равнокомпонентному поля напряжений на глубоких горизонтах кимберлитовой трубки «Интернациональная» подтверждаются как инструментальными измерениями, так и мировым опытом ведения горных работ на глубинах, превышающих 1000 м. Результаты исследования свидетельствуют о том, что безопасное газодинамическое состояние массива горных пород достигается путем создания зоны неснижаемого опережения, ширину которой рекомендуется определять в зависимости от физико-механических и структурных особенностей участка проходки горной выработки.

Ключевые слова
кимберлитовая трубка; подземная разработка; газодинамические явления; выбросы породы и газа; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; краевая часть выработки; трещиноватость горных пород; предел прочности на одноосное сжатие; модуль упругости

Поступила: 05.10.2025 ***Принята: 04.03.2026*** ***Онлайн: 02.04.2026*** ***Опубликована: 12.05.2026***

Введение

Современная тенденция к повсеместному осложнению горно-геологических условий приводит к увеличению геомеханических рисков и возникновению глобальных катастрофических явлений на горно-добывающих объектах, что отмечается в докладах представителей технического надзора, ученых отраслевых институтов и специалистов горно-добывающих предприятий [1-3]. Вместе с тем потребность в сырье продолжает расти, как и развитие высокопроизводительных технологий по его извлечению. С учетом обозначенной тенденции остается открытым вопрос обеспечения промышленной безопасности при освоении месторождений твердых полезных ископаемых.

Горно-добывающие компании обозначают потребность* в инновационных научно-исследовательских разработках [4, 5], в частности в исследованиях геомеханики, способных бороться с негативными реакциями массива пород на ведение горных работ и предотвращать непредсказуемый

* Тенденции развития – 2026. 10 ключевых факторов, оказывающих влияние на будущее горно-добывающего сектора. 89 с. URL: https://www.deloitte.com/content/dam/assets-shared/docs/industries/energy-resources-industrials/2026/tracking-the-trends-2026.pdf (дата обращения 01.03.2026).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

процесс разрушения горных пород [6-8]. Отраслевыми специалистами также отмечаются положительные результаты внедрения цифровых решений на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями [9-11]. Опыт применения современных аппаратурных комплексов показывает положительные результаты при прогнозе исходных данных о физико-механических свойствах массива горных пород [12-14].

Проходка горных выработок буровзрывным способом в прочных доломитах подземного рудника «Интернациональный» осложнена протеканием вторичных газодинамических явлений, представляющих собой выбросы породы и газа [15-17]. Наличие в трещинных зонах вмещающих пород газа в свободном состоянии и значительного горного давления породных толщ на глубине свыше 1000 м предопределили реализацию вторичного самопроизвольного разрушения пород из забоя вскрывающих выработок [18-20].

Аналогичным образом осложнялась газодинамическими явлениями проходка выработок буровзрывным способом в песчаниках при вскрытии запасов угля шахт Донбасса, начиная с глубины 750 м. Э.И.Ефремов, В.Н.Харитонов, И.А.Семенюк отмечали, что напряженность горных пород, обусловленная давлением вышележащей толщи, тектоническими нарушениями и давлением газа, является основным фактором выбросоопасности. Исходя из положения, что причинами выбросов являются высокие напряжения пород и их физико-механические свойства, основные пути их предотвращения были направлены на снижение действующих техногенных напряжений массива.

Разгрузка скальных горных пород в условиях угольных шахт и рудников проводится путем предварительной надработки [21-23], образованием разгрузочных щелей [24-26], передовым торпедированием [27-29], а также увлажнением пород поверхностно-активными веществами [30, 31].

Исходя из ведения горных работ по выбросоопасным песчаникам Донбасса и опытно-эксперементальных работ по выбросоопасным доломитам рудника «Интернациональный», делается общий вывод о низкой эффективности в условиях прочных скальных пород таких противовыбросовых мероприятий, как гидроувлажнение, бурение разгрузочных скважин, а также применение комбайнового способа проходки.

Передовое торпедирование отмечается Л.Л.Кауфманом и Б.А.Лысиковым как наиболее эффективный способ управления состоянием выбросоопасного массива горных пород, параметры которого при этом необходимо оперативно определять с учетом текущей горно-геологической обстановки. Актуальным на сегодняшний день остается и вопрос прогнозирования газодинамических явлений в скальных породах. Несмотря на многолетний мировой опыт борьбы с газодинамическими явлениями, ученым-горнякам пока не удалось разработать надежный и международно признанный метод прогноза газодинамических явлений (ГДЯ). Геологическая уникальность каждого месторождения (пластичный характер разрушения выбросоопасных калийных солей, упругий характер разрушения выбросоопасных песчаников и доломитов) требует индивидуального подхода к разработке прогностических мероприятий.

Наиболее популярные методы прогнозирования ГДЯ, апробированные при ведении горных работ в условиях выбросоопасных сланцев и песчаников на шахтах в ГДР, Польше, Чехословакии и Донбассе, базируются на бурении шпуров и скважин с измерением давления газа, количества газа, скорости газовыделения, количества буровой мелочи, дискования керна, продолжительности бурения одного метра шпура. Применяются также геофизический метод прогноза ГДЯ с замерами акустической эмиссии, лабораторные измерения скорости десорбции газа из породной мелочи.

На руднике «Интернациональный» в настоящее время применяются методы локального и текущего прогноза ГДЯ по литологическим данным (локальный прогноз) и по интенсивности газовыделения (текущий прогноз). Помимо утвержденных на предприятии методов прогноза ГДЯ также проходят апробацию геофизические методы текущего прогноза напряженности горных пород по данным естественной электромагнитной (прибор Angel-M) и акустической (прибор Prognoz-L) эмиссий.

Ввиду того, что газодинамические явления продолжают происходить и в условиях проведения профилактических мероприятий, актуален вопрос оценки напряженно-деформированного состояния забоя горной выработки при подходе к опасным по ГДЯ зонам и определения необходимой ширины зоны неснижаемого опережения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.1. Трещиноватость керна RQD скважины локального прогноза

Предлагаемый метод управления состоянием краевой части выработки

Интенсивная трещиноватость на глубинах свыше 1000 м сопровождается наличием свободного газа, находящегося под давлением от первых единиц до 10 МПа. Мощность зоны интенсивной трещиноватости определяется на стадии бурения скважин локального геологического прогноза и достигает 2-6 м (рис.1). При подходе к зонам интенсивной трещиноватости формируются различные геомеханические ситуации, которые необходимо численно учитывать.

В качестве основной меры обеспечения безопасного состояния выбросоопасных горных пород на предприятии применяется передовое скважинное торпедирование с созданием защитной зоны неснижаемого опережения, нормативно равной 1 м (рис.2).

Рассматривается 18 геомеханических ситуаций расположения забоя горной выработки на расстоянии 2, 4, 6 м до зон интенсивной трещиноватости мощностью 2, 4, 6 м с наличием в них газа и без газа.

Все расчетные схемы рассматриваются в объемной постановке на глубине 1500 м с вертикальными напряжениями, равными 40 МПа, что соответствует теории профессора А.Н.Динника, согласно которой вертикальные сжимающие напряжения соответствуют давлению вышележащих пород. Горизонтальные напряжения, в свою очередь, задаются на боковых гранях расчетных моделей через вынужденные перемещения из условия действия равнокомпонентного сжатия, что соответствует боковому распору, равному 1.

Параметры равнокомпонентного или близкого к равнокомпонентному поля напряжений на глубоких горизонтах кимберлитовой трубки «Интернациональная» подтверждаются как инструментальными измерениями, выполненными учеными Института горного дела СО РАН [32], так и мировым опытом ведения горных работ на глубинах, превышающих 1000 м [33-35].

В аппарате расчетной области выполняются уравнение равновесия, уравнение Коши и закон Гука:

$$\sigma_{ij,j} + pF_i = 0;$$

$$\varepsilon_{ij,j} = 0{,}5\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right);$$

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij},$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $pF_i = \gamma g\delta_{ij}$ – объемные силы; γ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; δ_{ij} – символ Кронекера; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций; u_i – компоненты вектора перемещений; $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ – относительная объемная деформация; G и λ – параметры Ламе,

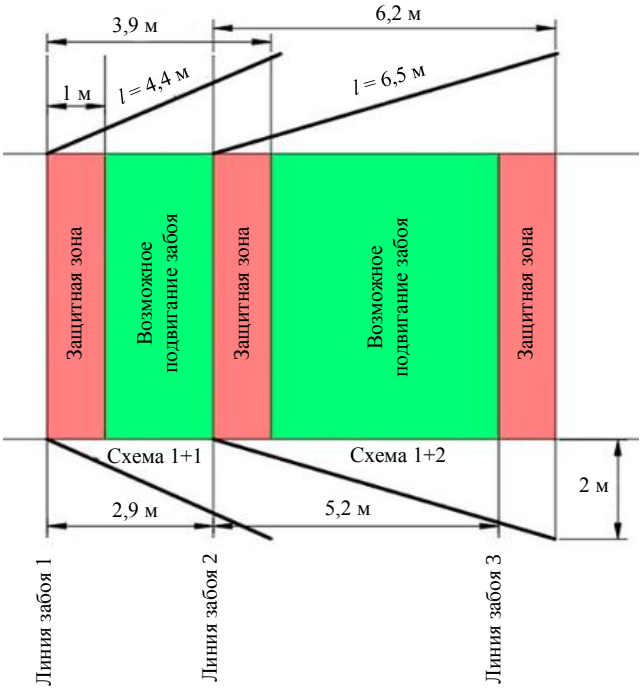


Рис.2. Принципиальная схема реализации передового торпедирования

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)};$$

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}.$$

В расчетные модели закладываются следующие физико-механические свойства пород: доломит ненарушенный (материал окружающего массива) – модуль упругости 50000 МПа, коэффициент Пуассона 0,25, плотность 2700 кг/м^3; доломит в зоне интенсивной трещиноватости – модуль упругости 10000 МПа, коэффициент Пуассона 0,35, плотность 2600 кг/м^3.

Снижение модуля упругости горных пород в зоне трещиноватости породного массива оценивается по формуле

$$E_{\text{Т}} = \frac{E_0}{1+0{,}5I_{\text{Т}}},$$

где E_0 – модуль упругости породы в монолитном состоянии (в образце), МПа; $I_{\text{Т}}$ – интенсивность трещиноватости, шт./м.

Для учета газового давления, максимально равного 10 МПа, в зонах интенсивной трещиноватости задается исходное напряженное состояние в трех нормальных компонентах тензора, равное 50 МПа.

Размер расчетной области удовлетворяет принципу Сен-Венана по удаленности границ модели на расстоянии, не влияющем на результат расчета в области рассматриваемого объекта. Согласно этому принципу, на расстояниях, превышающих характерный размер области приложения нагрузки, распределение напряжений и деформаций практически не зависит от конкретного способа приложения нагрузки. Аналогичным образом определены размеры расчетной сетки конечных элементов, при дальнейшем сгущении которой изменение значений в результатах расчета не происходит.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния

Моделирование напряженно-деформированного состояния выполнено методом конечных элементов в отечественном программном комплексе CAE Fidesys, получившем широкую апробацию при решении различного рода задач горной геомеханики [36-38]. На рис.3 изображен продольный разрез горной выработки с эпюрами максимальных сжимающих напряжений, иллюстрирующих адекватность заданных граничных условий.

На расстоянии 1 м от забоя горной выработки без задания зон интенсивной трещиноватости осредненное по трем точкам максимальное сжимающее напряжение составляет порядка 51 МПа.

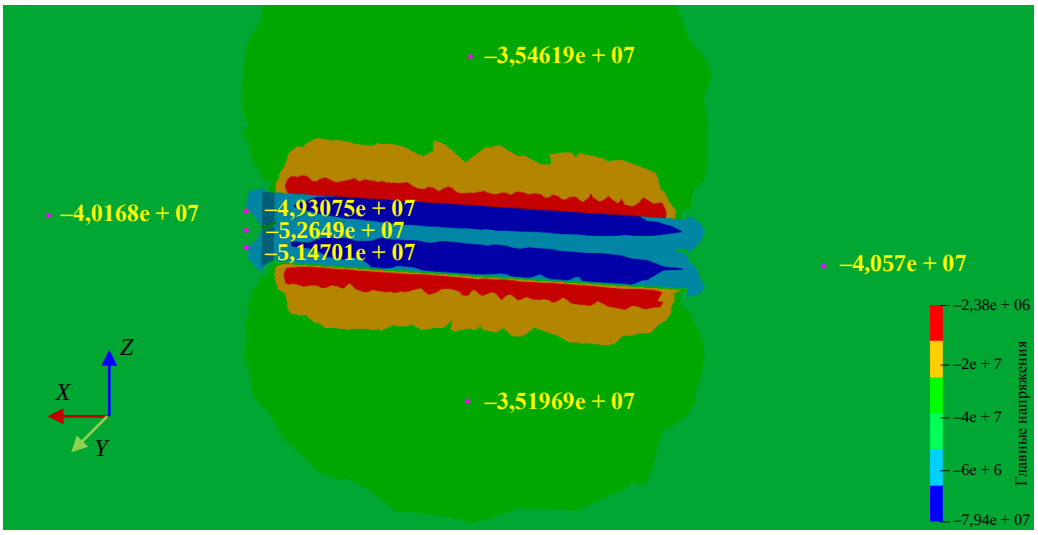


Рис.3. Продольный разрез горной выработки с эпюрами максимальных сжимающих напряжений

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

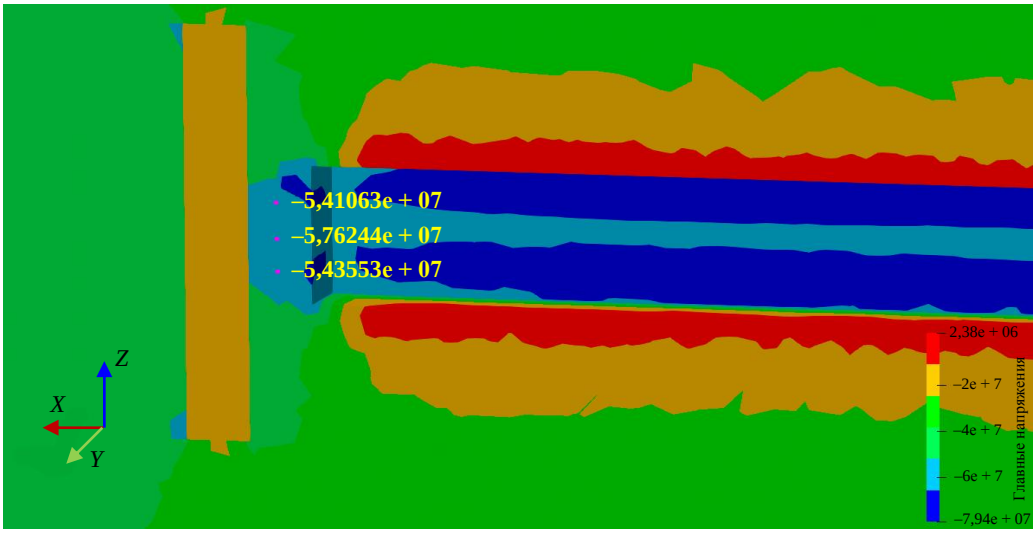


Рис.4. Продольный разрез горной выработки с эпюрами максимальных сжимающих напряжений при нахождении на расстоянии 2 м от забоя зоны интенсивной трещиноватости мощностью 2 м без газа (осредненное значение равно 55 МПа)

Дальнейшие расчеты оценки влияния зон интенсивной трещиноватости на НДС забоя проведены по тем же трем точкам.

На рис.4 и 5 изображены две из 18 рассматриваемых моделей зон интенсивной трещиноватости с учетом газового давления и без газа. В таблице представлены результаты расчетов всех рассматриваемых геомеханических ситуаций.

По результатам возможно выделить закономерности:

• концентрация сжимающих напряжений в призабойной зоне возрастает вне зависимости от фактора наличия газа в трещинах;

• трещинные зоны с газом оказывают большее влияние в сравнении с трещинными зонами без газа при нахождении на расстоянии 2 м от забоя горной выработки;

• на расстояниях от забоя зон интенсивной трещиноватости, равных 4 и 6 м, бóльшая пригрузка на призабойную зону возникает в случае отсутствия газа в трещинах.

Область применения результатов

Результаты численного моделирования следует использовать для обоснования безопасного значения ширины зоны неснижаемого опережения при проведении скважинного торпедирования.

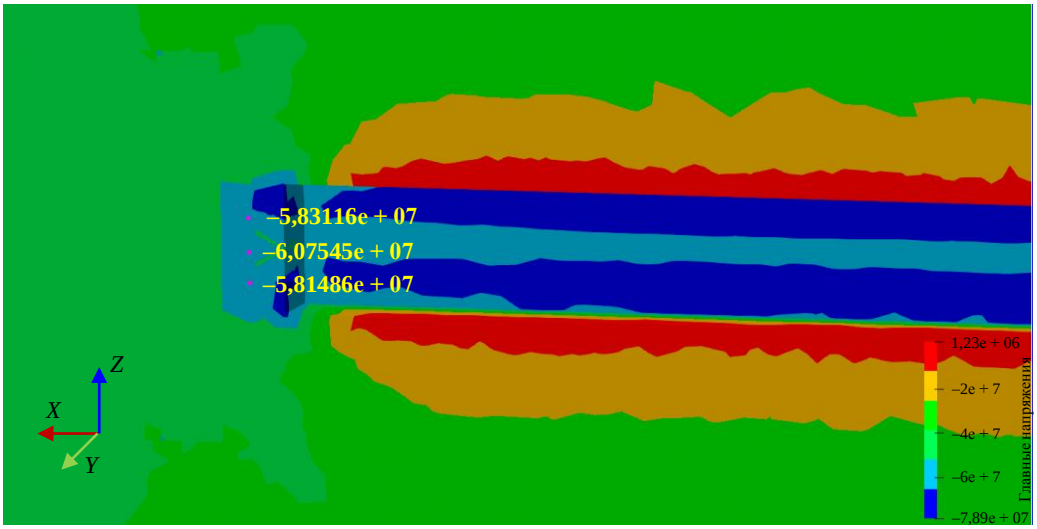


Рис.5. Продольный разрез горной выработки с эпюрами максимальных сжимающих напряжений при нахождении на расстоянии 2 м от забоя зоны интенсивной трещиноватости мощностью 2 м с газом (осредненное значение равно 59 МПа)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Результаты расчетов рассматриваемых моделей

Расстояние до забоя, м	Максимальные сжимающие напряжения, МПа (без газа в трещинах)	Максимальные сжимающие напряжения, МПа (с газом в трещинах)
Зона интенсивной трещиноватости мощностью 2 м		
2	55	59
4	53	54
6	52	52
Зона интенсивной трещиноватости мощностью 4 м		
2	58	63
4	56	54
6	54	52
Зона интенсивной трещиноватости мощностью 6 м		
2	58	63
4	57	54
6	55	51

Известно, что исследуемые доломитовые породы являются хрупкими и склонными к динамическому разрушению. Поэтому, в соответствии с действующими правилами безопасности, не допускается формирование зон сжимающих напряжений, которые превышают 80 % от предела прочности пород на одноосное сжатие.

Согласно результатам лабораторных испытаний, проведенных с 2022 по 2024 гг. в лабораториях Санкт-Петербургского горного университета, Института Гипроникель и ВНИМИ, усредненные прочности на одноосное сжатие склонных к хрупкому разрушению доломитовых пород рудника «Интернациональный» варьируются от 70 до 90 МПа. Таким образом, по отношению максимальных сжимающих напряжений к пределу прочности на одноосное сжатие произведено ранжирование безопасных и опасных расстояний от забоя горной выработки до зон интенсивной трещиноватости в зависимости от прочности пород (рис.6).

Представленный на рис.6 график позволяет сделать вывод, что в случае, когда участок массива сложен горными породами с прочностью около 70 МПа, зону неснижаемого опережения необходимо формировать шириной от 4 до 6 м в зависимости от мощности интенсивно трещиноватой зоны.

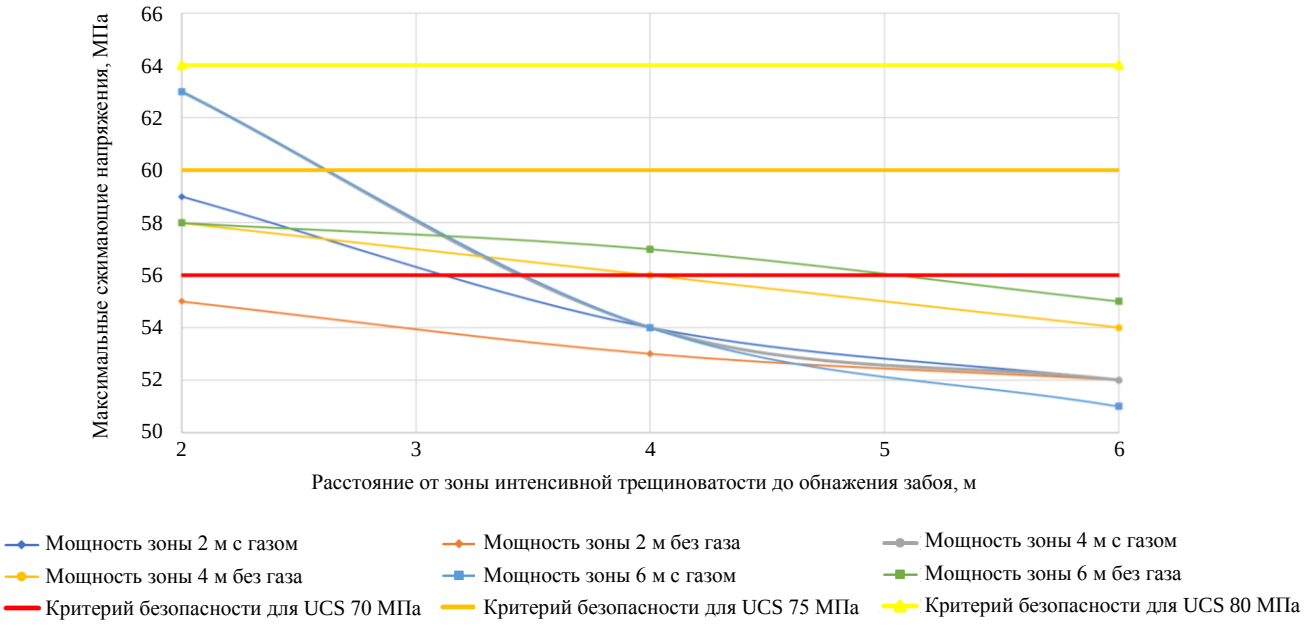


Рис.6. График изменения напряженно-деформированного состояния призабойной части горной выработки в различных геомеханических условиях

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

При прочности пород на одноосное сжатие, равное 75 МПа, необходимая ширина зоны неснижаемого опережения равна 4 м. В случае, когда участок массива сложен горными породами с прочностью 80 МПа и более, допустимо формирование зоны неснижаемого опережения шириной, нормативно равной 1 м.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что одним из ключевых факторов влияния на возникновение выбросоопасной ситуации на участке проходки горной выработки является преимущественно высокое напряженное состояние призабойной части массива горных пород, управление газодинамическим состоянием которой осуществляется путем создания зоны неснижаемого опережения. Ширину зоны рекомендуется определять в зависимости от физико-механических, структурных и литогенетических особенностей пересекаемых пород на участке проходки горной выработки.

Определение ширины зоны неснижаемого опережения предлагается проводить на основе графиков изменения напряженного состояния призабойной части горной выработки, базирующихся на результатах численных расчетов. Представленный подход к управлению газодинамическим состоянием горных пород при проходке горных выработок на глубоких горизонтах кимберлитовой трубки «Интернациональная» учитывает разнообразие геомеханических условий, что в перспективе можно использовать при актуализации действующего на предприятии комплекса мер по прогнозу и предотвращению выбросов породы и газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Оксман В.С., Трубецкой Н.К., Гражданкин А.И.* Анализ летальных несчастных случаев в горнорудной и нерудной промышленности России // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 3. С. 28-35. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-3-28-35

2. *Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К.* Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей // Записки Горного института. 2020. Т. 246. С. 601-609. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.1

3. *Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В., Косухин Н.И.* Управление фактором геодинамической безопасности для обеспечения устойчивого развития АО «СУБР» // Горный журнал. 2021. № 1. С. 81-85. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.14

4. *Лукичев С.В.* Цифровое прошлое, настоящее и будущее горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. 2021. № 4. С. 73-79. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-73-79

5. *Серебряков Е.В., Гладков А.С.* Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная» // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 512-525. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.4

6. *Головченко Ю.Ю., Лепехин И.С., Румянцев А.Е. и др.* Разработка численных геомеханических моделей с различной степенью детализации на примере шахты «Ангидрит» рудника «Кайерканский» // Горная промышленность. 2023. № 4. С. 79-88. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-79-88

7. *Ильясов Б.Т., Кульсаитов Р.В., Неугомонов С.С., Солуянов Н.О.* Оценка устойчивости закрепленной выработки на основе численного моделирования методом конечно-дискретных элементов // Горный журнал. 2023. № 1. С. 118-123. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20

8. *Багаутдинов И.И., Беляков Н.А., Севрюков В.В., Рассказов М.И.* Применение модели упрочняющегося грунта для прогноза зоны пластических деформаций массива слабоустойчивых пород Яковлевского железорудного месторождения // Горный журнал. 2022. № 12. С. 16-21. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03

9. *Trushko V.L., Baeva E.K., Blinov A.A.* Experimental Investigation on the Mechanical Properties of the Frozen Rocks at the Yamal Peninsula, Russian Arctic // Eng. 2025. Vol. 6. Iss. 4. № 76. DOI: 10.3390/eng6040076

10. *Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Петров Д.Н.* Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 2. С. 349-364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364

11. *Трофимов А.В., Киркин А.П., Румянцев А.Е., Колганов А.В.* Использование данных акустического сканирования стенок глубоких скважин для воссоздания действующего режима напряжений на полиметаллическом месторождении интрузивного генезиса // Горный журнал. 2024. № 1. С. 68-74. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.11

12. *Семенова И.Э., Константинов К.Н., Кулькова М.С.* Оценка напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности подземных выработок глубокого заложения комплексом инструментальных и численных методов // Горный журнал. 2024. № 1. С. 22-28. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.04

13. *Марысюк В.П., Трофимов А.В., Киркин А.П., Шутов А.А.* Определение напряженно-деформированного состояния массива на участке скипового ствола СС-1 рудника «Октябрьский» методом полной разгрузки керна // Горный журнал. 2024. № 3. С. 34-40. DOI: 10.17580/gzh.2024.03.04

14. *Афанасьев П.И., Белов А.А.* Оценка сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам взрыва // Горная промышленность. 2025. № 3. С. 138-145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-3-138-145

15. *Андрейко С.С.* Газодинамические явления при проходке подготовительных выработок во вмещающих породах на руднике «Интернациональный» АК «Алроса» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. Пермь: Горный институт УрО РАН; 2016. Вып. 14. С. 304-307.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

16. *Зыков В.С., Иванов В.В., Пуль Э.К., Вьюников А.А.* Оценка газодинамических и фильтрационных характеристик вмещающих пород рудника «Интернациональный» компании «АЛРОСА» // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. Вып. 3. С. 26-33. DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.76.95.003

17. *Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Вьюников А.А.* Газодинамические явления при проходке выработок во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 96-102. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102

18. *Вьюнников А.А., Хоютанова Н.В., Романевич К.В. и др.* Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный» // Горная промышленность. 2024. № 3S. С. 26-31. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31

19. *Вьюников А.А., Ворожцов С.Г., Пуль Э.К., Ковешников П.Ю.* Способы профилактики внезапных выбросов породы и газа при ведении горных работ на сверхглубоких горизонтах подземного рудника «Интернациональный» // Горный журнал. 2023. № 1. С. 133-138. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.22

20. *Пуль Э.К., Захаров Н.Е., Лосовская Ю.В., Иванов П.С.* Разработка и опытно-промышленная апробация мероприятий по предотвращению негативных последствий газодинамических явлений на месторождении трубки «Интернациональная» // Горный журнал. 2020. № 1. С. 104-108. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.21

21. *Петухов И.М.* Горные удары на угольных шахтах. М.: Недра, 1972. 229 с.

22. *Зубов В.П., Ли Юньпэн.* Слоевая система разработки мощных пологих угольных пластов на шахтах Китая: проблемные вопросы, направления совершенствования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 7. С. 37-51. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_37

23. *Забурдяев В.С.* Технологические решения по снижению метановой опасности в угольных шахтах. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 208 с.

24. *Малеев Н.В., Мхатвари Т.Я., Эренбург В.И.* Способ предотвращения внезапных выбросов песчаников и газа для эффективного и безопасного проведения горных выработок // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, 20-23 сентября 2021, Севастополь, Россия. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2021. С. 423-427.

25. *Герасименко В.Е.* Предупреждение газодинамических явлений при проведении горных выработок // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. 2018. № 3 (42). С. 77-84.

26. *Ловчиков А.В., Земцовский А.В.* Профилактика горных ударов в низких рудных целиках посредством образования разгрузочных щелей (для условий Ловозерского редкометалльного месторождения) // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. № 1. С. 158-166. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-158-166

27. *Андрейко С.С.* Предотвращение выбросов породы и газа при проходке подготовительных выработок в доломитовых породах на больших глубинах // Горное эхо. 2020. № 2 (79). С. 83-91. DOI: 10.7242/echo.2020.2.17

28. *Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Романевич К.В.* Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа натурных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 65-72. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-2-65-72

29. *Нестеров Е.А.* Результаты опытно-промышленных испытаний проходки подготовительных выработок в выбросоопасных доломитовых породах // Горное эхо. 2020. № 2 (79). С. 114-118. DOI: 10.7242/echo.2020.2.22

30. *Латышев О.Г., Казак О.О., Сынбулатов В.В.* Исследование реологических характеристик горных пород в условиях воздействия на массив поверхностно-активными веществами // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 3. С. 39-47. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-3-39-47

31. *Латышев О.Г., Казак О.О.* Использование поверхностно-активных веществ в процессах бурения горных пород // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1. № 2. С. 29-37.

32. *Иудин М.М.* Естественное напряженное состояние массива горных пород кимберлитовых месторождений // Вестник Якутского государственного университета. 2009. Т. 6. № 2. С. 25-31.

33. *Zhang Ning, Lan Hengxing, Li Langping et al.* Characteristics and implications of in-situ stresses in Southeastern Tibetan Plateau // Journal of Engineering Geology. 2022. Vol. 30. Iss. 3. P. 696-707. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2022-0112

34. *Peng Li, Qi-feng Guo, Mei-feng Cai, Sheng-jun Miao.* Present-day state of tectonic stress and tectonization in coastal gold mine area near Laizhou Gulf, North China // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2023. Vol. 33. Iss. 3. P. 865-888. DOI: 10.1016/S1003-6326(23)66152-7

35. *Peng Li, Yan Liu, Meifeng Cai et al.* Contemporary stress state in the Zhao–Ping metallogenic belt, eastern China, and its correlation to regional geological tectonics // International Journal of Coal Science & Technology. 2025. Vol. 12. № 29. DOI: 10.1007/s40789-025-00769-2

36. *Беляков Н.А., Емельянов И.А.* Учет трещиноватости породного массива при определении его естественного напряженного состояния методом кольцевой разгрузки с применением многокомпонентного датчика смещений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12-1. С. 145-164. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_145

37. *Головченко Ю.Ю., Румянцев А.Е., Лалин В.В., Соннов М.А.* Моделирование тектонических нарушений с применением связей конечной жесткости с интеграцией в CAE Fidesys // Горная промышленность. 2025. № 4. С. 78-84. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-78-84

38. *Соннов М.А., Румянцев А.Е., Трофимов А.В., Вильчинский В.Б.* Численное моделирование изменения напряженно-деформированного в процессе отработки месторождения в программном комплексе CAE Fidesys с использованием функции пошагового расчета // Горная промышленность. 2020. № 2. С. 110-114. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-110-114

***Авторы*: Семен Григорьевич Гендлер,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-7721-7246*, **Никита Евгеньевич Мороз,** *аспирант* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), *moroz.nikita.1998@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4401-1989.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0