

**Научная статья****УДК 622.2****DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-84-93**

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ С АРОЧНОЙ КРЕПЬЮ И ТАМПОНАЖЕМ ЗАКРЕПНОГО ПРОСТРАНСТВА

Лисковец Александр Сергеевич<sup>1</sup>, Тациенко Виктор Прокопьевич<sup>2</sup>,  
Ермакова Инна Алексеевна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Инжиниринговая компания SGP<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

\* для корреспонденции: eia.pm@kuzstu.ru

**Информация о статье****Поступила:**

14 мая 2025 г.

**Одобрена после  
рецензирования:**

15 ноября 2025 г.

**Принята к публикации:**  
02 декабря 2025 г.**Опубликована:**  
22 декабря 2025 г.**Ключевые слова:**

арочная крепь, тампонажный слой, давление на крепь, метод конечных элементов

**Аннотация.**

При использовании арочной металлической рамной крепи возникает необходимость установки рамных ограждений. Одним из перспективных способов заполнения пустот за рамной (арочной) крепью и создания межрамного ограждения, а также обеспечения полного контакта крепи с массивом горных пород является тампонаж закрепленного пространства. Существующие методики аналитических расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) горных выработок рассматривают упрощенные постановки задач: выработки имеют круговую или эллиптическую форму, массив горных пород представлен однородной и изотропной средой. Для полного учета горнотехнических и горно-геологических условий проведения выработки, а также наличия тампонажного слоя предлагается использовать метод конечных элементов. В работе исследовано НДС подготовительной выработки, закрепленной арочной крепью с тампонажем закрепленного пространства. Расчетная область в плоском поперечном сечении выработки включает в себя угольный пласт, породные слои, выработку с арочной крепью и тампонажным слоем. Обоснованы граничные условия и условия нагружения расчетной области. Выбрана сетка конечных элементов и их число, позволяющее рассчитывать напряженное состояние пород, крепи и тампонажного слоя с погрешностью менее 1%. Оценка прочности породных слоев, угольного пласта, тампонажного слоя и крепи проведена по критерию Мора, на основе которого выделены зоны разупрочнения. Полученные результаты позволяют установить нагрузку на крепь для проведения ее полного расчета, а также определить необходимую прочность на одноосное сжатие тампонажного слоя для сохранения его прочности.

**Для цитирования:** Лисковец А.С., Тациенко В.П., Ермакова И.А. Применение метода конечных элементов для расчета подготовительной выработки с арочной крепью и тампонажем закрепленного пространства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 84-93. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-84-93, EDN: HUZVAX

**Введение**

Металлические рамные арочные крепи являются универсальным средством крепления горных выработок, чаще всего в условиях, когда расчетные смещения вмещающих пород превосходят допустимые для различных видов анкерной крепи (300 мм и более), а также при проведении капитальных горных выработок с

длительным сроком службы. При этом для повышения устойчивости, надежности и снижения стоимости поддержания горных выработок, а также с целью повышения безопасности работ рамная крепь может быть усиlena анкерной крепью. В угольной промышленности до настоящего времени основным видом крепи капитальных горных

выработок является арочная металлическая рамная с железобетонной затяжкой.

Одним из перспективных способов заполнения пустот за рамной (арочной) крепью и создания межрамного ограждения, а также обеспечения полного контакта крепи с массивом горных пород является тампонаж закрепленного пространства.

Существующие технологии тампонажа закрепленного пространства требуют существенных дополнительных затрат, не позволяют полностью заполнить пустоты, своевременно отводить излишнюю воду из тампонажного раствора, что в конечном итоге негативно сказывается на прочности тампонажного камня. В работе [1] предложена новая технология тампонажа закрепленного пространства горных выработок с применением фильтрующего армированного полотна в качестве межрамного ограждения. Результаты опытно промышленных испытаний в условиях шахты «Анжерская-Южная» данной технологии крепления выработки показали ее работоспособность, что, в частности, подтверждается видом закрепленного участка выработки, приведенного на Рис. 1.

Для установления необходимой прочности тампонажного камня, позволяющей сохранить прочностное и устойчивое состояние крепи в различных горно-геологических и горнотехнических условиях проведения выработки, необходимо выполнить исследования взаимодействия крепи и тампонажного слоя с массивом горных пород.

Теоретические методы расчета НДС массива горных пород и крепи при проведении

подготовительной выработки можно разделить аналитические и численные. Аналитические методы геомеханики прежде всего использовались для исследования НДС массива горных пород в случае незакрепленной выработки. Получены решения для крутовой, эллиптической и полигональной выработки в гидростатическом и негидростатическом поле начальных напряжений. Массив горных пород рассматривался как упругая, упруго-пластическая среда, учитывалось также запредельное состояние горных пород. Аналитические методы исследования также были использованы для решения задач взаимодействия бетонных и рамных крепей с массивом горных пород. Массив горных пород рассматривался как упругая или упруго-пластическая среда. Это прежде всего результаты, полученные в работах [2-5]. Здесь следует отметить, что при упругом поведении горных пород наибольшая концентрация напряжений сосредоточена на границе выработки, а зона влияния выработки распространяется в массив горных пород на расстояние 3-5 размеров поперечного сечения выработки. Учет пластичности горных пород приводит к появлению пластической зоны в окрестности выработки и удалению максимальных напряжений вглубь массива горных пород. Важное значение имеют работы [6-8], в которых впервые рассматривалось запредельное состояние горных пород при проведении подготовительной выработки. Учет запредельного состояния горных пород позволил оценить устойчивость выработки в различных



*Рис. 1. Вид участка выработки с арочной крепью и тампонажем закрепленного пространства с применением фильтрующего армированного полотна на шахте «Анжерская-Южная»  
Fig. 1. View of a section of the workings with arch support and plugging of the support space using a filter reinforced fabric at the Anzherskaya-Yuzhnaya mine*

условиях. Аналитическая оценка влияния тампонажа закрепного пространства на напряженно-деформированное состояние массива горных пород выполнена в работе [9]. Однако давление на крепь заранее задавалось как рабочее сопротивление крепи, которое заранее неизвестно. В работе [10] приведена математическая модель взаимодействия монолитных обделок двух близко расположенных параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых в общей зоне укрепленного грунта, имеющей круговое очертание, и окружающего их массива. Модель служит основой для разрабатываемого аналитического метода расчета обделок тоннелей. В общем случае решение этой задачи с учетом взаимодействия крепи с массивом линейно-деформируемых горных пород приведено в [3].

Дальнейшее развитие задача расчета геомеханического состояния крепи и массива горных пород получила в работах [11, 12], авторы которых учили важное обстоятельство – разупрочнение пород при переходе в запредельное состояние. Аналитический подход позволяет получить более общие закономерности геомеханического состояния крепи и массива горных пород. Наиболее полный анализ применения аналитических методов расчета НДС массива горных пород с подготовительной выработкой выполнен в работе [13]. Однако при учете структуры массива горных пород, произвольной формы крепи и других технологических факторов [14-16] получить

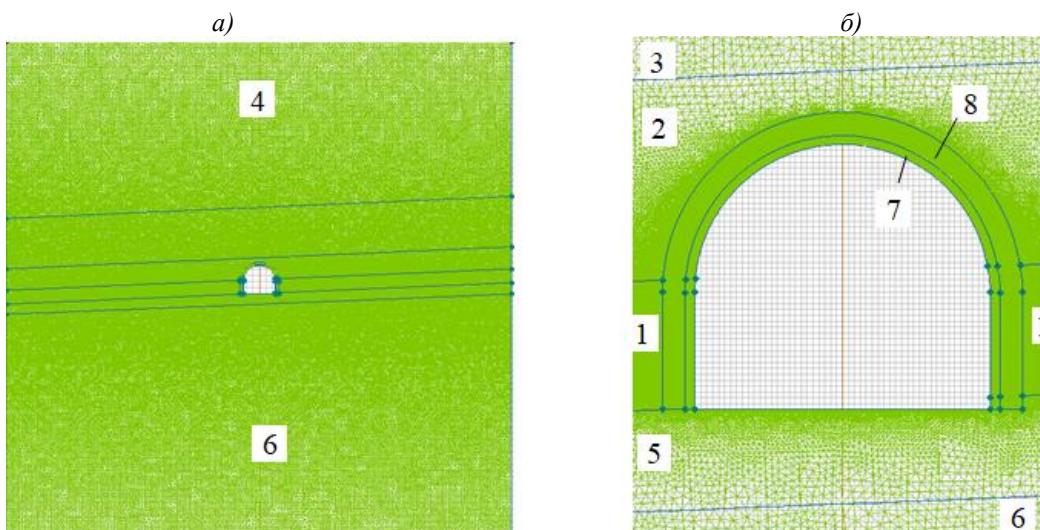
решение рассматриваемой задачи в аналитической форме не представляется возможным.

В более сложных случаях постановки задач, не поддающихся аналитическим расчетам, применялись численные методы геомеханики, в первую очередь метод конечных элементов [17-20]. Метод конечных элементов позволяет учитывать неоднородность массива горных пород, включая слоистость, складчатость и разрывные нарушения. Другим преимуществом метода конечных элементов является учет технологических факторов, таких как форма выработки, вид крепи, вид забутовки закрепного пространства. Применение метода конечных элементов нашло применение для учета влияния выработанного пространства [21], для прогноза пучения почвы [22], для оценки системы анкерного крепления [23] на геомеханическое состояние подготовительной выработки. Вопрос влияния тампонажа закрепного пространства на НДС массива горных пород с подготовительной выработкой методом конечных элементов не исследовался.

В данной работе рассматривается задача численной оценки геомеханического состояния подготовительных выработок, закрепленных арочной крепью с тампонажем закрепного пространства, с учетом структуры массива горных пород методом конечных элементов.

#### **Методика проведения исследования**

Рассматривается следующая постановка задачи численной оценки геомеханического состояния подготовительной выработки. В



*Rис. 2. Блоки расчетной области с сеткой конечных элементов:*

*a) общий вид; б) окрестность выработки: 1 – угольный пласт, 2 – непосредственная кровля, 3 – основная кровля, 4 – кровля, 5 – непосредственная почва, 6 – почва, 7 – арочная крепь, 8 – тампонажный слой*

*Fig. 2. Blocks of the computational domain with a finite element mesh:*

*a) general view; b) workings vicinity: 1 – coal seam, 2 – immediate roof, 3 – main roof, 4 – roof, 5 – immediate soil, 6 – soil, 7 – arch support, 8 – plugging layer*

плоском поперечном сечении массива горных пород с подготовительной выработкой выделена расчетная область (Рис. 2а). Выработка имеет ширину 6 м и высоту 5 м (Рис. 2б). Границы области удалены от выработки на расстояние, превышающее пятикратный размер выработки, что позволяет рассматривать всю область влияния выработки. В массиве горных пород, вмещающих выработку, выделены основные, наиболее типичные структурные наклонные слои пород: угольный пласт 1, непосредственная кровля 2, основная кровля 3, кровля 4, непосредственная почва 5 и почва 6. Выработка закреплена арочной крепью 7 с профилем СВП-27. В закрепленном пространстве имеется тампонажный слой 8.

Трехзвенная арочная крепь заменяется сплошной арочной крепью без замков с приведенной высотой профиля крепи и с приведенным модулем деформации крепи так же, как это сделано в работе [3]. Приведенная высота крепи определялась из равенства моментов инерции профиля крепи и прямоугольного профиля. Приведенный модуль деформаций крепи определялся из условия равенства смещений верхняка крепи.

Приведенная высота профиля крепи  $h_k$  вычислялась по формуле:

$$h_k = \sqrt{\frac{12J}{A}},$$

где  $J$  – момент инерции поперечного сечения профиля рамы;  $A$  – площадь сечения профиля рамы.

Приведенный модуль деформаций крепи вычислялся как

$$E_k = E \frac{A}{h_k a},$$

где  $E$  – модуль деформаций стали крепи марки ст. 5,  $a$  – шаг установки рам.

В выполненных расчетах приведенная высота профиля крепи СВП-27 составила 0,15 м, приведенный модуль деформаций крепи равен  $4 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

Границные условия были заданы следующим

Таблица. Физико-механические характеристики блоков расчетной области

Table. Physical and mechanical characteristics of the blocks from the computational domain

Блоки расчетной области	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль деформаций, МПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа
Крепь	7800	$4 \cdot 10^3$	0,22	200
Тампонажный слой	1600	$10^3$	0,28	10
Непосредственная кровля, аргиллит	2500	$10^4$	0,25	30
Основная кровля, алевролит	2500	$2 \cdot 10^4$	0,25	50
Кровля, песчаник	2500	$4 \cdot 10^4$	0,2	50
Пласт, уголь	1300	$10^3$	0,25	10
Непосредственная почва, аргиллит	2500	$10^4$	0,25	30
Почва, песчаник	2500	$4 \cdot 10^4$	0,2	50

образом: нормальные перемещения и касательные напряжения на боковых границах и нижней границе равны нулю. На верхней границе задано нормальное напряжение, соответствующее глубине проведения выработки, и нулевое касательное напряжение. Все блоки расчетной области нагружены объемными силами в соответствии с плотностью слагающих пород и материала тампонажной смеси и крепи.

Расчеты проводились численным методом конечных элементов по лицензионной программе «ELCUT». Сетка конечных элементов показана на Рис. 3. Общее число узлов сетки конечных элементов составляло порядка  $5 \cdot 10^5$ , так что на 1 м<sup>2</sup> приходилось в среднем 60 узлов сетки. В тампонажном слое и крепи шаг дискретизации составлял 0,01 м. При удвоении числа конечных элементов погрешность вычисления напряжений не превышала 1%.

Физико-механические характеристики блоков расчетной области приведены в таблице. Значения физико-механических характеристик этих пород взяты по [24, 25].

Основными породами, слагающими непосредственную кровлю и непосредственную почву, являются аргиллиты, основную кровлю – алевролиты, а кровлю и почву – песчаники.

#### Результаты исследования

На Рис. 3а) показано распределение вертикальных напряжений в окрестности выработки. Вертикальные сжимающие напряжения нетронутого горного массива на уровне почвы выработки определялись весом налегающих пород и составили 11 МПа при глубине проведения выработки 440 м. При расчете сжимающие напряжения имеют отрицательные значения. Поэтому на рисунке выделена зона (фиолетовый цвет), где рассчитанные напряжения превышают (по модулю) начальные. Наибольшие сжимающие напряжения наблюдаются в боках выработки. Зона наибольших сжимающих напряжений

может определять область разупрочнения угольного пласта.

Красным цветом показана зона, где наблюдаются растягивающие (положительные) вертикальные напряжения. Наибольшие растягивающие напряжения наблюдаются в центральной части почвы и кровли выработки. В этой зоне может наблюдаться разупрочнение пород кровли выработки и пучение почвы.

На Рис. 3б) показано распределение горизонтальных напряжений в окрестности выработки. Начальные сжимающие горизонтальные напряжения нетронутого горного массива на уровне почвы выработки определялись величиной бокового распора на глубине 640 м и составили 3,7 МПа. Красным цветом показана зона, где наблюдаются растягивающие (положительные) напряжения. Наибольшие растягивающие горизонтальные напряжения наблюдаются в центральной части почвы выработки.

Следует обратить внимание, что в почве выработки наблюдаются растягивающие

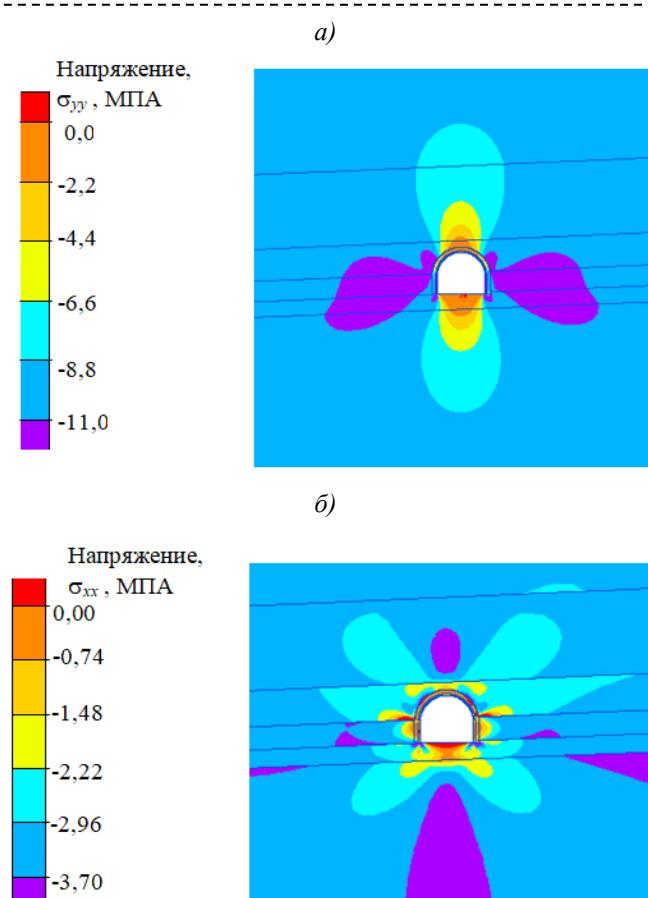


Рис. 3. Распределение вертикальных (а), горизонтальных (б) напряжений в окрестности подготовительной выработки

Fig. 3. Distribution of vertical (a), horizontal (b) stresses in the vicinity of the development workings

горизонтальные и вертикальные напряжения, что делает эту зону наиболее проблемной с точки зрения горного давления.

Для определения прочностного состояния горных пород, тампонажного слоя и крепи использовался критерий Мора в форме главных напряжений [26]:

$$\sigma_{Mo} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{ск}} > \sigma_p, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – наибольшее и наименьшее значения главных напряжений;  $\sigma_{ск}$ ,  $\sigma_p$  – пределы прочности на одноосное сжатие и одноосное растяжение для горных пород, угля, тампонажного камня или материала крепи.

Расчетное значение  $\sigma_{Mo}$  сравнивалось с пределом прочности на одноосное растяжение каждого блока расчетной области (горные породы, тампонажный слой, угольный пласт, крепь). В случае выполнения условия (3) в рассматриваемом блоке выделялась зона разупрочнения.

Отношение пределов прочности на одноосное сжатие к пределу прочности на одноосное растяжение, входящее в (1) для горных пород и тампонажного слоя в соответствии с [24, 25] принималось 1:10, а для стали крепи марки Ст. 5 принималось 1:1.

На Рис. 4 показано распределение значений критерия Мора в окрестности выработки. Для горных пород с пределом прочности на одноосное сжатие 10 МПа и 30 МПа критическое значение критерия Мора составляет соответственно 1 МПа (а) и 3 МПа (б). На этом рисунке фиолетовым цветом отмечена область массива горных пород, в которой значения критерия Мора отрицательны и порода не теряет свою прочность. Красным цветом показаны области горных пород и тампонажного слоя с прочностью на одноосное сжатие 10 МПа и 30 МПа, в которых происходит разупрочнение пород и тампонажного слоя. Как следует из Рис. 4а, при прочности пород и тампонажного слоя 10 МПа области разупрочнения пород находятся в почве выработки, а зона разупрочнения тампонажного слоя возникает в бортах выработки. При прочности горных пород и тампонажного слоя на одноосное сжатие 30 МПа области разупрочнения отсутствуют (Рис. 4б).

В крепи наблюдаются значения критерия Мора более 1 МПа (Рис. 4а) и более 3 МПа (Рис. 4б), но окраска крепи в красный цвет на этих рисунках не означает ее разрушение.

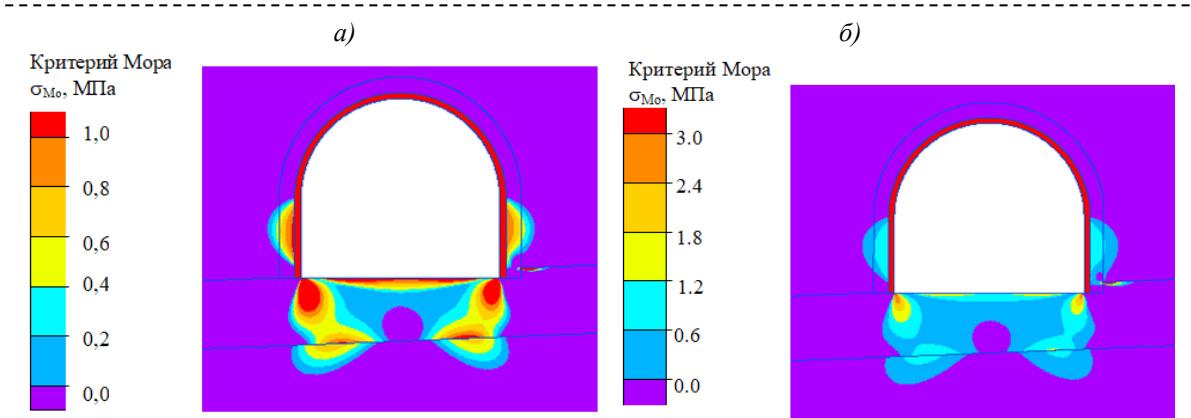


Рис. 4. Распределение значений критерия Мора для горных пород с пределом прочности на одноосное сжатие 10 МПа (а) и 30 МПа (б)

Fig. 4. Distribution of Mohr's criterion values for rocks with a uniaxial compressive strength of 10 MPa (a) and 30 MPa (b)

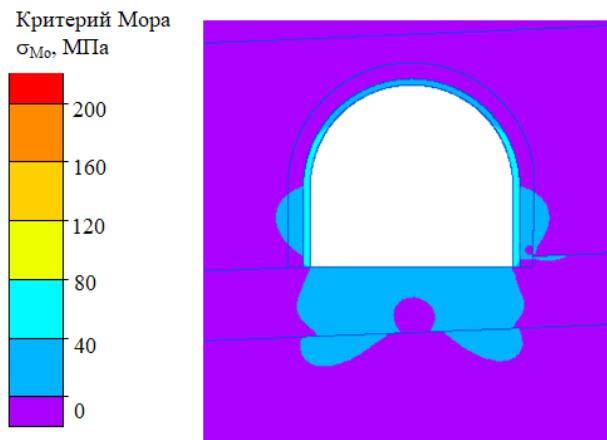


Рис. 5. Распределение значений критерия Мора в крепи выработки с пределом прочности на одноосное сжатие 200 МПа

Fig. 5. Distribution of Mohr criterion values in the support of a working with a uniaxial compression strength of 200 MPa

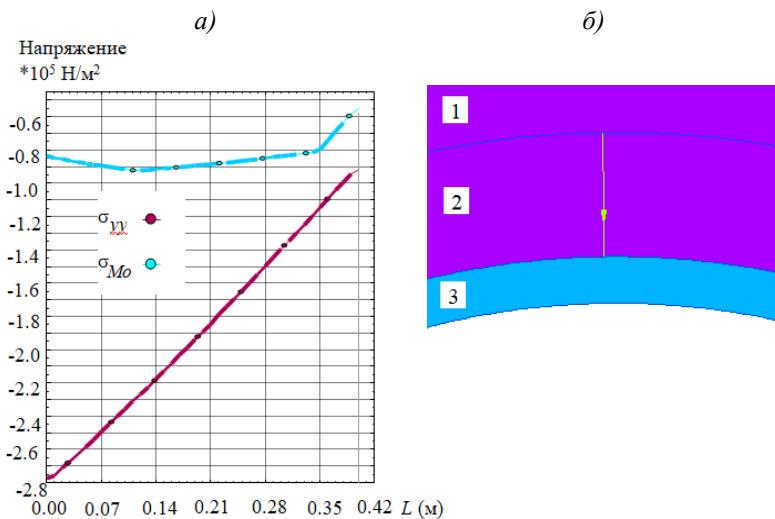
Разрушение крепи по критерию Мора происходит при превышении предела прочности на одноосное сжатие 200 МПа (см. таблицу). При этом учитываем, что предел прочности на одноосное растяжение также равен 200 МПа. Поэтому для оценки прочности крепи было задано критическое значение критерия Мора, равное 200 МПа (Рис. 5). Так как в крепи наблюдаются значения критерия Мора, не превышающие 80 МПа, то ее прочность сохраняется.

На рис. 6а показано изменение вертикальных напряжений  $\sigma_{yy}$  и значений критерия Мора  $\sigma_{Mo}$  в центральном вертикальном сечении тампонажного слоя, начиная от непосредственной кровли 1 через тампонажный слой 2 до крепи 3 (Рис. 6б).

Из Рис. 6а видно, что нагрузка на тампонажный слой, определяемая вертикальными напряжениями со стороны кровли, в рассматриваемом случае составляет 0,28 МПа. Нагрузка на крепь, определяемая

вертикальными напряжениями на границе тампонажного слоя с крепью, равна 0,09 МПа. Установленное значение вертикальной нагрузки на крепь позволяет выполнить полный расчет крепи [6].

Тампонажный слой сохраняет свою прочность, так как значения критерия Мора имеют отрицательные значения. Важно отметить, что в других горнотехнических и горно-геологических условиях с увеличением глубины разработки, наличием надработки и смежного выработанного пространства и т. п. могут наблюдаться положительные значения критерия Мора, что может привести к разрушению тампонажного слоя. В таком случае представленный расчет позволит найти наибольшее значение критерия Мора, которое будет определять необходимую прочность тампонажного слоя на одноосное сжатие. По этому значению критерия Мора (прочности тампонажного слоя на одноосное сжатие) можно



*Рис. 6. Изменение вертикальных напряжений  $\sigma_{yy}$  и значений критерия Мора  $\sigma_{Mo}$  по ширине тампонажного слоя (а) в его центральном вертикальном сечении (б)*

*Fig. 6. Change in vertical stresses  $\sigma_{yy}$  and values of Mohr's criterion  $\sigma_{Mo}$  across the width of the cement layer (a) in its central vertical section (b)*

задавать состав тампонажного слоя заданной прочности.

#### **Выводы**

Предлагаемая постановка задачи численного моделирования геомеханического состояния подготовительных и капитальных выработок учитывает основные структурные особенности массива горных пород, форму и размеры выработок, тип арочной крепи, геометрические, деформационные и прочностные характеристики тампонажного слоя.

Расчет вертикальных и горизонтальных напряжений, а также значений критерия Мора позволяет выделить в массиве горных пород и в тампонажном слое зоны повышенных сжимающих и зоны растягивающих напряжений, в которых происходит разупрочнение рассматриваемых блоков.

Значение вертикального напряжения на контакте тампонажного слоя с крепью определяет нагрузку на крепь, по которой проводится полный расчет арочной крепи.

По значению критерия Мора в тампонажном слое устанавливается его минимальная прочность на одноосное сжатие, при которой исключается разупрочнение. Это позволяет подбирать оптимальный состав тампонажного слоя для различных горно-геологических и горнотехнических условий проведения подготовительных горных выработок.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Лисковец А. С., Тациенко В. П., Мешков А. А. Направления развития и совершенствования тампонажной крепи // Горная промышленность. 2020. № 2. С. 88–93. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-88-93. EDN XEOMCF.

2. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. М. : Студент, 2012. –543 с.

3. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений: учебник для вузов. М. : Недра, 1994. 382 с.

4. Либерман Ю. М. Давление на крепь капитальных выработок. М. : Наука, 1969. 119 с.

5. Расчет крепи и охранных целиков подготовительных выработок. М. : Недра, 1995. 126 с.

6. Линьков А.М. Учет запредельных деформаций в плоской задаче о круглой выработке // ФТПРПИ. 1977. № 5. С. 16–22.

7. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Оценка устойчивости горных выработок // Шахтное строительство. 1978. № 2. С. 13–16.

8. Глушко Б. Г., Виноградов В. В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. М. : Недра, 1982. 192 с.

9. Клыков А. Е. Дилатансия горных пород и смещения в выработке в зависимости от состояния закрепленного пространства // Форум гірників – 2013: матеріали міжнар. конф., 2-5 жовтня 2013 р. Дніпропетровськ, 2013. Т. 2. С. 264–271.

10. Анциферов С. В., Фотиева Н. Н., Булычев Н. С., Грибанов В. Б. О расчете обделок тоннелей, сооруженных в массиве грунта, подверженного предварительному укреплению // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. №3. С. 98–107.

11. Тациенко В. П., Гоголин В. А., Ермакова И. А., Лесин Ю. В., Лисковец А. С. Постановка задачи расчета крепи с тампонажем закрепленного пространства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 3. С. 68–74.

12. Тациенко В. П., Гоголин В. А., Ермакова И. А., Лесин Ю. В., Лисковец А. С.

- Постановка Расчет крепи с учетом тампонажа закрепного пространства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 3. С. 75–81.
13. Лисковец А. С., Тациенко В. П. Анализ способов крепления тампонажа закрепного пространства горных выработок и методов расчета взаимодействия крепи с массивом горных пород // Техника и технология горного дела. 2021. № 1 (12). С. 27–52.
  14. Шумпф Г. Г., Егоров П. В., Петров А. И., Красильников Б. В. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт. М. : Недра, 1996. 353 с.
  15. Игнатов Е. В., Тюленев М. А. Геомеханическое обоснование геометрических и технологических параметров системы разработки «длинными полосами с короткими забоями» // Техника и технология горного дела. 2023. № 2. С. 59–87.
  16. Якоби О. Практика управления горным давлением М. : Недра, 1987. 566 с.
  17. Амусин Б. З., Фадеев А. Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. М. : Недра, 1975. 269 с.
  18. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.
  19. Hutton D. V. Fundamentals of Finite Element Analysis 1st ed. New York : McGraw Hill, 2003. 640 p.
  20. Moaveni S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. 4th ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2015. 936 p.
  21. Гоголин В. А., Ермакова И. А. Выбор местоположения подготовительной выработки относительно выработанного пространства с учетом геомеханических факторов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 1 (131). С. 43–49.
  22. Гоголин В. А., Ермакова И. А. Методика численного моделирования геомеханического состояния вентиляционного штрека // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 4. С. 479–490.
  23. Терещук Р. Н., Наумович А. В. Обеспечение устойчивости подготовительных выработок глубоких угольных шахт : монография // М-во образования и науки Украины; Нац. горн. ун-т. Днепропетровск : НГУ, 2015. 134 с.
  24. Прочность и деформируемость горных пород. Под ред. А. Б. Фадеева. М. : Недра, 1979. 269 с.
  25. Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. М. : Недра, 1994. 447 с.
  26. Разрушение. Т. 2. М. : Мир, 1975. 764 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Об авторах:

**Лисковец Александр Сергеевич**, заместитель генерального директора – Куратор проекта ООО «СГП», инжиниринговая компания SGP (650066, Кемеровская область-Кузбасс, г. Кемерово, пр. Октябрьский, 28 Б), e-mail: liskovets@sgp.su

**Тациенко Виктор Прокопьевич**, профессор кафедры ГМиК, директор Института промышленной и экологической безопасности, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, ул. Весенняя, 28), д.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1345-391X>, e-mail: tatsienkovp@kuzstu.ru

**Ермакова Инна Алексеевна**, профессор кафедры математики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, (650000, ул. Весенняя, 28), д.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2153-9358>, e-mail: eia.pm@kuzstu.ru

#### Заявленный вклад авторов:

Лисковец Александр Сергеевич – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, анализ данных, выводы, написание текста.

Тациенко Виктор Прокопьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, анализ данных, выводы, написание текста.

Ермакова Инна Алексеевна – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

### APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD FOR CALCULATION OF MINE WORKING WITH PLUGGING LAYER BEHIND ARCH SUPPORT

Aleksandr S. Liskovets<sup>1</sup>, Viktor P. Tatsienko<sup>2</sup>,  
Inna A. Ermakova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engineering company SGP

<sup>2</sup>T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

\* for correspondence: eia.pm@kuzstu.ru

#### Abstract.

When using an arched metal frame support, it becomes necessary to install frame fences. One of the promising ways to fill voids behind the frame (arched) support and create an interframe fence, as well as ensure full contact of the support with the rock mass, is to create a grouting layer behind the support.

The existing methods of analytical calculations of the stress-strain state (SSS) of mining operations consider simplified problem statements: the workings have a circular or elliptical shape, the rock mass is represented by a homogeneous and isotropic medium.

It is proposed to use the finite element method to fully take into account the mining and geological conditions of mining, as well as the presence of a grouting layer. The work investigated the SSS of a preparatory mine, fixed with an arched support with a grouting layer behind the support.

The design area in the flat cross-section of the mine working includes a coal seam, rock layers, an arched support and a grouting layer. The boundary conditions and loading conditions of the computational domain are substantiated. A grid of finite elements and their number is selected, which makes it possible to calculate the stress state of rocks, supports and grouting layer with an error of less than 1%.

The assessment of the strength of rock layers, coal seam, grouting layer and support was carried out according to the Mohr criterion, on the basis of which the softening zones were identified. The results obtained make it possible to establish the load on the support for its full calculation, as well as to determine the necessary uniaxial compressive strength of the grouting layer to maintain its strength.

#### Article info

Received:

14 May 2025

Accepted for publication:

15 November 2025

Accepted:

02 December 2025

Published:

22 December 2025

**Keywords:** arch support, grouting layer, pressure on support, finite element method.

**For citation:** Liskovets A.S., Tatsienko V.P., Ermakova I.A. Application of finite element method for calculation of mine working with plugging layer behind arch support. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 6(172):84-93. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-6-84-93, EDN: HUZVAX

#### REFERENCES

1. Liskovecz A.S., Tacienko V.P., Meshkov A.A. Napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya tamponazhnoj krep. *Gornaya promyshlennost'*. 2020; 2:88–93. DOI :10.30686/1609-9192-2020-2-88-93. EDN XEOMCF.
2. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. Mehanika podzemnyh sooruzhenij i konstrukcii krepej. M.: Student; 2012. 543 s.
3. Buly'chev N.S. Mehanika podzemnyh sooruzhenij: uchebnik dlya vuzov. M.: Nedra; 1994. 382 s.
4. Liberman Yu.M. Davlenie na krep' kapitel'nyh vyrabotok. M.: Nauka; 1969. 119 s.
5. Raschet krep i ohrannyyh celikov podgotovitel'nyh vy'rabotok. M.: Nedra; 1995. 126 s.
6. Lin'kov A.M. Uchet zapredel'nyh deformacij v ploskoy zadache o krugloj vy'rabotke. *FTPPI*. 1977; 5:16–22.
7. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. Ocenka ustojchivosti gornyh vy'rabotok. *Shahtnoe stroitel'stvo*. 1978; 2:13–16.
8. Glushko B.G., Vinogradov V.V. Razrushenie gornyh porod i prognozirovanie proyavlenij gornogo davleniya. M.: Nedra; 1982.192 s.
9. Kly'kov A.E. Dilatansiya gornyh porod i smeshcheniya v vy'rabotke v zavisimosti ot sostoyaniya zakrepnogo prostranstva. *Forum girnikiv – 2013: materiali mizhnar. konf. 2-5 zhovtnya 2013 r. Dnipropetrovs'k*, 2013. T.2. S. 264–271.
10. Anciferov S.V., Fotieva N.N., Buly'chov N.S., Gribanov V.B. O raschete obdelok tonnelej, sooruzhennyh v massive grunta, podverzhennogo predvaritel'nomu

- ukrepleniyu. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle.* 2015; 3:98–107.
11. Tacienko V.P., Gogolin V.A., Ermakova I.A., Lesin Yu.V., Liskovecz A.S. Postanovka zadachi rascheta krep'i s tamponazhem zakrepnogo prostrastva. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2019; 3:68–74.
  12. Tacienko V.P., Gogolin V.A., Ermakova I.A., Lesin Yu.V., Liskovecz A.S. Raschet krep'i s uchetom tamponazha zakrepnogo prostranstva. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2019; 3:75–81.
  13. Liskovecz A.S., Tacienko V.P. Analiz sposobov krepleniya tamponazha zakrepnogo prostranstva gornyh vy'rabotok i metodov rascheta vzaimodejstviya krep'i s massivom gornyh porod. *Tekhnika i tehnologiya gornogo dela.* 2021; 1(12):27–52.
  14. Shumpf G.G., Egorov P.V., Petrov A.I., Krasi'nikov B.V. Gornoe davlenie v podgotovitel'nyh vy'rabotkax ugol'nyh shaht. M.: Nedra; 1996. 353 s.
  15. Ignatov E.V., Tyulenev M.A. Geomechanicheskoe obosnovanie geometricheskih i texnologicheskikh parametrov sistemy razrabotki «dlinnyye polosami s korotkimi zabyami». *Tekhnika i tehnologiya gornogo dela.* 2023; 2:59–87.
  16. Yakobi O. Praktika upravleniya gornym davleniem M.: Nedra; 1987. 566 s.
  17. Amusin B.Z., Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov pri reshenii zadach gornoj geomehaniki. M.: Nedra; 1975. 269 s.
  18. Fadeev A.B. Metod konechnykh e'lementov v geomehanike. M.: Nedra; 1987. 221 s.
  19. Hutton D.V. Fundamentals of Finite Element Analysis. 1st ed. New York: McGraw Hill; 2003. 640 p.
  20. Moaveni S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. 4th ed. Harlow: Pearson Education Limited; 2015. 936 p.
  21. Gogolin V.A., Ermakova I.A. Vy'bor mestopolozheniya podgotovitel'noj vyrabotki otnositel'no vy'rabotannogo prostranstva s uchetom geomehanicheskikh faktorov. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2019; 1 (131):43–49.
  22. Gogolin V.A., Ermakova I.A. Metodika chislennogo modelirovaniya geomehanicheskogo sostoyaniya ventilyacionnogo shtreka. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle.* 2024; 4:479–490.
  23. Tereshhuk R.N., Naumovich A.V. Obespechenie ustojchivosti podgotovitel'nyh vyrabotok glubokih ugol'nyh shaht : monografiya. M-vo obrazovaniya i nauki Ukrayiny'; Nacz. gorn. un-t. Dnepropetrovsk: NGU; 2015. 134 s.
  24. Prochnost' i deformiruemost' gornyh porod. Pod red. A.B. Fadeeva. M.: Nedra; 1979. 269 s.
  25. Shtumpf G.G., Ry'zhkov Yu.A., Shalamanov V.A., Petrov A.I. Fiziko-tehnicheskie svojstva gornyh porod i uglej Kuzneckogo bassejna. M.: Nedra; 1994. 447 s.
  26. Razrushenie. T. 2. M.: Mir; 1975. 764 s.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

#### About the authors:

**Aleksandr S. Liskovets**, Deputy General Director – Project Supervisor, SGP LLC, SGP Engineering Company, (650066, Kemerovskaya oblast'-Kuzbass, g. Kemerovo, pr. Oktyabr'skij, 28 B), e-mail: liskovets@sgp.su

**Viktor P. Tatsienko**, Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Director of the Institute of Industrial and Environmental Safety, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (Kemerovo, Russian Federation, 650000, Vesennyya, 28), DSc (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1345-391X>, e-mail: tatsienkovp@kuzstu.ru

**Inna A. Ermakova**, Professor of the Department of Mathematics, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (Kemerovo, Russian Federation, 650000, Vesennyya, 28), DSc (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2153-9358>, e-mail: eia.pm@kuzstu.ru

#### Contribution of the authors:

Aleksandr S. Liskovets – research problem statement; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research, data analysis, reviewing the relevant literature, drawing the conclusions, writing the text.  
Viktor P. Tatsienko – research problem statement; scientific management, conceptualisation of research, data analysis, drawing the conclusions, writing the text.  
Inna A. Ermakova – reviewing the relevant literature; data collection, data analysis, drawing the conclusions, writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

