

УДК 622.831

**О МЕТОДЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ  
ГОРНЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ КОНТАКТНОГО  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КРЕПЬЮ ВЫРАБОТОК**

**В. М. Серяков**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: vser@misd.nsc.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Предложен и апробирован метод расчета напряженно-деформированного состояния элементов крепи выработки и окружающих горных пород, учитывающий свободное смещение контура выработки до его контакта с крепью. В основе метода лежит использование матрицы жесткости расчетной системы, сформированной для породного массива в исходном состоянии до ведения в нем горных работ. Моделирование процесса образования выработки с помощью метода начальных напряжений позволило разделить рассматриваемую задачу на две. В первой определяется механическое состояние массива при свободном деформировании пород в выработку; во второй — описывается процесс совместного деформирования приконтурных пород и крепи.

Приведены примеры расчетов напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих пород с учетом условий возведения крепи. Установлен характер изменения напряжений в зависимости от значения свободного смещения контура выработки до его контакта с крепью. Рассмотрены особенности применения метода при значительных различиях механических характеристик крепи и горных пород.

*Горные породы, выработка, крепь, напряжения, деформации, расчеты, матрица жесткости, метод начальных напряжений, смещения контура выработки, контактное взаимодействие*

В работе [1] рассмотрен метод расчета напряженно-деформированного состояния элементов крепи и породного массива, применимый для условий поэтапной проходки выработок большого поперечного сечения. При использованной постановке краевых задач механики горных пород предполагалось, что породный массив и возводимые элементы крепи проявляют упругие свойства; проходка выработок небольших сечений, формирующих нужную выработку, заканчивается полной разгрузкой их контура от усилий; возводимые в выработках небольших сечений элементы крепи находятся в недеформированном состоянии и свободны от напряжений; деформирование и нагружение элементов крепи происходит из-за ведения дальнейших работ по поэтапной разработке выработки большого поперечного сечения. Такие ограничения на процесс поэтапной проходки выработки в определенной мере уменьшают возможности применения разработанного метода при решении практических задач. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть возможность распространения разработанного метода на другие условия возведения и деформирования элементов крепи и окружающего выработку массива.

Одним из важных этапов построения модели взаимодействия крепи и приконтурных пород является корректное описание механических процессов, происходящих при их контакте [2–5]. В первых постановках, описывающих деформирование крепи и вмещающих пород, неодно-

родная среда с жестким контактом между породным массивом и крепью нагружалась на внешнем контуре усилиями, определяемыми исходным полем напряжений. Механическая трактовка такой постановки задачи отвечает случаю “мгновенного” возведения крепи на контуре выработки при ее проходке без упругой разгрузки горных пород от исходных полей напряжений [6, 7]. Технически реализовать “мгновенное” возведение крепи сразу после проходки выработки практически невозможно. После проходки выработки до момента возведения крепи проходит определенный промежуток времени, за который контур выработки смещается, разгружая окружающие горные породы от исходных напряжений. В зависимости от параметров применяемых в настоящее время технологий возведения крепи упругая разгрузка приконтурных пород может быть либо частичной, либо полной [4, 8]. При частичной разгрузке контур выработки получает некоторое смещение в выработанное пространство, несколько разгружая окружающие породы от упругих напряжений. После возведения крепи происходит дальнейшая разгрузка окружающего массива от упругих напряжений. При этом наблюдается деформация как массива, так и элементов крепи. Ясно, чем меньше смещения массива внутрь выработки до момента возведения крепи, тем большей нагрузке подвергаются элементы крепи.

#### **АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ И ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОХОДКЕ ВЫРАБОТОК**

Постановка задачи о расчете напряженно-деформированного состояния крепи и приконтурных пород, описывающая особенности их взаимодействия, должна отражать следующие механические процессы: 1) свободное деформирование контура выработки с разгрузкой окружающего массива от исходных напряжений до момента времени, когда смещение контура выработки превысит некоторое заданное значение (его величина определяется параметрами применяемой технологии возведения крепи); 2) дальнейшую разгрузку приконтурных пород, деформирующихся совместно с крепью, от упругих напряжений; 3) нагружение элементов крепи при их совместном деформировании с породами, окружающими выработку. Математическая реализация такой постановки задачи достаточно сложна. Главным нерешенным вопросом является установление величин тех усилий, которые будут действовать на систему “приконтурные породы – крепь” после возведения в выработке крепи.

При решении практических задач обычно используются более простые постановки. Сначала решается задача о деформировании приконтурных пород, соответствующая случаю незакрепленной выработки. Отдельно рассматривается крепь, нагружаемая по внешнему контуру сжимающими нормальными напряжениями. Находя решения этих двух задач при условии, что смещения границы выработки и внешнего контура крепи имеют одно и то же значение, равное смещению контура выработки до момента установки крепи, считают, что получено решение поставленной задачи [2, 3]. Оценить степень приближения, вносимую рассмотрением независимого деформирования окружающих выработку пород и крепи, затруднительно. Это требует привлечения постановки задачи, точно отражающей условия взаимодействия приконтурных пород и элементов крепи.

Рассмотрим один из вариантов развития метода расчета напряженно-деформированного состояния крепи и приконтурных пород, предложенного в [1], для описания особенностей их контактного взаимодействия. Расчет выполняется в предположении упругого деформирования системы “приконтурные породы – крепь” методом конечных элементов и основан на использовании итерационной процедуры начальных напряжений [9, 10]. Алгоритм решения можно разделить на два этапа.

На первом этапе сначала определяется напряженно-деформированное состояние горных пород, отвечающее массиву до ведения в нем горных работ. Для этого формируется соответствующая матрица жесткости и решается краевая задача с граничными условиями, характеризующими исходное напряженное состояние породного массива в исследуемом районе. Далее выделяется контур выработки и в конечных элементах, попадающих в выработку, начинается реализация итерационной процедуры метода начальных напряжений по обращению в ноль всех компонент тензора напряжений [11]. В ходе итерационного процесса значения всех напряжений в конечных элементах, попадающих в выработку, уменьшаются, за счет чего растут смещения точек контура выработки. Первый этап решения заканчивается, когда перемещения точек контура достигают заданной заранее величины, которая определяется технологией возведения крепи.

Второй этап расчета начинается с формулировки условия того, что в выработанном пространстве возведена крепь. Такое условие предполагает изменение в конечных элементах, соответствующих материалу крепи, механических свойств материала. Для этой цели также используется процедура метода начальных напряжений, предполагающая изменение лишь правой части решаемой системы уравнений; матрица жесткости остается неизменной и отвечает исходному массиву горных пород. Далее продолжается итерационный процесс, начатый на первом этапе решения. Во всех элементах выработки с тем же контуром, заданным на первом этапе методом начальных напряжений, все напряжения обращаются в ноль. Отметим еще раз, что соответствующая второму этапу часть снимаемых усилий с контура выработки перераспределяется как на окружающие породы, так и на элементы крепи.

С позиции механической трактовки результатов применения описанного алгоритма подчеркнем следующее. В результате проведения двух этапов расчета происходит полное освобождение элементов выработанного пространства от действовавших здесь до проходки выработки напряжений. Это эквивалентно тому, что в задаче определения дополнительного поля перемещений и напряжений, вызванного проходкой выработки, с ее контура полностью снимается исходная нагрузка. На первом этапе расчета часть этой нагрузки вызывает деформирование окружающего выработку массива, на втором снимаемая нагрузка действует на окружающий массив и крепь.

Предлагаемый подход к расчету напряженно-деформированного состояния породного массива и элементов крепи можно использовать как для расчета одиночных выработок, подкрепляемых крепью, так и для моделирования процессов деформирования вмещающих пород и элементов крепи при поэтапной разработке выработок с большой площадью поперечных сечений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим применение разработанного метода к решению задачи о деформировании массива горных пород вокруг арочной выработки, подкрепляемой крепью. Конфигурация выработки и крепи приведена на рис. 1. Расчеты выполнены для условий плоской деформации. На вертикальных границах расчетной области заданы нулевые значения горизонтальной компоненты вектора смещений  $u$  и касательной компоненты тензора напряжений  $\tau_{xy}$ . Эти условия отвечают исходному напряженному состоянию массива с компонентами тензора напряжений:  $\sigma_y^0 = -\gamma H$ ,  $\sigma_x^0 = -v\gamma H/(1-v)$ ,  $\tau_{xy}^0 = 0$  и реализуются в регионах, где отсутствует тектоника [11]. Здесь  $\sigma_x^0$ ,  $\sigma_y^0$ ,  $\tau_{xy}^0$  — нормальные и касательная компоненты тензора напряжений;  $\gamma$  — объемный вес пород;  $v$  — коэффициент Пуассона породного массива;  $H$  — расстояние до земной поверхности. Ось  $Ox$  направлена по горизонтали,  $Oy$  — по вертикали. Верхняя граница

расчетной области свободна от действия внешней нагрузки. На нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора смещений и касательная компонента тензора напряжений  $\tau_{xy}$ . Механические свойства массива горных пород приняты следующими: модуль Юнга  $E = 50\,000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$ . Для материала крепи  $E = 60\,000$  МПа,  $\nu = 0.2$ . Объемный вес пород и материала крепи равен  $0.03$  МН/м<sup>3</sup>.

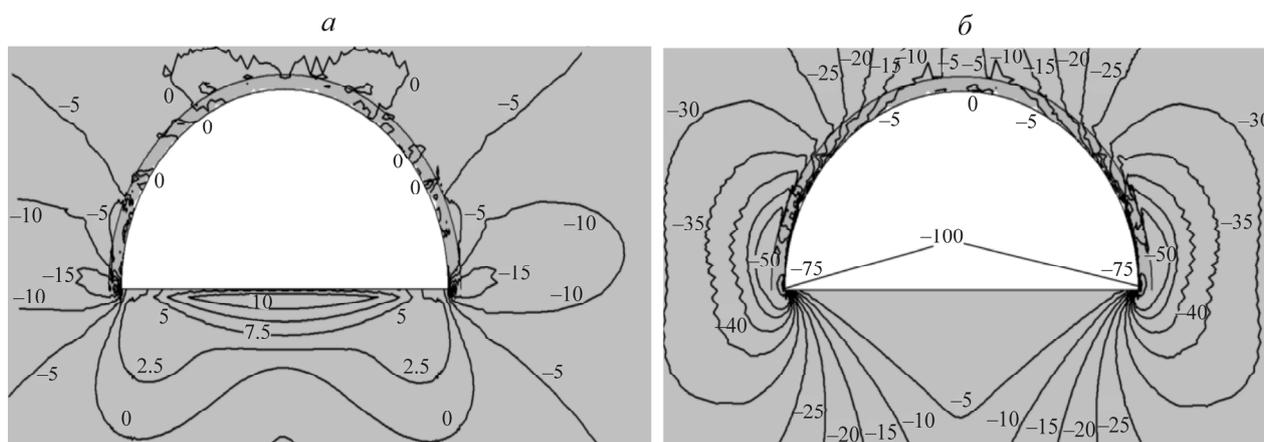


Рис. 1. Характер распределения главных напряжений  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б) в крепи и в породном массиве в случае “мгновенного” возведения крепи при проходке выработки

В первой серии расчетов рассмотрены особенности напряженного состояния крепи и вмещающего массива при различных значениях смещения контура выработки в момент возведения крепи. На рис. 1 приведены изолинии распределения главных напряжений для случая “мгновенного” возведения крепи. Свободное смещение контура выработки в этом случае равно нулю. Необходимо отметить, что предлагаемый итерационный процесс имеет достаточно быструю сходимость: для получения двух последовательных приближений, отличающихся друг от друга менее чем на 0.1 %, требуется 10–15 итераций.

Выбранная конфигурация крепи и небольшое различие в значениях модуля Юнга материала крепи и вмещающих пород приводит к концентрации сжимающих напряжений в породном массиве в районе контакта почвы выработки с ее боковыми границами. Сама крепь находится под действием напряжений меньших, чем в окружающих породах.

Рост упругих смещений контура выработки в момент возведения крепи приводит к изменению характера распределения напряжений как в крепи, так и в окружающих породах. На рис. 2 приведено распределение напряжений для случая, когда контур выработки получает смещение, равное половине его полного смещения при отсутствии крепи.

Свободное деформирование контура выработки до момента возведения крепи способствует образованию в породном массиве зоны опорного давления (рис. 2б). Дальнейшее совместное деформирование крепи и вмещающих пород вызывает, как и ранее (см. рис. 1), образование области концентрации сжимающих напряжений в местах контакта почвы выработки с ее боковыми границами. Однако напряжения в зоне концентрации становятся меньше.

Отмеченные особенности в изменении напряженного состояния крепи и горных пород в окрестности выработки сохраняются и при дальнейшем увеличении свободного смещения ее контура. На рис. 3 напряженное состояние отвечает случаю, когда при свободном деформировании контура выработки реализуется около 80 % его полного упругого смещения, соответствующего ведению горных работ без крепления выработки.

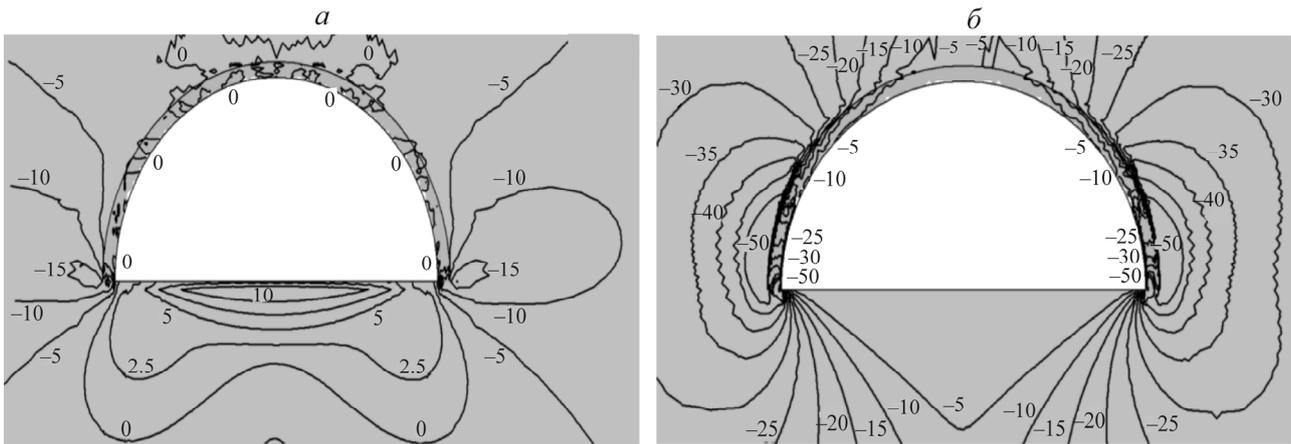


Рис. 2. Распределение главных напряжений  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б) в крепи и породном массиве при до-контактных смещениях контура выработки, равных половине их значений в случае отсутствия крепления

Происходит дальнейшее увеличение уровня сжимающих напряжений в зоне опорного давления. Полностью исчезает область концентрации сжимающих напряжений в местах контакта почвы выработки с ее боковыми границами. Напряженное состояние в приконтурном массиве в значительной мере соответствует случаю неподкрепленной выработки с практически ненагруженной крепью.

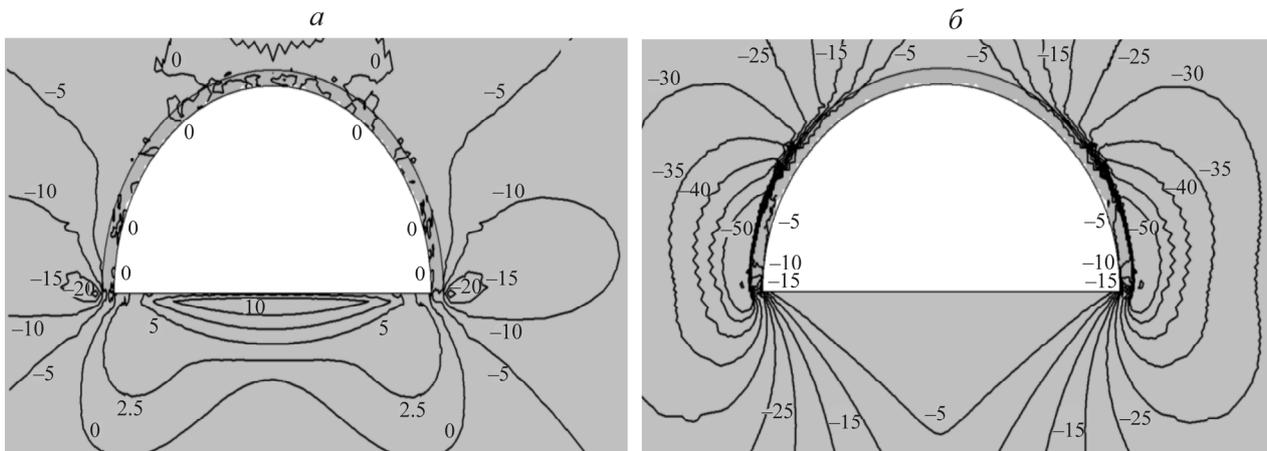


Рис. 3. Распределение главных напряжений  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б) в крепи и породном массиве при до-контактных смещениях контура выработки, равных 80 % их значений в случае отсутствия крепления

Таким образом, первая серия расчетов позволила установить быструю сходимость предложенного метода расчета напряженного состояния закрепляемой выработки с учетом технологии возведения элементов крепи. Полученные результаты соответствуют известным теоретическим и экспериментальным закономерностям изменения напряженно-деформированного состояния в крепи и окружающем выработку массиве при различных условиях взаимодействия крепи и приконтурных пород [8, 12].

Во второй серии расчетов рассмотрены особенности применения разработанного метода к задачам со значительно различающимися механическими характеристиками крепи и породного массива и обсуждены соответствующие изменения в их напряженно-деформированном состоянии. На

рис. 4 показаны изолинии второго главного напряжения в крепи и приконтурном массиве при различных значениях модуля Юнга материала крепи, превышающие модуль Юнга породного массива в 2, 3 и в 10 раз. Все расчеты выполнены для случая “мгновенного” возведения крепи.

Увеличение модуля Юнга материала крепи приводит к росту напряжений сжатия во всех ее элементах. В породном массиве, напротив, в зоне опорного давления напряжения уменьшаются по мере роста модуля Юнга материала крепи.

Большое различие в механических характеристиках материала крепи и породного массива вносит свои особенности в проведение расчетов. Стандартная методика вычисления начальных напряжений и начальных узловых сил и их использование при реализации итерационного процесса может вызывать его расходимость. Связано это с тем, что при решении задачи итерационным методом начальных напряжений должно быть достигнуто выполнение двух условий: обращения в объеме выработки в ноль всех напряжений, действующих в исходном состоянии массива; получения в элементах крепи напряжений, соответствующих модулю Юнга, отличному от модуля Юнга породного массива. При больших различиях в значениях механических свойств материала крепи и горных пород начальные узловые силы, вычисленные для второго условия, начинают намного превосходить начальные узловые силы, отвечающие первому условию. Это является причиной возможной расходимости предлагаемого метода.

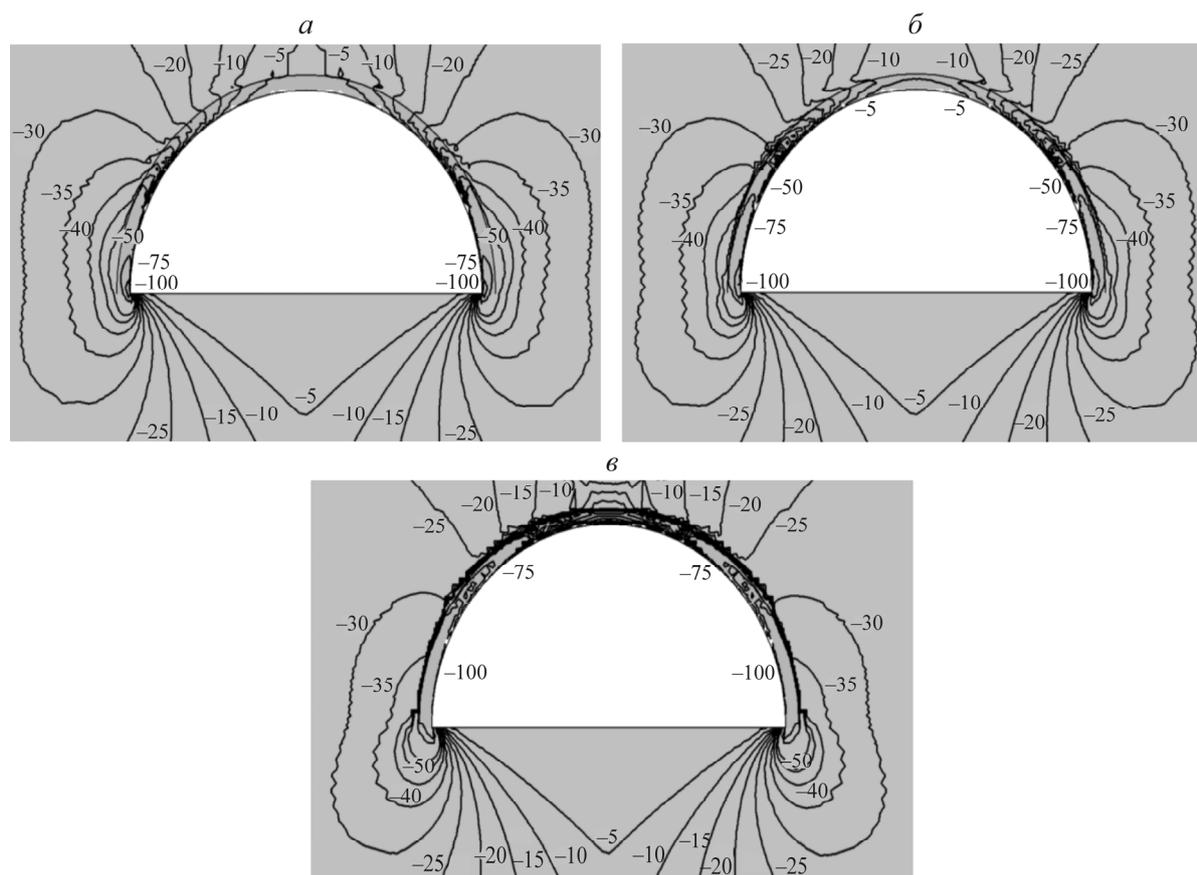


Рис. 4. Изолинии второго главного напряжения в крепи и приконтурном массиве при различных значениях модуля Юнга материала крепи, превышающих модуль Юнга породного массива в 2 (а), 3 (б) и в 10 раз (в)

Преодолеть указанные трудности удастся путем использования так называемого коэффициента ускорения сходимости [9]. Введение в расчет его значений меньших единицы позволяет

уменьшить значения узловых сил на каждой итерации и добиться сходимости итерационного процесса. Для каждого соотношения механических параметров крепи и массива такой выбор происходит индивидуально.

#### **ВЫВОДЫ**

Разработан метод расчета напряженно-деформированного состояния крепи и окружающих выработку горных пород, учитывающий смещения конура выработки до момента возведения элементов крепи.

Моделирование процесса проходки выработки с применением метода начальных напряжений путем обращения в ноль всех компонент поля напряжений, действующих в объеме обрабатываемой выработки, позволяет использовать на всех этапах деформирования системы “приконтурные породы – крепь” одну и ту же матрицу жесткости расчетной системы, формируемую для исходного массива горных пород.

Результаты расчетов напряженного состояния крепи и горных пород при различных значениях смещений контура выработки до его контакта с крепью показали их соответствие известным теоретическим и экспериментальным закономерностям распределения полей напряжений в окрестности подкрепляемой выработки.

Предложен способ получения решений рассматриваемых задач при значительных различиях механических свойств крепи и горных пород.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Серяков В. М.** О расчете напряженного состояния крепи и приконтурных пород при поэтапной разработке поперечного сечения протяженной выработки // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 42–49.
2. **Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений в примерах и задачах. — М.: Недра, 1989. — 273 с.
3. **Булычев Н. С.** Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1994. — 278 с.
4. **Протосеня А. Г., Долгий И. Е., Огородников Ю. Н.** Шахтное и подземное строительство в примерах и задачах. — СПб.: Изд-во Горного ин-та им. Плеханова, 2003. — 312 с.
5. **Булычев Н. С., Фотиева Н. Н., Стрельцов Е. В.** Проектирование и расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1986. — 288 с.
6. **Баклашов И. В., Картозия Б. А.** Механика подземных сооружений и конструкций крепей. — М.: Недра, 1992. — 543 с.
7. **Насонов И. Д., Федюкин В. А., Шуплик М. Н.** Технология строительства подземных сооружений. — М.: Недра, 1992. — 285 с.
8. **Шахтное и подземное строительство:** учебник для вузов. Т. 2. / Б. А. Картозия, Б. И. Федунец и др. — М.: Изд-во АГН, 2003. — 815 с.
9. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 542 с.
10. **Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
11. **Серяков В. М.** Об одном подходе к расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработанного пространства // ФТПРПИ. — 1997. — № 2. — С. 14–21.
12. **Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В.** Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989. — 488 с.

*Поступила в редакцию 1/VIII 2016*