

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ С УЧЕТОМ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОРОДНЫМ МАССИВОМ

Виктор Михайлович Серяков

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией, тел. (383)205-30-30, доп. 124, e-mail: vser@misd.ru

Рассматриваются вопросы расчета напряженно-деформированного состояния крепи, устанавливаемой в выработке при неполном освобождении ее контура от усилий, соответствующих исходному напряженному состоянию массива горных пород. Предлагается алгоритм расчета, основанный на использовании матрицы жесткости расчетной системы, сформированной с использованием механических характеристик исходного массива. Установлены особенности напряженного состояния крепи при различных величинах свободного деформирования контура выработки, даны рекомендации по выбору механических характеристик крепи.

Ключевые слова: породный массив, крепь, смещения контура выработки, математическое моделирование, распределение напряжений.

CALCULATION OF STRESS BEHAVIOR OF UNDERGROUND MINING SUPPORT CONSIDERING ITS INTERACTION WITH ROCK SOLID

Viktor M. Seryakov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Professor, Head of Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 124, e-mail: vser@misd.ru

In the work, issues of calculation of stress-strain behavior of support set at working under incomplete release of its contour from forces, according initial stress behavior of rock solid are considered. Calculating algorithm based on using stiffness matrix of calculated system, formed using mechanical parameters of the initial solid is proposed. Features of stress behavior of the support under different values of free working contour strain are established. Recommendations for choice of mechanical parameters of support are given.

Key words: rock solid, support, displacements of working contour, numerical simulation, distribution of stresses.

Введение

Усложнение условий отработки месторождений полезных ископаемых, ведение горных работ на глубинах, где исходный уровень напряжений сравним с пределами прочности горных пород, предъявляют повышенные требования к технологии крепления выработок, обеспечивающей необходимый срок их работы. Для выбора механических характеристик крепи, технологических особенностей ее возведения большое значение имеет расчетная схема, принятая для определения напряженно-деформированного состояния крепи и окружающего выработку массива горных пород [1-3].

Для адекватного описания напряженно-деформированного состояния массива и элементов крепи необходимо рассмотреть особенности процесса их совместного деформирования. Условно этот процесс можно разбить на два этапа. На первом этапе происходит свободное перемещение контура выработки. На втором этапе достигается контакт границ выработки и элементов крепи и осуществляется их совместное деформирование [1, 4, 5]. Следовательно, на первом этапе деформирования необходимо определить свободные перемещения контура выработки. Эти перемещения вызваны внешними силами, проявляющимися при частичном освобождении контура выработки от исходных напряжений, сформированных на нем до проходки выработки. Оставшаяся часть усилий, действует как на окружающий выработку массив, так и на возведенную крепь, определяет напряженное состояние крепи и влияет на дальнейшее изменение напряжений в горных породах. Таким образом, на втором этапе необходимо решить задачу о деформировании сплошной среды с разными физико-механическими свойствами, моделирующей породный массив и материал крепи.

Предложено достаточное число методик расчета, учитывающих разнообразие горнотехнических условий, в которых происходит сооружение и крепление выработок различных сечений. Однако некоторые вопросы теории расчета напряженного состояния крепи еще остаются нерешенными в полной мере. К ним, в частности, относятся вопросы моделирования условий совместного деформирования пород, окружающих выработку, и элементов возводимой крепи [2, 6, 7].

Одна из возможных постановок для решения таких задач и соответствующий алгоритм расчета предложены в работах [5,8]. Так в [8] показано, что разработанный алгоритм позволяет более точно учитывать особенности совместного деформирования контура выработки и крепи, адекватно определять формируемые в них напряжения. В настоящей статье возможности предлагаемого метода показываются на решении задачи породного массива вокруг закрепленной выработки с изменяющимися механическими характеристиками крепи и параметрами контактного взаимодействия.

Алгоритм нахождения напряженного состояния крепи и окружающего выработку породного массива

Алгоритм нахождения напряженного состояния крепи и массива горных пород предполагает двухэтапное рассмотрение процесса деформирования. На первом этапе находится исходное механическое состояние массива без выработки. На втором – определяется дополнительное поле напряжений, вызванное проходкой выработки. При традиционном подходе к нахождению дополнительных напряжений необходимо выделение контура вновь создаваемой выработки и вычисление действующих на нем компонент поля напряжений. Реализация такого алгоритма связана с большими техническими трудностями, обу-

словленными как заданием контуров последовательно создаваемых выработок, так и вычислением на них узловых сил [9]. В предлагаемом алгоритме вся расчетная область, включая и подобласти размещения элементов крепи, разбивается на конечные элементы. Механические свойства элементов, расположенных в выработке, полагаются теми же, что и были в них до образования выработок, т.е. расчетная область моделирует нетронутый массив горных пород. Условие, которое отражает образование выработки – обращение в соответствующих выработке элементах в ноль всех компонент напряжений. Для выполнения этого условия предлагается использовать итерационный метод начальных напряжений [10, 11]. В конечных элементах, соответствующих выработке, вычисляется вектор начальных узловых сил

$$\{F\} = \int_V [B]^T \{\sigma^H\} dv.$$

Здесь $[B]^T$ - матрица связи между деформациями и смещениями элемента; V - объем конечного элемента; $\{\sigma^H\}$ - вектор начальных напряжений, компоненты которого на первом шаге итерационного процесса равны величинам напряжений в этом же элементе.

Для использования матрицы жесткости расчетной системы, сформированной для массива горных пород без выработок, при расчете напряжений в крепи, материал которой имеет физико-механические характеристики отличные от свойств породного массива, был построен итерационный алгоритм процесса нахождения решения. При упругом деформировании материала крепи и горных пород деформации ε_{ij} в конечных элементах, моделирующих крепь, рассчитанные с помощью матрицы жесткости, соответствующей исходному массиву горных пород, полагаются истинными. По закону Гука определяются напряжения σ_{ij}^* , которые должны были бы действовать в элементах, если бы они имели механические свойства крепи:

$$\sigma_{ij}^* = \lambda_1 \varepsilon \delta_{ij} + 2\mu_1 \varepsilon_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3,$$

где λ_1, μ_1 – константы Ламе материала крепи; δ_{ij} – символ Кронекера; $\varepsilon = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ – объемная деформация.

Разности напряжений σ_{ij}^* и σ_{ij} , где σ_{ij} полученные с использованием неизменяемой матрицей жесткости, рассматриваются как начальные напряжения

$$\sigma_{ij}^n = \sigma_{ij} - \sigma_{ij}^* \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Далее применяется алгоритм метода начальных напряжений. Вектор начальных узловых сил добавляется к вектору внешних нагрузок. Определяется новое деформированное состояние массива горных пород. Полагая, что полу-

ченные деформации верны, описанная выше процедура повторяется. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока два последующих приближения не станут отличаться на заданную малую величину.

Напряженное состояние породного массива и крепи при различных механических характеристиках крепи

Применим предложенный алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния пород в окрестности закрепляемой выработки, учитывающий механические особенности возведения крепи, для варианта ее «мгновенного» возведения, при котором все смещения контура выработки происходят при условии жесткого контакта с возводимой крепью [8]. Геометрические размеры выработки, механические свойства массива и крепи, параметры исходного поля напряжений приняты следующими. Для массива горных пород: модуль Юнга $E = 50000$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$. Объемный вес пород и материала крепи равен 0.03 МН/м³. Исходное напряженное состояние массива обусловлено весом пород и в соответствии с гипотезой Динника: $\sigma_y^0 = -\rho H$; $\sigma_x^0 = -\nu \rho H / (1 - \nu)$; $\tau_{xy}^0 = 0$. Выработка имеет форму полукруга с радиусом 7 м, ее основание расположено на глубине 750 м. Толщина крепи 0.5 м.

На рис. 1 представлены изолинии главных напряжений σ_1, σ_2 при следующих механических характеристиках материала крепи: $E = 100000$ МПа; $\nu = 0.2$. Для выбранных условий работы крепи наибольшие значения сжимающих напряжений в расчетной области достигаются в окрестности внутреннего контура крепи (рис. 1, б). Зона действия наибольших растягивающих напряжений формируется в почве выработки (рис. 1, а), кроме того небольшая зона их концентрации, как по уровню растягивающих напряжений, так и по площади действия образуется в своде крепи.

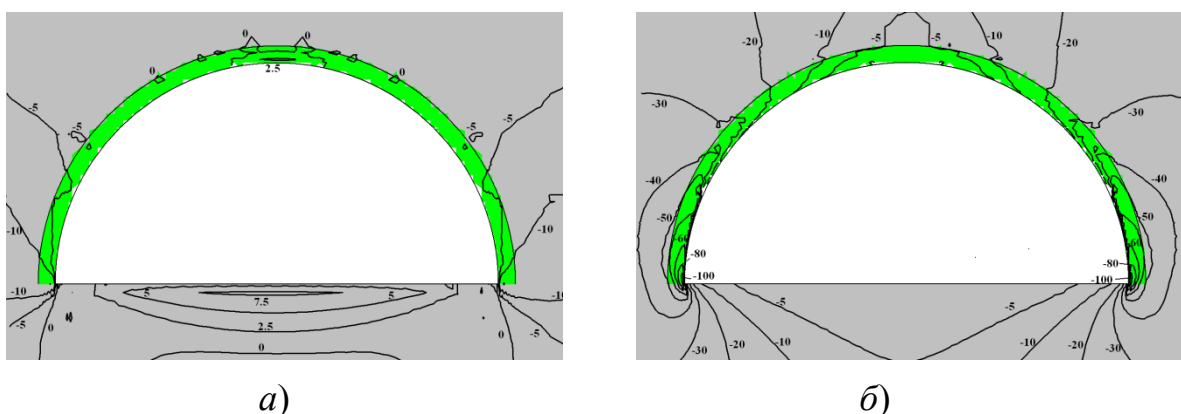


Рис. 1. Распределение главных напряжений σ_1 (а), σ_2 (б) [МПа] в крепи и в приконтурном массиве в случае «мгновенного» ввода ее в работу при модуле Юнга крепи $E = 100000$ МПа

Качественный характер распределения напряжений в области расчета остается таким же и при изменении механических характеристик материала крепи, однако сами величины напряжений изменяются. В таблице приведены некоторые данные расчетов полей напряжений для различных значений модуля Юнга крепи.

Максимальные и минимальные значения главных напряжений в расчетной области

Модуль Юнга [МПа]	$(\sigma_1^{сж})_{\max}$ [МПа]	$(\sigma_1^{раст})_{\max}$ [МПа]	$(\sigma_2^{сж})_{\min}$ [МПа]	$(\sigma_2^{раст})_{\max}$ [МПа]
100000	27	11	2	134
150000	28	11	6	161
200000	28	11	8	180
250000	28	12	9	195
300000	27	12	9	206

Рассмотрение таблицы дает возможность сделать вывод о том, что величина модуля Юнга мало влияет на распределение первого главного напряжения σ_1 . В зоне концентрации второго главного напряжений σ_2 с ростом величины модуля Юнга увеличиваются (по модулю) и их значения.

Для более детального представления о влиянии модуля Юнга материала крепи на распределение напряжений в окрестности выработки на рис. 2 приведены изолинии главных напряжений σ_1 (а), σ_2 (б) при значении $E = 300000$ МПа. В окрестности подсводовой части крепи формируется практически состояние одноосного сжатия. Зона сжимающих напряжений расположена в основном в породах почвы выработки, хотя наибольшая величина сжатия достигается в крепи (рис. 2, б).

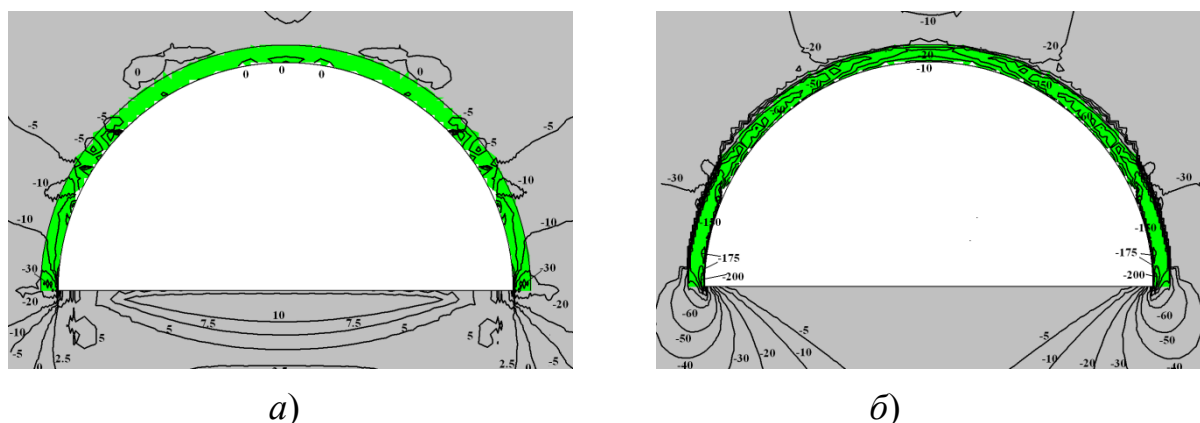


Рис. 2. Распределение главных напряжений σ_1 (а), σ_2 (б) [МПа] в крепи и в приконтурном массиве в случае «мгновенного» ввода ее в работу при модуле Юнга крепи $E = 300000$ МПа

Изменение напряженного состояния породного массива и крепи при учете свободного деформирования контура выработки

Оценим влияние величины свободного смещения контура выработки до ее контакта с поверхностью устанавливаемой крепи. Расчет проведем при исходных параметрах, принятых при получении рис. 2. Предварительно было получено решение для неподкрепленной выработки и определены величины свободных перемещений ее контура. На рис. 3 показано распределение второго главного напряжения σ_2 при возведении крепи после прохождения свободных смещений контура выработки, составляющих 20 % от полных свободных смещений.

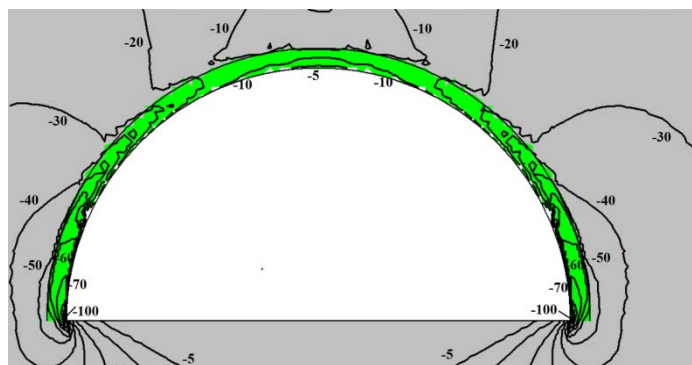


Рис. 3. Распределение главного напряжения σ_2 [МПа] в крепи и в приконтурном массиве при вступлении крепи в работу после осуществления 20 % смещений незакрепленной выработки (модуль Юнга крепи $E = 300000$ МПа)

Сравнение рис. 2 и рис. 3 позволяет заключить, что при вступлении крепи в работу после осуществления 20% смещений незакрепленной выработки, происходит значительное (в два раза) уменьшение максимальных сжимающих напряжений. Зона опорного давления формируется в окрестностях вертикальных границ выработки, в отличие от зон ее формирования в почве выработки в случае мгновенного введения крепи в работу (рис. 2, б). Качественное изменение распределения напряжений в зоне опорного давления происходит по мере увеличения значений свободных смещений контура выработки. На рис. 4 приведены изолинии распределения напряжения σ_2 после прохождения свободных смещений контура выработки, составляющих 50 % от ее полных свободных смещений.

Наиболее существенное отличие от картин распределения σ_2 для вариантов, приведенных на рис. 2, 3, заключается в прераспределении напряжений в зонах опорного давления. Формируются две зоны концентрации вертикальных напряжений. Одна из них образуется в результате деформирования массива горных пород вокруг незакрепленной выработки и располагается в породном

массиве. Другая появляется вследствие совместного деформирования приконтурного массива и крепи. Для исходных условий, при которых получен рис. 4, уровень сжимающих напряжений в зонах концентрации в крепи несколько выше, чем в породном массиве. При увеличении значений свободного смещения контура выработки наибольший уровень сжатия будет отмечаться в породном массиве.

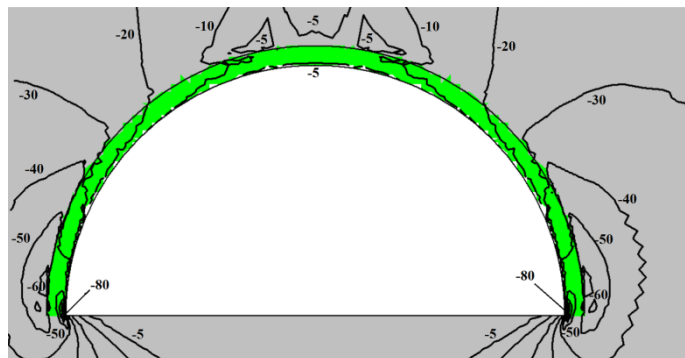


Рис. 4. Распределение главного напряжения σ_2 [МПа] в крепи и в приконтурном массиве при вступлении крепи в работу после осуществления 50% смещений незакрепленной выработки (модуль Юнга крепи $E = 300000$ МПа)

Выводы

1. Увеличение модуля Юнга материала крепи приводит к последовательному смещению зон опорного давления (концентрации сжимающих напряжений σ_2) из района, расположенного в окрестности вертикальных границ крепи, в область почвы выработки.

2. Вступление крепи в работу после реализации части смещений контура незакрепленной выработки приводит к качественному прераспределению напряжений в зонах опорного давления: формируются две области концентрации вертикальных напряжений. Одна из них образуется в результате деформирования массива горных пород вокруг незакрепленной выработки и располагается в породном массиве. Другая появляется вследствие совместного деформирования приконтурного массива и материала крепи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Протосеня А.Г., Долгий И.Е., Огородников Ю.Н. и др. Шахтное и подземное строительство в примерах и задачах. – СПб.: Изд-во Горного института им. Плеханова, 2003. – 312 с.
2. Протосеня А.Г., Огородников Ю.Н., Деменков П.А. и др. Механика подземных сооружений. – СПб: Изд-во СПбГУ–МАНЭБ, 2011. – 335 с.
3. Булычёв Н. С. Механика подземных сооружений. – М.: Недра, 1994. – 278 с.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.

5. Seryakov V.M. Calculating Stresses in Support and Sidewall Rocks in Stagerwise face Drivage in Long Excavations. *Journal of Mining Science*. 2015. Т. 51. № 4. С. 673–678.
6. Картозия Б.А., Федунец Б.И., Шуплик М.Н. и др. Шахтное и подземное строительство: Учебник для вузов. Т. 2. – М.: Изд-во МГГУ «Горная книга», 2003. – 815 с.
7. Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н. Технология строительства подземных сооружений. – М.: Недра, 1992. – 285 с.
8. Серяков В.М. О постановках и алгоритмах решения задач о деформировании породного массива и крепи при проходке выработок // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т.4, 2017. – С. 149–152.
9. Кузнецов С. В., Одинцев В. Н., Слоним М. Э., Трофимов В. А. Методология расчета горного давления. – М.: Наука, 1981. – 189 с.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 576 с.
11. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 246 с.

© В. М. Серяков, 2019