



**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОДНОГО МАССИВА
ПРИ РАЗВИТИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ В РУДНОМ ТЕЛЕ
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДКИ**

В. М. Серяков

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

Рассматриваются вопросы расчета напряженно-деформированного состояния рудного тела, вмещающего и закладочного массивов при развитии горных работ на глубоких горизонтах. Модернизирован разработанный ранее алгоритм учета последовательности ведения очистных и закладочных работ на перераспределение полей напряжений в породах для моделирования нелинейных свойств закладочного материала. Расчет выполнен методом конечных элементов с использованием матрицы жесткости, сформированной для нетронутого горными работами массива. Учет нелинейного поведения закладочного материала осуществляется с помощью процедуры начальных напряжений, которая применяется также для моделирования последовательности проходки и закладки очистных выработок.

Породный массив, последовательность горных работ, напряжения, деформации, нелинейные свойства закладки, матрица жесткости, процедура начальных напряжений

**STRESS STATE OF THE ROCK MASS DURING THE DEVELOPMENT
OF STOPING WORKS IN THE ORE BODY TAKING
INTO ACCOUNT BACKFILL NONLINEAR DEFORMATION**

V. M. Seryakov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: vserr@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The problems of calculating the stress-strain state of an ore body, enclosing and backfilling masses during the development of mining operations at deep horizons are considered. The previously developed algorithm for taking into account the sequence of stoping and backfilling operations to redistribute the stress fields in rocks for modeling the nonlinear properties of backfilling material has been modernized. The calculation is carried out by the method of conic elements using the stiffness matrix formed for an intact rock mass. The nonlinear behavior of backfilling material is taken into account using the initial stress procedure that is also used to model the sequence of sinking and backfilling of stopes.

Rock mass, mining sequence, stresses, strains, backfill nonlinear properties, stiffness matrix, initial stress procedure

Одна из актуальных задач, возникающих при освоении месторождений полезных ископаемых, — задача выбора экономически целесообразной и безопасной последовательности их отработки [1]. Хотя некоторая оценка глобальной последовательности отработки содержится в общем проекте освоения месторождения, всегда возникает производственная необходимость оценки возможных вариантов развития горных работ в конкретных условиях и в конкретный момент отработки [2].

Важной стороной такой оценки является анализ напряженно-деформированного состояния породного массива в районах отработки и соответствующий выбор наиболее безопасного варианта. Провести такую оценку позволяет применение аналитических и численных методов механики горных пород [3]. Для реализации постановок задач механики горных пород, учитывающих последовательность ведения очистных и закладочных работ, создан программный комплекс, в возможности которого входит расчет нескольких сотен технологических операций “проходка выработки – ее закладка” [4].

Однако в разработанном комплексе все сплошные среды, в том числе и закладка, предполагаются упругими материалами, что существенно затрудняет использование программного комплекса для оценки напряженного состояния вмещающего и закладочного массивов в условиях перехода горных работ на большие глубины [5]. Прежде всего необходим учет нелинейного поведения закладочного массива.

В этой связи для сопровождения процесса отработки месторождений на больших глубинах соответствующим распределением напряженного состояния требуется разработка алгоритма расчета, который позволит проводить оценку полей напряжений в районах ведения очистных и закладочных работ с учетом нелинейных деформационных характеристик закладки. Общая схема определения напряженного состояния при развитии очистных и закладочных работ следующая. Для каждого этапа отработки рассчитывается напряженное состояние. Исходными данными для дальнейшего расчета в некоторый момент времени служит напряженное состояние, соответствующее конфигурации выработанного и заложенного пространств. Для этой ситуации рассматриваются возможные варианты развития горных работ, выполняется их расчет и на основе геомеханической оценки полученных полей напряжений предлагается наиболее приемлемый вариант. Впоследствии в качестве исходного напряженного состояния принимается ситуация, сложившаяся после реализации выбранного варианта развития очистных работ.

Используемые разработки. Расчет перераспределения полей напряжений во вмещающем и закладочном массивах в процессе развития горных работ осуществляется на основе использования постановки задачи нахождения полей дополнительных напряжений, соответствующих этапам технологических операций “проходка выработки – ее закладка” [4]. Практическая реализация такой постановки связана со значительными трудностями, вызванными необходимостью определения на каждом этапе расчета границ вновь формируемых выработок и задания на них краевых условий [6]. При применении любых численных методов для этого требуется вычисление нормальных и касательных усилий, действующих на контуре создаваемой выработки, и их задание в соответствующих узлах расчетной области. Последующее вычисление узловых сил, которое предполагает интерполяцию напряжений между узловыми точкам на границах выработки быстро приводит к накоплению ошибок и расходимости алгоритма, поэтому непосредственная реализация постановки задачи нахождения полей дополнительных напряжений получила применение лишь при решении некоторых простейших задач.

В работе [4] рассмотрен метод расчета напряженного состояния массива в окрестности выработанного пространства с учетом последовательности ведения очистных и закладочных работ, позволяющий избежать отмеченных трудностей. Область моделирования на всех этапах расчета напряженного состояния массива имеет механические характеристики, соответствующие исходной геомеханической ситуации, которая существует в горных породах до начала ведения очистных и закладочных работ. Полагается, что образование некоторой выработки соответствует нулевым значениям всех напряжений в расчетных точках, лежащих внутри ее контура. Для выполнения условия равенства нулю всех напряжений в элементах, попадающих в объем выработки, использован метод начальных напряжений. Метод начальных напряжений

использован и для определения напряженного состояния закладочного массива, который имеет механические характеристики, отличные от характеристик исходной расчетной области. В этом случае при любых механических свойствах закладочного материала также используется одна и та же матрица жесткости системы. Достоинством метода начальных напряжений является неизменность матрицы жесткости расчетной системы, что позволяет практически решать актуальные задачи о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород вокруг выработанных пространств с учетом последовательности выемки запасов полезных ископаемых [7, 8].

Классическая схема поиска упругопластического решения в закладочном материале с помощью метода начальных напряжений представлена на рис. 1. Здесь показаны зависимости между интенсивностью напряжений σ_i и интенсивностью деформаций γ_i для материалов, деформирующихся упруго с угловым коэффициентом $3G$ и упругопластически по зависимости $\sigma_i = f(\gamma_i)$. Все расчеты в итерационной процедуре метода начальных напряжений выполняются с применением матрицы жесткости расчетной системы, сформированной на основе упругих свойств сплошной среды. Для каждого конечного элемента рассчитываются значения интенсивности деформаций, и находится разность (“невязка”) между соответствующими этому значению интенсивностями упругих и упругопластических напряжений $\Delta\sigma_i$. Эта разность используется для расчета “невязки” каждой компоненты тензора напряжений и дальнейшего определения компонент вектора начальных напряжений и вектора начальных узловых сил.

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

где $[B]$ — матрица, связывающая деформации и перемещения в конечном элементе; $\{\sigma^H\}$ — вектор начальных напряжений.

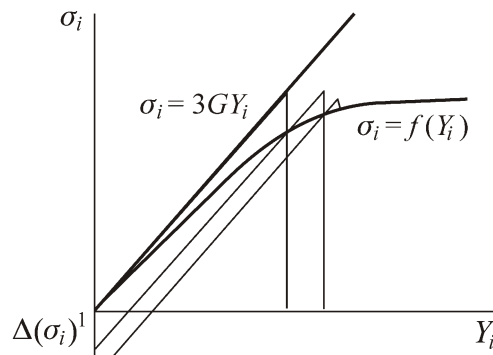


Рис. 1. Схема применения процедуры метода начальных напряжений при учете нелинейного деформирования закладочного массива

Значения компонент вектора начальных напряжений добавляются к исходному вектору узловых сил расчетной системы и с помощью матрицы жесткости, сформированной на основе упругих свойств сплошной среды, находится соответствующее напряженно-деформированное состояние. После этого алгоритм процедуры начальных напряжений повторяется. Условием окончания расчета служит установленная точность соответствия расчетных точек, полученных в итерационном процессе, точкам кривой $\sigma_i = f(\gamma_i)$.

Модернизация алгоритма расчета полей напряжений для учета нелинейных деформационных свойств закладки. В предлагаемом алгоритме расчета для моделирования образования выработки также используется метод начальных напряжений. Особенности его применения можно видеть на рис. 2.

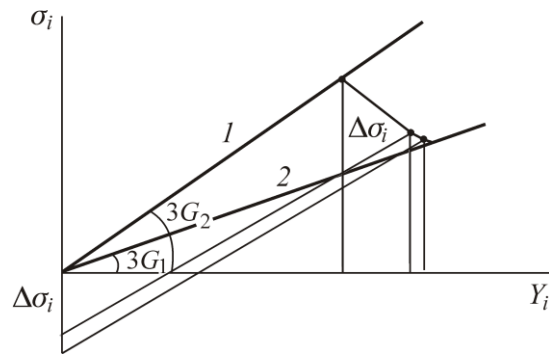


Рис. 2. Схема применения метода начальных напряжений при решении задач деформирования вмещающего и закладочного массивов: 1 — зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций для исходного массива горных пород; 2 — аналогичная зависимость для закладочного материала и для конечных элементов, размещенных в выработке; G_1 , G_2 — константы Ламе, соответствующие закладочному материалу и исходному массиву, при значении $G_1 = 0$ осуществляется моделирование образования выработки

Вместо уравнения прямой 2, используемого при моделировании напряженно-деформированного состояния закладочного массива в случае его упругого деформирования, требуется нелинейная зависимость $\sigma_i = f(\gamma_i)$. Основной особенностью расчета полей напряжений и деформаций при учете нелинейного деформирования закладки является то обстоятельство, что зависимость $\sigma_i = f(\gamma_i)$ необходимо рассматривать отдельно для каждой заполненной закладкой выработки. Связано это с тем, что деформироваться закладочный материал начинает лишь на некотором этапе отработки после заполнения им объема выработки. Все эти условия учтены в модернизированном алгоритме, на основе которого создан комплекс программ расчета напряженно-деформированного состояния вмещающего и закладочного массивов при учете нелинейных свойств закладки.

Некоторые результаты расчетов. На рис. 3 показаны линии равных значений первого главного напряжения σ_1 в расчетной области после выполнения 21-го этапа отработки рудного тела тремя лентами в восходящем порядке в случае упругого деформирования закладочного материала и в случае учета его физической нелинейности. При расчете предполагалось выполнение условий плоской деформации. Мощность рудного тела принята равной 30 м, глубина его залегания — 750 м, модуль Юнга рудного тела и вмещающих пород — 25000 МПа, закладки — 2500 МПа. Размеры образуемых и впоследствии закладываемых выработок 8×8 м. Для описания упругопластических свойств закладочного материала использована зависимость между интенсивностями деформаций и напряжений: $\sigma_i = E \ln(1 + \gamma_i)$.

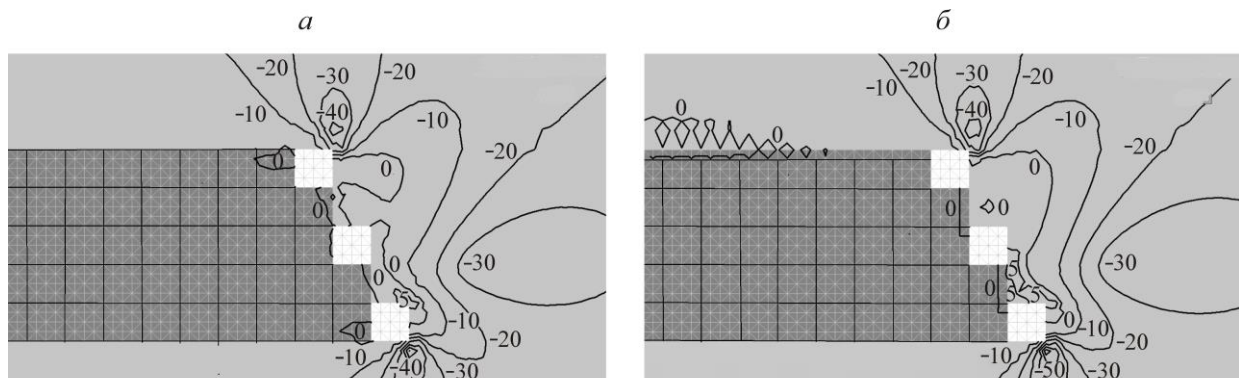


Рис. 3. Изолинии распределения первого главного напряжения (МПа) в закладочном и вмещающем массивах после выполнения 21-ого этапа отработки рудного тела тремя лентами в восходящем порядке: а — при упругом деформировании закладочного массива; б — при учете нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями для материала закладки

Упругопластическое деформирование материала закладки приводит к небольшому увеличению значений сжимающих напряжений σ_1 в зонах концентрации перед очистными выработками в кровле и почве обрабатываемого рудного тела (около 5 %). Такое же увеличение отмечается и для второго главного напряжения σ_2 . Вместе с тем существенное отличие наблюдается в распределении растягивающих напряжений. Учет упругопластических свойств закладки приводит к увеличению в рудном теле области растягивающих напряжений перед фронтом развития очистных работ. Наиболее существенный их рост наблюдается между выработками второй и третьей лент, где значения напряжений достигают 10 МПа.

ВЫВОДЫ

Разработанный метод расчета перераспределения полей напряжений в рудном теле, вмещающем и закладочном массивах по мере развития очистных работ может быть модернизирован для учета упругопластического деформирования закладочного материала. Расчет напряженного состояния рудного тела и вмещающего массива при нелинейном деформировании материала закладки приводит к незначительному повышению уровня сжимающих напряжений в зонах их концентрации. Обращает на себя внимание увеличение зоны действия растягивающих напряжений и их концентрация между очистными выработками второй и третьей лент. Эта область, в которой возможно разрушение массива горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Puchkov L. A. and Zhezhelevsky Yu. A.** Underground mining of mineral deposits, Moscow, Mining book, 2021, vol. 1, 564 pp. [**Пучков Л. А., Жежелевский Ю. А.** Подземная разработка месторождений полезных ископаемых. — М.: Горная книга, 2021. — Т. 1. — 564 с.]
2. **Baklashov I. V., Borisov V. N., Kartoziya B. A., and Shashenko A. N.** Geomechanics, vol. 2. Geomechanical processes, Moscow, Publishing House of Moscow State Mining University, 2021, 249 pp. [**Баклашов И. В., Борисов В. Н., Картозия Б. А., Шашенко А. Н.** Геомеханика. Т. 2. Геомеханические процессы. — М.: Изд-во МГТУ, 2021. — 249 с.]
3. **Kurlenya M. V., Seryakov V. M., and Eremenko A. A.** Technogenic geomechanical stress fields, Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 pp. [**Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.]
4. **Seryakov V. M.** Mathematical modeling of stress-strain state of rock mass in the application of technology with the laying of the developed space, Journal of Mining Science, 2014, no. 5, pp. 51–60. [**Серяков В. М.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при применении технологии с закладкой выработанного пространства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 51–60.]
5. **Kurlenya M. V.** Actual directions and tasks of research on the development of deep-lying mineral deposits in the conditions of Siberia and the Far East, Journal of Mining Science, 2021, no. 4, pp. 3–11. [**Курленя М. В.** Актуальные направления и задачи исследований освоения месторождений полезных ископаемых глубокого залегания в условиях Сибири и Дальнего Востока // ФТПРПИ. — 2021. — № 4. — С. 3–11.]
6. **Kuznetsov S. V., Odintsev V. N., Slonim M. E., and Trofimov V. A.** Methodology for calculating mountain pressure, Moscow, Nauka, 1981, 198 pp. [**Кузнецов С. В., Одинцев В. Н., Слоним М. Э., Трофимов В. А.** Методология расчета горного давления. — М.: Наука, 1981. — 198 с.]
7. **Zenkevich O.** The finite element method in engineering, Moscow, Mir, 1975, 576 pp. [**Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 576 с.]
8. **Fadeev A. B.** The finite element method in geomechanics, Moscow, Nedra, 1987, 224 pp. [**Фадеев А. Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987. — 224 с.]