

УДК 622.831

**РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
С УЧЕТОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТРАБОТКИ И ЗАКЛАДКИ РУДНЫХ ТЕЛ
НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ**

В. М. Серяков

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

Рассмотрены особенности применения на больших глубинах метода расчета напряженного состояния массива горных пород, разработанного для моделирования перераспределения напряжений во вмещающих породах и закладочном массиве по мере развития горных работ. Предложены пути учета упругопластических свойств горных пород и закладки, основанные на использовании матрицы жесткости расчетной системы, сформированной для исходного массива горных пород. Приведен расчет ряда задач, демонстрирующих возможности предлагаемых подходов.

Месторождения, горные породы, напряженное состояние, большие глубины, выработанное пространство, закладка, последовательность горных работ, нелинейное деформирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20210602

Одна из основных тенденций развития горных работ в настоящее время — переход на отработку глубоких горизонтов месторождений [1, 2]. В [1] обоснованы причины такого перехода, сформулированы задачи, предстоящие решать в ближайшее время, намечены подходы к их решению. Важнейшая задача дальнейших исследований — изучение физико-механических свойств горных пород на больших глубинах, определение уровня исходных и техногенных напряжений. Установление закономерностей деформирования горных пород в таких условиях послужит основой для разработки новых физико-технических технологий, позволяющих вести эффективную и безопасную отработку глубокозалегающих месторождений.

Имеющийся опыт отработки запасов полезных ископаемых на значительных глубинах дает основание предполагать, что основной технологией разработки глубокозалегающих месторождений будет технология с использованием закладки выработанного пространства твердеющими смесями или цементированными обрушенными породами [3, 4]. Ее применение на глубоких горизонтах потребует внедрения новых технологических вариантов, учитывающих геомеханические и горнотехнические условия отработки, выбора параметров, позволяющих эффективно вести очистные и закладочные работы. Решение таких задач должно основываться на ис-

следовании напряженно-деформированного состояния массива горных пород, учитывающем особенности предлагаемых вариантов технологий отработки и закладки выработанного пространства. Наиболее важным с механической точки зрения особенностью применения закладки является процесс последовательного заполнения очистных выработок твердеющей смесью, материал которой начинает воспринимать нагрузку и влияет на напряженное состояние окружающих пород лишь на последующих этапах отработки.

В [5] описан метод и предложен алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния горных пород, учитывающий последовательность ведения очистных и закладочных работ, позволяющий моделировать достаточное для практических целей количество технологических операций “проходка выработки – ее закладка”. Алгоритм реализован с помощью метода конечных элементов. Его основная особенность — использование на всех этапах развития горных работ матрицы жесткости расчетной системы, сформированной для массива горных пород перед его отработкой. Однако в данном комплексе все сплошные среды, в том числе и закладка, предполагаются упругими материалами. Такое предположение существенно затрудняет использование программного комплекса для оценки напряженного состояния вмещающего и закладочного массивов в условиях перехода горных работ на большие глубины.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТРАБОТКИ И ЗАКЛАДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Рассмотрим пути развития метода моделирования деформирования породного массива и закладки на больших глубинах, учитывающего последовательность горных работ в условиях действия высокого уровня напряжений. Покажем, что он может без особых трудностей применяться для моделирования упругопластического поведения горных пород.

Для более ясного представления об алгоритмах расчета в условиях больших глубин приведем некоторые сведения о разработанном ранее методе, в основе которого лежит использование процедуры начальных напряжений:

$$[K]\{\delta\} = \{F\} + \{F\}_{\{\sigma^n\}}, \quad \{F\}_{\{\sigma^n\}} = \int_V [B]^T \{\sigma^n\} dv,$$

где $[K]$ — матрица жесткости расчетной системы, отвечающая механическим свойствам нетронутого массива; $\{\delta\}$ — вектор-компонент перемещений узловых точек; $\{F\}$ — вектор узловых сил, соответствующий действующим распределенным и массовым силам; $\{\sigma^n\}$ — вектор начальных напряжений; $[B]$ — матрица, связывающая перемещения узловых точек с деформациями конечного элемента; $\{F\}_{\{\sigma^n\}}$ — вектор начальных узловых сил, соответствующих начальным напряжениям.

Схема применения метода приведена на рис. 1. Расчет ведется с механическими параметрами среды, отвечающими исходному массиву. В случае моделирования деформированного состояния в закладке начальные напряжения определяются как разность между напряжениями, рассчитанными при использовании механических свойств исходного массива (прямая 1), и их значениями, которые соответствуют материалу закладки (прямая 2). Величина начальных напряжений в этом случае обозначена как $\Delta\sigma_i^1$. При моделировании выработки свободной от закладки начальные напряжения считаются равными напряжениям, рассчитанным с помощью исходной матрицы жесткости: $\sigma_i^2 = \sigma_i^1$. В этом случае зависимость между σ_i и ε_i представляет прямая 2', совпадающая с осью $O\varepsilon$.

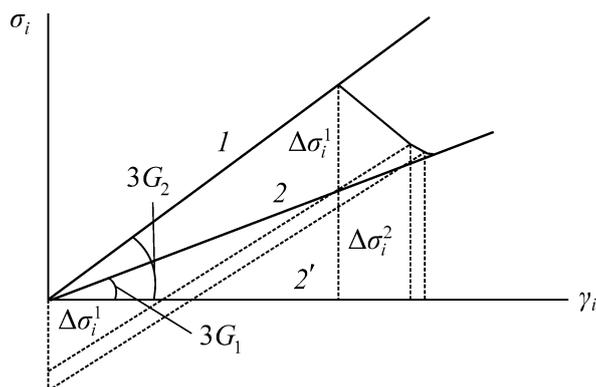


Рис. 1. Схема применения метода начальных напряжений при решении задач деформирования вмещающего и закладочного массивов: 1 — зависимость интенсивности напряжений σ_i от интенсивности деформаций γ_i для исходного массива горных пород; 2, 2' — аналогичная зависимость для закладочного материала и для конечных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

РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

При рассмотрении особенностей деформирования породного и закладочного массивов вокруг выработанных пространств на больших глубинах следует отметить в первую очередь зоны концентрации сжимающих напряжений. В них уровень сжимающих напряжений значительно превосходит пределы упругости горных пород. Теоретические и экспериментальные исследования поведения горных пород при высоком уровне сжимающих напряжений показывают, что для описания их напряженно-деформированного состояния можно использовать соотношения деформационной теории пластичности [6].

Применение разработанного метода для расчета полей напряжений и деформаций не представляет принципиальных трудностей. Предполагая известной зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций для рассматриваемых горных пород, алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния строится стандартным образом. При этом предлагаемая схема применения процедуры начальных напряжений остается неизменной и при моделировании нелинейного поведения вмещающих пород (рис. 2).

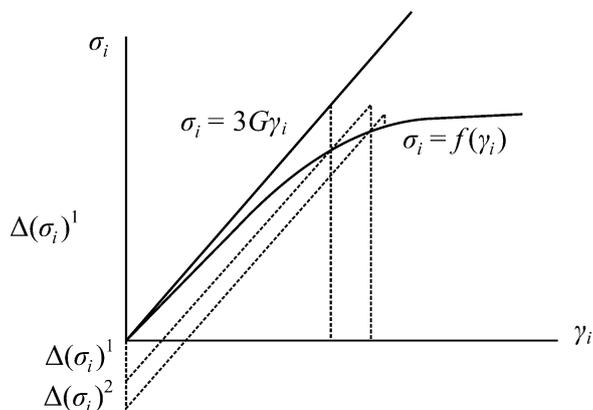


Рис. 2. Схема применения процедуры метода начальных напряжений при учете нелинейного деформирования рудного тела вмещающих пород и закладочного массива

В этом случае начальные напряжения определяются как разность между соответствующими значениями упругого решения с помощью исходной матрицы жесткости $\sigma_i = 3G\gamma_i$ и зависимостью $\sigma_i - \gamma_i$, характеризующей нелинейное поведение пород $\sigma_i = f(\gamma_i)$. Можно считать, что при расчете процесса перераспределения напряженного состояния, вызванного проходкой очередной выработки, будут реализовываться условия простого нагружения и справедливы соотношения деформационной теории малых упругопластических деформаций [7, 8]. Использование этих соотношений при расчете последующих изменений напряженного состояния массива в зонах нелинейного деформирования будет зависеть от характера изменения интенсивности деформаций. Если по сравнению с предыдущими расчетами перераспределения напряженного состояния массива при последовательном образовании и закладке выработок интенсивность деформаций растет, то применяются соотношения деформационной теории пластичности. Если интенсивность деформаций уменьшается, то считается, что в таких областях происходит разгрузка и необходимо использовать соотношения теории упругости.

РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Закладочный материал, заполняющий объем выработок, также может находиться под действием сжимающих напряжений, интенсивность которых превышает порог упругости. В этом случае для расчета нелинейного деформирования закладочного материала используются соотношения деформационной теории пластичности в рамках разработанного метода учета последовательности ведения горных работ. Однако алгоритм расчета нелинейного поведения закладочного материала, учитывающий последовательность ведения очистных и закладочных работ, существенно отличается от алгоритма моделирования упругопластического деформирования вмещающего массива. После проходки очередной выработки и заполнения ее закладкой деформирование закладки будет осуществляться лишь в процессе дальнейшего ведения горных работ.

Таким образом, напряженно-деформированное состояние в объеме закладки, заполняющей очередную выработку, формируется в результате дополнительных смещений, вызванных проходкой последующих выработок. Для этого в алгоритм расчета необходимо ввести модуль, который для каждого элемента закладки, помещаемого в объем очередной выработки, определял бы то поле напряжений, за счет которого в закладке появляются и изменяются соответствующие напряжения и деформации.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВМЕЩАЮЩЕГО И ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА В ЗОНАХ ДЕЙСТВИЯ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Еще одна особенность деформирования и разрушения породного массива на глубоких горизонтах, которую необходимо учитывать при оценке механического состояния горных пород, состоит в существенном различии значений их пределов прочности на растяжение и сжатие. Известно, что в окрестности выработанного пространства формируются зоны концентрации сжимающих напряжений и зоны проявления напряжений растяжения. Так как пределы прочности практически всех горных пород на растяжение существенно меньше соответствующих пределов на сжатие, то нелинейное деформирование пород при увеличении глубины отработки прежде всего будет наблюдаться в зонах растяжения. Соотношения деформационной теории пластичности здесь неприменимы из-за незначительных величин интенсивностей напряжений и деформаций.

Одна из наиболее используемых моделей оценки напряженного состояния массива в зонах действия растягивающих напряжений — модель “среда без растяжения” [9]. Ее физический смысл состоит в том, что при достижении предела прочности на растяжение первым главным напряжением в направлении его действия порода разрушается и первое главное напряжение становится равным нулю. Зависимости модели “среда без растяжения” в случае плоского деформирования приведены на рис. 3. Итерационная процедура метода начальных напряжений впервые применена для реализации модели “среда без растяжения”. Схема ее применения показана на рис. 3б.

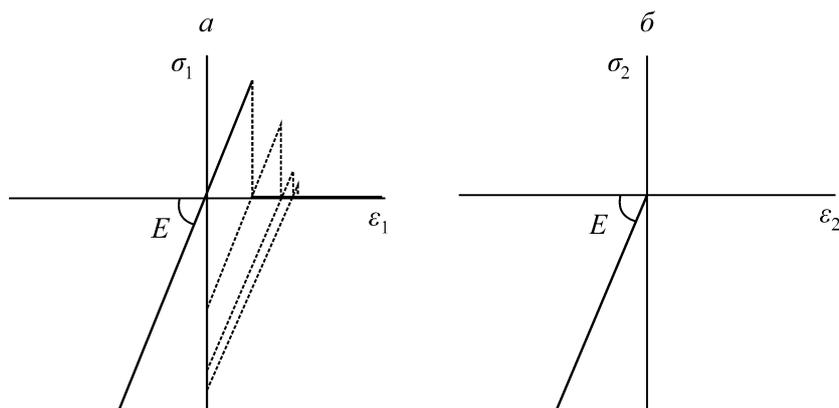


Рис. 3. Зависимости между главными деформациями $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и главными напряжениями σ_1, σ_2 (а, б) для модели “среда без растяжения” в случае плоской деформации

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

Для демонстрации применимости предложенного подхода к определению напряженно-деформированного состояния вмещающего и закладочного массивов на больших глубинах отработки представлены решения ряда задач. На рис. 4 показан один из технологических вариантов отработки рудного тела с восходящим порядком ведения очистных и закладочных работ, используемых при выемке богатых полиметаллических руд [10].

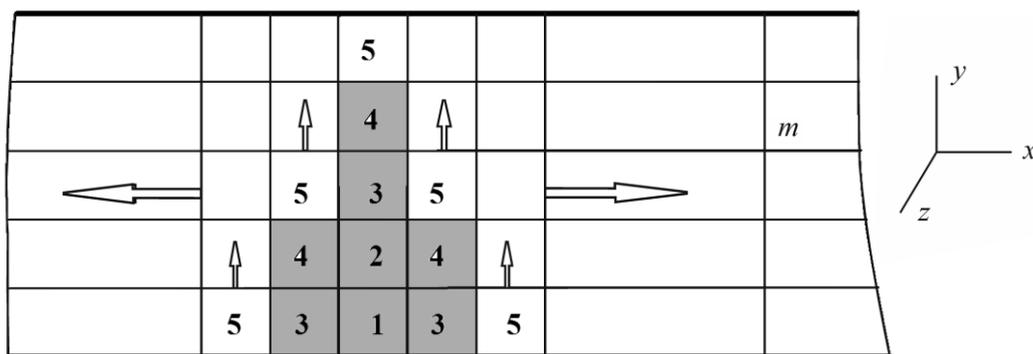


Рис. 4. Последовательность отработки пологопадающего рудного тела при восходящем порядке ведения очистных и закладочных работ: 1–5 — этапы отработки; m — мощность рудного тела; вертикальные стрелки — направление отработки и закладки очередной ленты, горизонтальные — направление развития фронтов горных работ в рудном теле

Отработка рудного тела ведется тремя лентами в каждом направлении симметрично относительно разрезного слоя. Количество показанных на рис. 4 этапов проходки и закладки выработок соответствует числу моделируемых в дальнейшем этапов отработки рудного тела. Так как протяженность рудного тела в направлении оси Oz , как правило, значительна, то при расчетах напряженно-деформированного состояния массива можно рассмотреть схему плоской деформации. Исходное напряженное состояние массива принято следующим: $\sigma_y^0 = -\gamma H$, $\sigma_x^0 = -2\gamma H$, $\tau_{xy}^0 = 0$. Геометрические и физико-механические параметры задачи, используемые в расчетах, таковы: расстояние от верхней границы рудного тела до земной поверхности 800 м; мощность горизонтально залегающего рудного тела 40 м; размеры очистных выработок 8×8 м; модули Юнга и коэффициенты Пуассона рудного тела, вмещающих пород и закладки составляют соответственно 25000 МПа и 0.25, 28000 МПа и 0.20, 2500 МПа и 0.40; объемный вес всех горных пород 0.03 МН/м^3 .

Рассмотрена задача, где напряженное состояние рудного тела и вмещающих пород описывается соотношениями деформационной теории малых упругопластических деформаций. На рис. 5, 6 приведены изолинии распределения первого и второго главных напряжений σ_1 и σ_2 для упругого и упругопластического решений. Предел упругости при нелинейном деформировании пород взят -100 МПа . Нелинейная зависимость $\sigma_i - \varepsilon_i$ также описывалась прямой с тангенсом угла наклона к оси ε_i в 10 раз меньшим, чем соответствующий модуль Юнга.

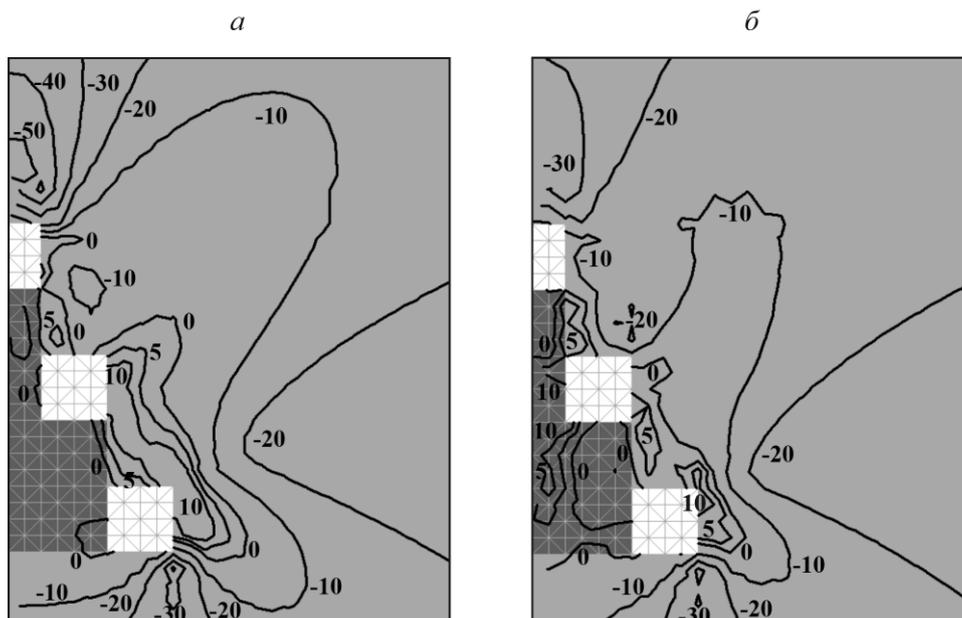


Рис. 5. Распределение первого главного напряжения σ_1 в породном и закладочном массивах после пяти этапов проходки и закладки очистных выработок в случае упругого (а) и упругопластического (б) деформирования вмещающих пород и рудного тела

Упругопластическое деформирование вмещающих пород и рудного тела приводит к значительному изменению напряженного состояния массива перед фронтом развития очистных и закладочных работ. В зонах концентрации напряжений σ_2 и σ_1 уровень сжимающих напряжений уменьшается почти в 2 раза, хотя площадь этих зон существенно не изменяется. Зоны раз-

грузки рудного тела перед фронтом развития очистных и закладочных работ при упругопластическом деформировании пород уменьшаются. Особо четко это проявляется при рассмотрении изолинии со значением -10 в картине распределения напряжений σ_1 и -20 — в картине распределения напряжения σ_2 . Существенно меньшей становится и зона проявления растягивающих напряжений в распределении напряжений σ_1 . Необходимо отметить появление зон концентрации сжимающих напряжений в окрестности выработки, соответствующей выемке рудного тела второй лентой.

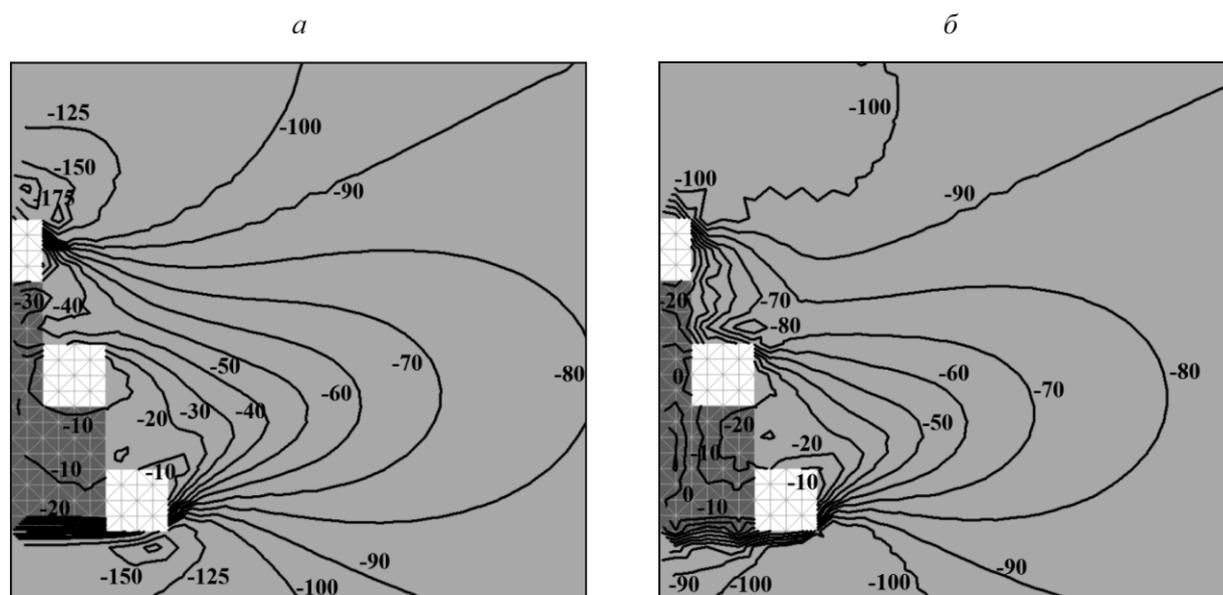


Рис. 6. Распределение второго главного напряжения σ_2 в породном и закладочном массивах после пяти этапов проходки и закладки очистных выработок в случае упругого (а) и упруго-пластического (б) деформирования вмещающих пород и рудного тела

Меняется и напряженное состояние закладочного массива. Уменьшение уровня нагрузки, действующей на вмещающие породы и рудное тело, приводит к повышению сжимающих и растягивающих напряжений в массиве закладки. Так как многие технологические варианты отработки рудных тел предполагают проходку и поддержание выработок, необходимо более детальное рассмотрение процесса формирования и перераспределения напряжений в закладочном массиве [11, 12]. Это можно осуществить, используя соответствующие модели упругопластического деформирования и разрушения горных пород.

Рассмотрена задача, когда перераспределение напряженного состояния массива по сравнению с упругим решением происходит за счет применения в зонах концентрации растягивающих напряжений в рудном массиве и вмещающих породах модели “среда без растяжения”. На рис. 7 показаны эпюры распределения первого главного напряжения в случае упругого и нелинейного деформирования вмещающих пород и рудного тела. В качестве предельного растягивающего напряжения выбрано значение 5 МПа. Разрушение пород за счет действия предельных напряжений приводит в зонах растяжения к некоторому изменению их уровня (рис. 7а). В областях концентрации сжимающих напряжений σ_1 уровень напряженного состояния практически не изменяется. Так же не изменяется и распределение второго главного

напряжения. Нелинейное деформирование вмещающего массива и рудного тела более существенным образом сказывается на закладочном массиве. Здесь формируется незначительная зона действия растягивающих напряжений.

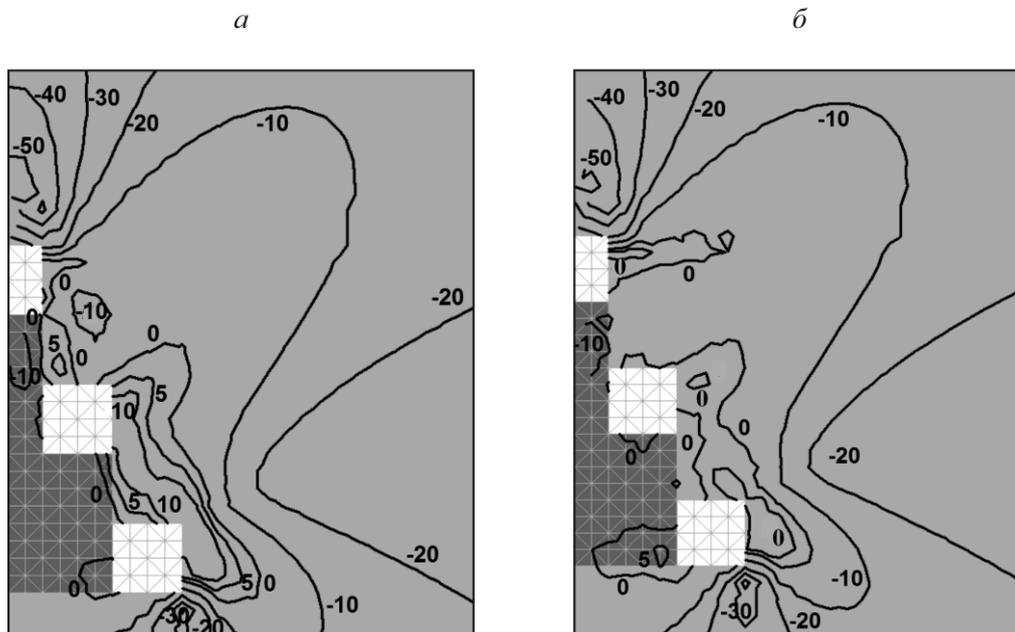


Рис. 7. Распределение первого главного напряжения σ_1 в рудном теле, породном и закладочном массивах после пяти этапов проходки и закладки очистных выработок в случае упругого (а) и нелинейного (б) деформирования вмещающих пород и рудного тела

Принимая во внимание тот факт, что пределы прочности горных пород на растяжение значительно ниже, чем на сжатие, можно заключить, что нелинейное деформирование рудного тела и вмещающих пород будет прежде всего проявляться в зонах действия растягивающих напряжений на сравнительно малых глубинах. Однако, как показывают расчеты, на малых глубинах учет нелинейного деформирования горных пород в зонах растяжения можно не проводить.

ВЫВОДЫ

Разработанные ранее метод расчета и программный комплекс для моделирования перераспределения полей напряжений в массиве горных пород по мере развития очистных и закладочных работ модернизированы для учета упругопластического деформирования вмещающих пород, рудного тела и закладочного массива.

Процедура метода начальных напряжений может применяться для моделирования нелинейного деформирования породного и закладочного массивов в зонах концентрации сжимающих напряжений с использованием соотношений деформационной теории пластичности. В зонах действия растягивающих напряжений разработанный ранее метод расчета допускает использование модели “среда без растяжения”.

Моделирование нелинейного поведения массива горных пород в зонах действия растягивающих напряжений целесообразно проводить на больших глубинах совместно с расчетом упругопластического деформирования пород в зонах концентрации предельных сжимающих напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Еременко А. А., Шрепп Б. В. Геомеханические проблемы разработки железорудных месторождений Сибири. — Новосибирск: Наука, 2001. — 184 с.
2. Казикаев Д. М. Геомеханика подземной разработки руд. — М.: Горн. кн., 2009. — 542 с.
3. Лизункин М. В. Обоснование геотехнологий подземной разработки сложноструктурных рудных месторождений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Чита, 2021. — 48 с.
4. Марысюк В. П., Сабянин Г. В., Андреев А. А., Васильев Д. А. Оценка напряженного состояния рудного массива при ведении очистных работ на глубоких рудниках Талнаха // Горн. журн. — 2020. — № 6. — С. 17–23.
5. Серяков В. М. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при применении технологии с закладкой выработанного пространства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 51–60.
6. Глушко В. Т., Виноградов В. В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. — М.: Недра, 1982. — 193 с.
7. Ильющин А. А. Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации. — М.; Л.: ОГИЗ, 1948. — 376 с.
8. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1975. — 400 с.
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 542 с.
10. Бронников Д. М., Замесов Н. Ф., Богданов Г. И. Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982. — 292 с.
11. Крупник Л. А., Шапошник Ю. Н., Шапошник С. Н., Турсунбаева А. К. Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 95–105.
12. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.

Поступила в редакцию 08/X 2021

После доработки 10/XI 2021

Принята к публикации 11/XI 2021