

УДК 622.831

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЙ  
С ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА**

**В. М. Серяков**

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

Рассматриваются разработанные в ИГД СО РАН постановки и методы решения задач расчета напряженно-деформированного состояния вмещающего и закладочного массивов при ведении очистных работ в условиях заполнения выработанного пространства твердеющими смесями. Показано, что эффективные алгоритмы расчета могут быть получены на основе использования расчетной области, отвечающей массиву горных пород до проведения в нем очистных и подготовительных выработок. Процесс формирования и последующего заполнения выработок закладочным материалом моделируется с помощью применения итерационных процедур методов начальных напряжений и начальных деформаций. Установлена сходимість предложенных итерационных процедур. Приведены примеры решения практических задач. В рамках разработанных методов и алгоритмов предложены пути решения вопросов учета неполноты заполнения выработанного пространства твердеющими смесями, реологических свойств закладочного массива и вмещающих пород.

*Массив горных пород, напряжения, деформации, месторождения, выработки, последовательность отработки, закладка выработанного пространства, матрица жесткости, начальные напряжения, начальные деформации, алгоритм расчета, рудное тело, нисходящий и восходящий порядок отработки, “недозаклад”, контактные условия*

**ВВЕДЕНИЕ**

Увеличение глубины отработки месторождений, освоение запасов, залегающих в сложных горно-геологических условиях, вызывает необходимость детальной оценки напряженного состояния породного массива в районах ведения горных работ [1, 2]. Такая оценка требует учета последовательности отработки запасов полезных ископаемых, поскольку практикой горных работ установлено значительное влияние порядка ведения очистных и закладочных работ на напряженно-деформированное состояние горных пород [3].

При теоретическом исследовании напряженного состояния массива возникает вопрос о постановке задач механики горных пород, применение которых обеспечивает определение напряжений и деформаций с учетом порядка развития горных работ, т. е. последовательности образования выработок. В настоящее время в большинстве задач расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг очистных пространств к расчетной об-

ласти с известной геометрией выработанного пространства и заданными механическими свойствами составляющих ее подобластей прикладываются внешние нагрузки, соответствующие исходному напряженному состоянию массива [4]. Такая постановка исключает возможность учета последовательности развития горных работ. В этом случае напряженно-деформированное состояние, вычисленное для некоторой геомеханической ситуации, не будет зависеть от того, в какой последовательности шло образование выработанных пространств.

Единственным силовым фактором, проявляющимся при образовании горных выработок, являются снимаемые по их контуру нормальные и касательные напряжения, действующие здесь до начала горных работ [5]. Это обстоятельство нашло свое отражение при формулировке краевых задач механики горных пород в “дополнительных” напряжениях, позволяющих найти перемещения, напряжения и деформации, соответствующие процессу образования выработки. Величины усилий на контуре выработки выбираются таким образом, чтобы в каждой его точке сумма нормальных и касательных компонент исходного и дополнительного полей напряжений равнялась нулю [6]. Эти величины и будут соответствовать снимаемым по контуру нормальным и касательным напряжениям.

#### **ПОСТАНОВКА КРАЕВЫХ ЗАДАЧ, УЧИТЫВАЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫРАБОТОК**

Рассмотрим более общую формулировку краевых задач механики горных пород, относящуюся к определению напряженно-деформированного состояния массива горных пород при последовательном образовании в нем очистных и подготовительных выработок [7]. Пусть известно начальное напряженное состояние массива  $\{\sigma_{ij}\}$   $i, j = 1, \dots, 3$ , сформированное в нем до проведения первой выработки. Создание выработки приведет к появлению свободной от нагрузки поверхности  $\Gamma_1$ , на которой нормальная и касательная компоненты вектора усилий равны нулю. Освобождение границ выработки от усилий, т. е. создание свободной от усилий поверхности, означает изменение нормальных  $\sigma_n$  и касательных  $\tau_n$  напряжений от их начального значения до нуля.

Если закон изменения нагрузок известен, то, используя соответствующие механико-математические модели среды, можно определить напряженно-деформированное состояние массива после проведения в нем первой выработки. Выработанное пространство в дальнейшем может оставаться свободным или заполняться обрушенными породами или закладочным материалом. Если массив горных пород проявляет незначительные реологические свойства, то напряжения в материале, заполняющем выработанное пространство, появятся лишь после образования следующей выработки. Как и ранее, образование второй выработки приведет к уменьшению соответствующих значений нормальной и касательной компоненты вектора усилий до нуля. При известном законе изменения нагрузки на контуре второй выработки можно определить напряженное состояние массива после ее образования. Особенностью задачи на этом этапе решения является появление в выработанном пространстве второй выработки закладочного материала или обрушенных пород. Далее описанный процесс повторяется: вторая выработка заполняется закладочным или обрушенным материалом; от усилий освобождается контур следующей выработки. Если порядок образования выработок задан, то, применяя изложенный подход, можно определить напряженно-деформированное состояние массива горных пород с учетом последовательности образования выработок.

Фактически закон изменения напряжений на контуре выработки установить трудно, поэтому при решении возникающих задач обычно предполагается, что породный и закладочный массивы ведут себя упруго. В этом случае напряженно-деформированное состояние массива гор-

ных пород можно получить с помощью решения ряда задач теории упругости [8, 9]. Характер изменения напряжений на границах выработок в этом случае не важен, и образование первой выработки в исходном массиве будет соответствовать следующим изменениям напряжений:

$$\sigma_{ij}^1 n_j \Big|_{\Gamma_1} = 0 - \sigma_{ij}^0 n_j = -\sigma_{ij}^0 n_j \Big|_{\Gamma_1} .$$

Здесь индекс “1” относится к дополнительному полю перемещений  $\sigma_{ij}^1$ , вызванному проведением первой выработки;  $\sigma_{ij}^0$  — начальное напряженное состояние.

Суммируя  $\{\sigma_{ij}^1\}$  с начальным напряженным состоянием, получаем полные напряжения массива

$$\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{ij}^0\} + \{\sigma_{ij}^1\} .$$

Следующая задача теории упругости состоит в определении дополнительного поля напряжений  $\{\sigma_{ij}^2\}$ , вызванного проведением второй выработки, с граничными условиями на ее контуре  $\Gamma_2$ :

$$\sigma_{ij}^2 n_j \Big|_{\Gamma_2} = -\sigma_{ij} n_j \Big|_{\Gamma_2} .$$

После этого этапа решения в массиве горных пород

$$\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{ij}^0\} + \{\sigma_{ij}^1\} + \{\sigma_{ij}^2\} ,$$

в материале, заполняющем выработанное пространство,

$$\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{ij}^2\} .$$

После проведения третьей выработки в массиве горных пород будут действовать напряжения

$$\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{ij}^0\} + \{\sigma_{ij}^1\} + \{\sigma_{ij}^2\} + \{\sigma_{ij}^3\}$$

в области первой выработки, заполненной закладочным материалом

$$\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{ij}^2\} + \{\sigma_{ij}^3\} ,$$

а в области второй выработки, также заполненной закладочным материалом,

$$\{\sigma_{ij}\} = \{\sigma_{ij}^3\} .$$

Таким же образом можно получить решение для любого количества выработок.

#### **ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ О НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ ПОРОДНОГО МАССИВА С УЧЕТОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТРАБОТКИ**

При использовании изложенного подхода необходимо выделение контура вновь создаваемой выработки и вычисление действующих на нем компонент поля напряжений. Реализация такого алгоритма, во-первых, связана с большими техническими трудностями, обусловленными заданием контуров последовательно создаваемых выработок и вычислением на них узловых сил. Во-вторых, при численном решении требуется аппроксимация компонент напряжений на границах последовательно создаваемых выработок между точками расчетной сетки. Как показывают расчеты, применение любой аппроксимации напряжений между узлами расчетной сетки быстро приводит к накоплению ошибок и к невозможности продолжения процесса расчета [1, 2, 7].

Для преодоления возникающих трудностей предлагается всю расчетную область, включая и подобласти размещения отработанных очистных пространств, разбить на конечные элементы. Механические свойства элементов, расположенных в отработанном очистном пространстве, положить теми же, что и были в них до образования выработок, т. е. расчетная область будет моделировать нетронутый массив горных пород. В качестве условия, которое отражает факт образования некоторой выработки, принять обращение в ноль в соответствующих данной выработке элементах всех компонент тензора напряжений [8].

Для выполнения условия предлагается использовать итерационный метод начальных напряжений [10]. Так как исходные напряжения в массиве известны, то в конечных элементах, соответствующих отработанному очистному пространству, 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 напряжениям в этом же элементе.

Модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ , используемые при расчетах напряженного состояния массива в закладочном материале, отличны от аналогичных характеристик рудного тела и вмещающих пород. Следовательно, при моделировании последовательности образования и закладки выработок на каждом этапе потребуются изменять механические свойства части расчетной области и формировать новую матрицу жесткости системы. Разработка такого алгоритма в случае определения дополнительных напряжений с помощью подхода, изложенного в [8], не представляет затруднений и может быть достаточно просто реализована. Однако в этом случае теряется главное преимущество разработанного метода, состоящее в неизменяемости матрицы жесткости в процессе расчета.

Для преодоления сложившейся ситуации разработан алгоритм учета последовательности отработки, в котором при любых механических свойствах закладочного материала используется одна и та же матрица жесткости системы [9]. Итерационный процесс нахождения решения при упругом деформировании закладочного материала и горных пород строится следующим образом. Деформации  $\varepsilon_{ij}$  в конечных элементах, моделирующих закладочный массив, рассчитанные с помощью матрицы жесткости, соответствующей исходному массиву горных пород, полагаются истинными. По закону Гука определяются напряжения  $\sigma_{ij}^*$ , которые должны были действовать в элементах, если бы они имели механические свойства закладочного материала. Разности напряжений  $\sigma_{ij}^*$  и  $\sigma_{ij}$ , где  $\sigma_{ij}$  получены с использованием неизменяемой матрицы жесткости, рассматриваются как начальные напряжения. Далее применяется алгоритм метода начальных напряжений. Вектор начальных узловых сил добавляется к вектору внешних нагрузок. Определяется новое деформированное состояние массива горных пород. Полагая, что полученные деформации верны, описанная выше процедура повторяется. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока два последующих приближения не станут различаться на заданную малую величину. Тестовые расчеты показали быструю сходимость метода и возможность получения с его помощью решения рассмотренных задач.

#### ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Рассмотрим применение разработанных методов и вычислительного комплекса при определении напряженно-деформированного состояния закладочного и вмещающего массивов, соответствующего технологическим схемам ведения очистных работ с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями в пологопадающем рудном теле. Наиболее исполь-

зубыми вариантами ведения горных работ в этом случае являются нисходящий и восходящий порядки возведения закладочного массива (рис. 1). При математическом моделировании этих вариантов приняты следующие механические параметры рудного тела, вмещающего и закладочного массивов: модуль Юнга  $E = 75000, 60000$  и  $7500$  МПа; коэффициенты Пуассона  $\nu = 0.25, 0.2$  и  $0.4$ . Объемный вес пород  $\gamma$  принят одинаковым и равным  $0.03 \text{ МН/м}^3$ . Исходное напряженное состояние определяется следующими соотношениями:  $\sigma_x^0 = -2\gamma H$ ;  $\sigma_y^0 = -\gamma H$ ;  $\tau_{xy} = 0$ . Глубина ведения очистных работ  $H = 750$  м.

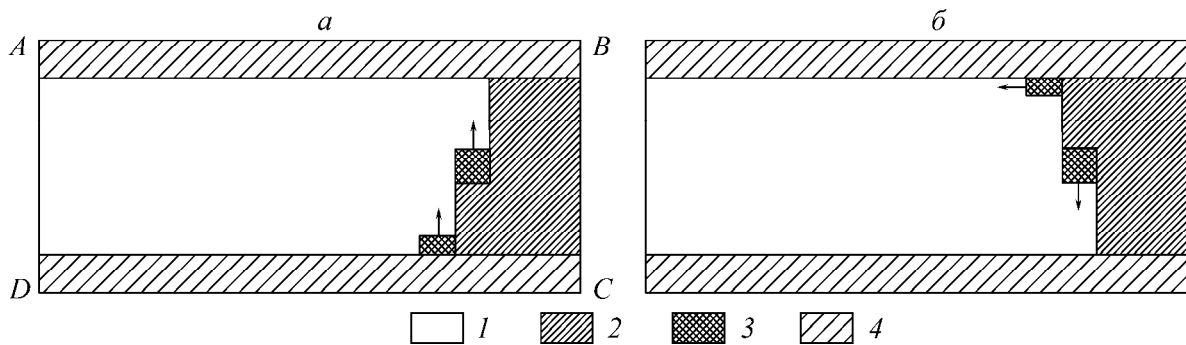


Рис. 1. Схема ведения очистных и закладочных работ: а — восходящий; б — нисходящий порядок выемки рудного тела; 1 — рудное тело; 2 — закладочный массив; 3 — выработки; 4 — вмещающие породы

На рис. 2, 3 представлены некоторые результаты расчетов напряженного состояния вмещающего и закладочного массивов с использованием восходящего и нисходящего порядка закладки очистного пространства твердеющими смесями при пролете отработки 40 м.

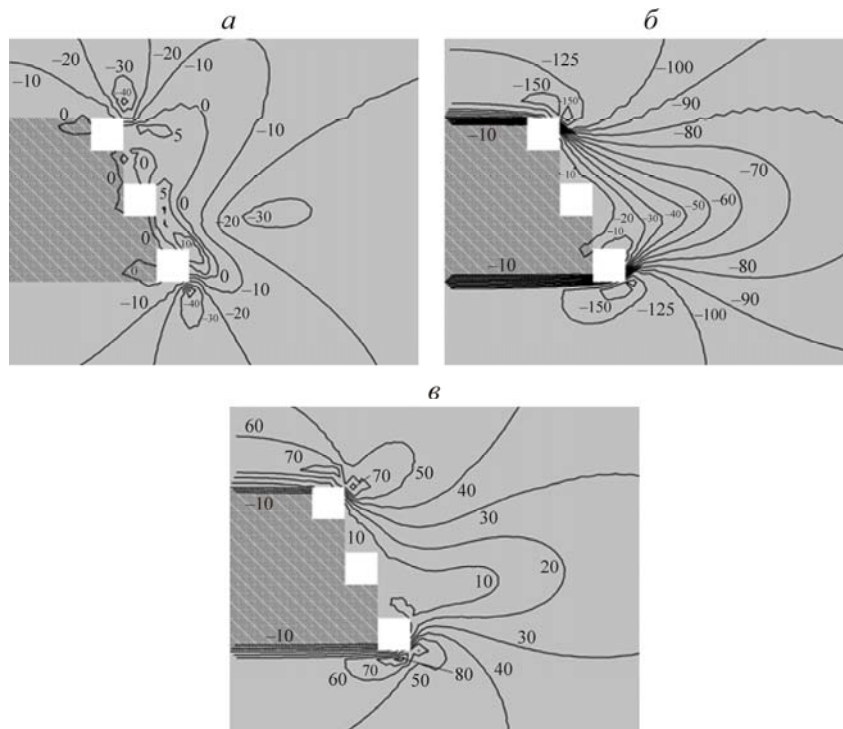


Рис. 2. Характер распределения главных нормальных напряжений (МПа) в закладочном и вмещающем массивах при применении восходящего порядка отработки и пролете выработанного пространства 40 м:  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б),  $\tau_{max}$  (в)

Выемка рудного тела ведется тремя лентами с отставанием работ в каждой ленте на два слоя. Размеры образуемых, а затем закладываемых выработок на каждом этапе расчета  $8 \times 8$  м. Мощность рудного тела составляет 40 м, поэтому моделирование отработки одной ленты происходит за пять этапов расчета.

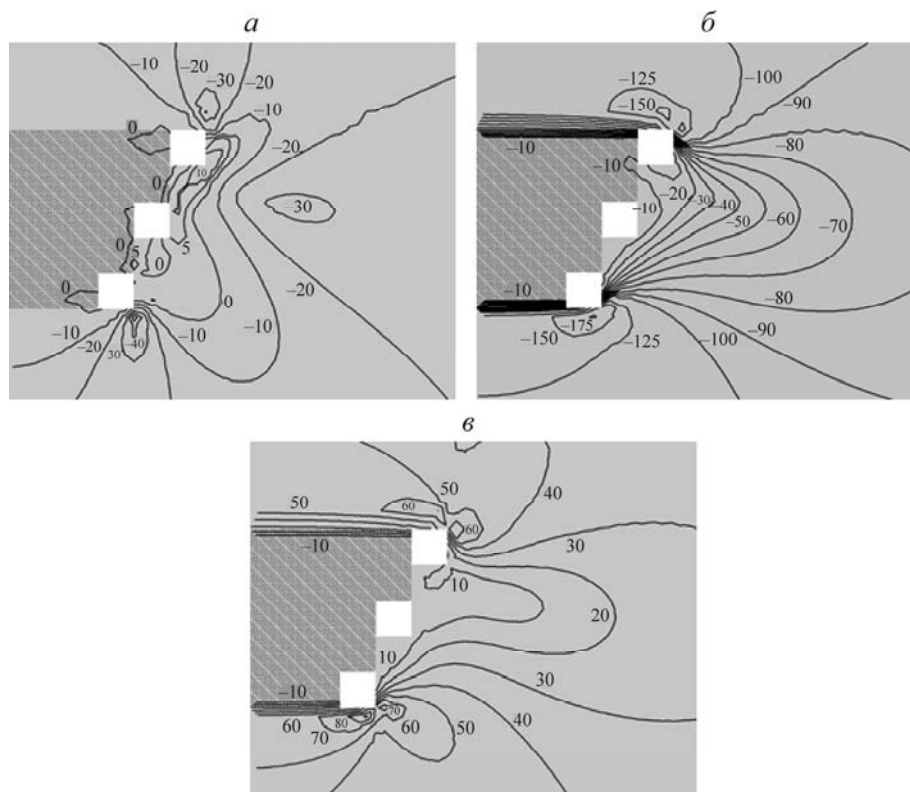


Рис. 3. Характер распределения главных нормальных напряжений (МПа) в закладочном и вмещающем массивах при применении нисходящего порядка отработки и пролете выработанного пространства 40 м:  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б),  $\tau_{\max}$  (в)

Характер распределения главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  вне закладочного массива качественно совпадает для обоих вариантов отработки. В закладочном массиве формируется симметричная картина распределения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  относительно направления ведения очистных работ. Уровень напряжений в закладочном массиве по сравнению с окружающими породами невелик и их значения не превышают 1 МПа. К наиболее существенной особенности геомеханического состояния массива, вносимой учетом последовательности ведения очистных и закладочных работ, следует отнести образование зоны действия растягивающих напряжений в закладке. Детальный анализ компонент тензора напряжений показывает, что направление действия растягивающих напряжений близко к горизонтальному направлению. Хотя растяжения имеют значения менее 0.1 МПа, их наличие говорит о сложном напряженном состоянии закладочного массива, которое следует принимать во внимание при размещении здесь в дальнейшем выработок различного назначения.

Оценить характер перераспределения геомеханического состояния рудного тела, вмещающих пород и закладочного массива позволяет рис. 4, на котором показаны изолинии главных нормальных  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и максимальных касательных  $\tau_{\max}$  напряжений при пролете отработки 120 м в случае ведения работ в восходящем порядке. В закладочном массиве, несмотря на значительный пролет

отработки, сохраняются низкие значения напряжений, уровень которых не превосходит 1 МПа. Здесь по-прежнему действуют растягивающие напряжения (рис. 4а). В зонах концентрации сжимающих усилий (рис. 4б) происходит рост напряжений, что свидетельствует о продолжающемся деформировании закладочного массива в процессе отработки.

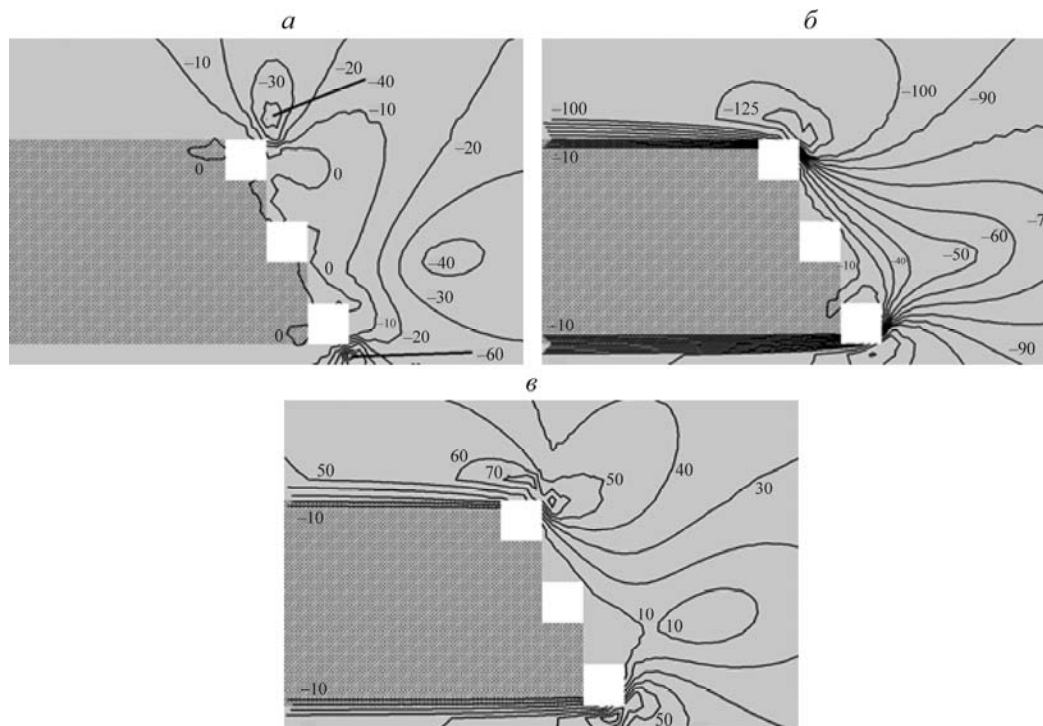


Рис. 4. Напряженное состояние массива (МПа) в окрестности района ведения очистных и закладочных работ при применении восходящего порядка отработки и пролете выработанного пространства 120 м:  $\sigma_1$  (а),  $\sigma_2$  (б),  $\tau_{\max}$  (в)

Сравнение результатов расчетов геомеханического состояния массива при использовании постановки, учитывающей последовательность ведения очистных и закладочных работ, с традиционным подходом показывает, что последний дает заниженные значения напряжений сжатия в зонах их концентрации. Различия могут достигать 50 %. В закладочном массиве различие напряжений более существенно. Сжимающие значения нормальных главных напряжений при использовании традиционного подхода на порядок выше, чем при учете последовательности отработки и закладки рудного тела.

#### О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОДНОГО И ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВОВ

Приведенные разработки основаны на идее одноразового формирования матрицы жесткости расчетной системы для геомеханического состояния массива, существующего в нем до начала ведения очистных работ. Все особенности механических процессов формирования выработок и последующего их заполнения твердеющим материалом моделируются методами начальных напряжений и начальных деформаций, реализация которых связана с изменением лишь правой части решаемой системы линейных уравнений. В разработанных алгоритмах на каждом этапе образования очередной выработки и заполнения ее закладочным материалом используется условие жесткого контакта твердеющей закладки с вмещающим массивом. Однако опыт отработки пологопадающих месторождений показывает, что существенным фактором, влияющим на напряженное

состояние вмещающих пород и закладочного массива, является неполнота заполнения выработанного пространства твердеющими смесями. Контакт между налегающими породами и сформированной частью закладочного массива наступает при достижении пролетом отработки определенного значения, что существенным образом сказывается на характере распределения полей напряжений и деформаций как во вмещающих породах, так и в закладочном массиве.

Математическое моделирование “недозаклада” выработанного пространства твердеющими смесями на основе разработанных ранее алгоритмов и программ расчета напряженно-деформированного состояния пород предполагает использование матрицы жесткости расчетной системы, сформированной для исходного массива. Покажем, что это возможно при применении метода, разработанного для расчета контакта границ почвы и кровли выработанного пространства в условиях отработки пластовых месторождений [11]. Предлагается следующий порядок расчета.

1. При разбиении расчетной области на конечные элементы в рудном теле на границе его контакта с вмещающими породами формируется слой элементов высотой  $h$ , равной “недозакладу” выработанного пространства.

2. Слой конечных элементов наделяется физико-механическими свойствами рудного тела. Если очистные работы еще не охватили область рудного тела, в которой расположен слой элементов, то напряженно-деформированное состояние в них определяется как в породах, имеющих свойства рудного тела.

3. При попадании элементов сформированного слоя в объем очередной образуемой выработки напряжения в этих элементах в соответствии с построенным ранее алгоритмом обращаются в ноль.

4. После заполнения закладочным материалом выработки, верхняя граница которой контактирует с налегающей толщей, в выделенном слое конечных элементов начинает осуществляться контроль взаимного смещения верхней и нижней границ этого слоя. Условием контакта границ считается взаимное смещение, равное высоте выделенного слоя  $h$ . Нормальная деформация слоя в этом случае принимает значение, равное  $-1$ .

5. При увеличении пролета отработки контакт вмещающего массива и верхней границы закладочного материала обеспечивается применением метода начальных деформаций, схема реализации которого приведена на рис. 5. Для сравнения здесь же приведена схема моделирования контактного взаимодействия границ слоистого массива.

Соотношения для определения вектора начальных узловых сил при расчете контакта вмещающего массива и верхней границы закладочного материала имеют вид [11]:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/(2(1-\nu)) \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} =$$

$$= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} \nu/(1-\nu)\varepsilon_y \\ \varepsilon_y \\ 0 \end{Bmatrix}.$$

Разработанный алгоритм учета неполноты заполнения выработанного пространства твердеющими смесями использован при подготовке программного комплекса. В качестве примера расчета выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния массива при отработке пологопадающего пласта полезного ископаемого. Расчеты выполнены для следующих условий отработки. Пласт полезного ископаемого мощностью 8 м залегает на глубине 500 м. Размеры очистных



выработок  $8 \times 8 \text{ м}^2$ . Величина “недозаклада” принята равной  $0.1 \text{ м}$ . Механические свойства вмещающих пород: модуль Юнга  $E = 75000 \text{ МПа}$ , коэффициент Пуассона  $\nu = 0.25$ , объемный вес  $\gamma = 0.03 \text{ МН/м}^3$ . Для обрабатываемой залежи:  $E = 90000 \text{ МПа}$ ;  $\nu = 0.28$ ;  $\gamma = 0.03 \text{ МН/м}^3$ . На боковых 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:  $\sigma_x^0 = \nu \gamma H / (1 - \nu)$ ;  $\sigma_y^0 = \gamma H$ ;  $\tau_{xy}^0 = 0$ , и реализуются в регионах, где отсутствует тектоника. Здесь  $\sigma_x^0$ ,  $\sigma_y^0$ ,  $\tau_{xy}^0$  — нормальные и касательная компоненты тензора напряжений;  $H$  — 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  $v$  и касательная компонента тензора напряжений  $\tau_{xy}$ . При таких условиях левую вертикальную границу расчетной области можно считать плоскостью симметрии.

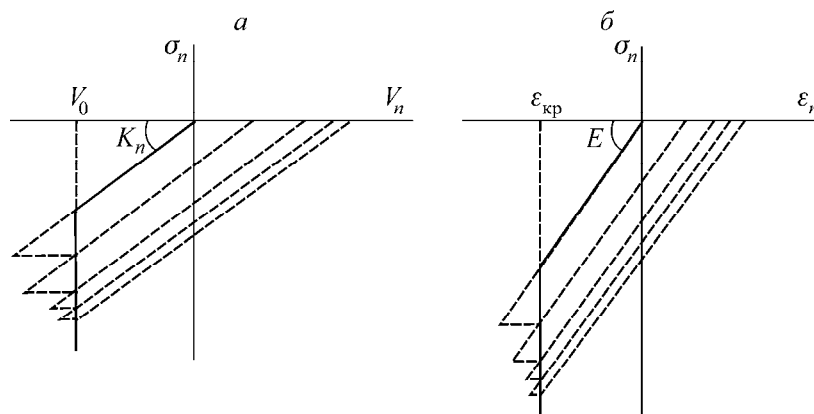


Рис. 5. Схемы моделирования контактного взаимодействия породных слоев (а) и расчета контакта налегающей толщи и закладочного массива (б):  $K_n$  — жесткость контакта на сжатие;  $E$  — модуль Юнга элемента в выработанном пространстве;  $V_0$ ,  $\epsilon_{кр}$  — предельные значения взаимного смещения границ контакта слоев и деформаций элементов, моделирующих “недозаклад” выработанного пространства

На рис. 6 приведены значения нормальной к плоскости пласта деформации  $\epsilon_n$  в элементах выделенного слоя при пролете отработки  $70 \text{ м}$ . При небольших пролетах (до  $30 \text{ м}$ ) контакта вмещающих пород с закладкой не происходит:  $\epsilon_n$  во всех элементах, попавших в зону отработки, больше  $-1$ . Увеличение пролета отработки приводит к выполнению условий контакта границ закладочного массива и вмещающих пород ( $\epsilon_n < -1$ ). Сначала контакт реализуется в элементах, расположенных на плоскости симметрии, затем последовательно распространяется на другие элементы. В соответствии с предложенным алгоритмом во всех элементах, где выполняются условия контакта, значение  $\epsilon_n$  должно быть равно  $-1$ .

Согласно рис. 6, это условие интегрально выполняется на всех этапах отработки. Представленный график соответствует 20-й итерации. Число итераций, необходимое для практической сходимости итерационного процесса, зависит от пролета отработки и колеблется от  $50$  до  $100$ . С механической точки зрения учет контактного взаимодействия границ закладочного массива и вмещающих пород приводит к росту значений нормальных к плоскости пласта напряжений как в закладочном массиве, так и во вмещающих породах.



Рис. 6. Изменение нормальной к плоскости пласта деформации в элементах, моделирующих неполноту заполнения выработанного пространства закладочным материалом, вдоль оси  $Ox$  при пролете отработки 70 м

## ВЫВОДЫ

В рамках упругого деформирования рудного тела, закладочного и вмещающего массивов, жесткого контакта закладки с вмещающими породами предлагаемые методы и алгоритмы позволяют осуществлять моделирование напряженно-деформированного состояния массива при развитии очистных и закладочных работ на месторождениях, обрабатываемых с применением твердеющей закладки. Возможности разработанного метода таковы, что с его помощью реально проведение механической оценки вариантов отработки месторождений, включающих многие десятки и даже сотни технологических циклов “проходка выработки – ее закладка”.

Показана возможность использования метода начальных деформаций для моделирования нелинейного взаимодействия налегающих пород с закладочным массивом, получены зависимости для вычисления вектора начальных узловых сил, разработан соответствующий алгоритм, проведены тестовые расчеты.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005.
2. Кузнецов С. В., Одинцев В. Н., Слоним М. Э., Трофимов В. А. Методология расчета горного давления. — М.: Наука, 1981.
3. Бронников Д. М., Замесов Н. Ф., Богданов Г. И. Разработка руд на больших глубинах. — М.: Недра, 1982.
4. Комиссаров С. Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных пространств. — М.: Наука, 1976.
5. Родин И. В. Снимаемая нагрузка и горное давление // Исследование горного давления. — М.: Госгортехиздат, 1960.
6. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989.
7. Баймбетов М. О., Серяков В. М. Влияние порядка ведения очистных и закладочных работ на напряженно-деформированное состояние месторождений // ФТПРПИ. — 1984. — № 4.
8. Серяков В. М. Расчет напряженного состояния горных пород с учетом последовательности возведения закладочного массива // ФТПРПИ. — 2001. — № 5.
9. Серяков В. М. Реализация метода расчета напряженного состояния горных пород, учитывающего порядок возведения закладочного массива // ФТПРПИ. — 2008. — № 5.
10. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
11. Курленя М. В., Серяков В. М. Геомеханическое состояние горного массива с учетом последовательности отработки // Проблемы геотехнологии и недроведения: сб. докл. междунар. конф. ИГД УрО РАН. — Екатеринбург, 1998.

Поступила в редакцию 22/VIII 2014