Записки Ленинградского горного института им. Г.В.Плеханова
Т. 123. Л., 1990

УДК 622.27

Т.А.КАЗАКОВА, Е.Д.КОЧЕТКОВ, С.Н.СУГЛОБОВ

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Обеспечение прочности, надежности, экономичности горно-технических систем требует всестороннего учета действующих нагрузок. При определении напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород классическими методами, предполагается, что действующая нагрузка прилагается после того, как сооружение приобрело окончательную форму. Величины, рассчитанные в субъективно принятых наихудших условиях нагружения, переносятся на ранние этапы горных работ, находящиеся в более благоприятных условиях. Таким образом, вся система большую часть времени существует с заведомо завышенным коэффициентом запаса, что экономически нецелесообразно. Поведение горно-технической системы интересует исследователей не только в конце отработки, но и на любом промежуточном этапе. Показательной в данном отношении является система разработки месторождений с твердеющей, бетонной или другой грузонесущей закладкой.

При реальных темпах ведения очистных и закладочных работ для них характерно постепенное наращивание новых, искусственных опор, вступающих в силовое взаимодействие с рудным и породным массивом. Для этих систем можно выделить элементарный технологический цикл – выемка и закладка единичного объема. Отработка месторождения состоит из последовательности таких циклов. Технологическая последовательность работ рассматривается как набор квазистатических состояний. Считается [4, 6], что происходит мгновенная выемка всей подлежащей экскавации области массива полезного ископаемого и одновременное введение закладки во всю выработанную область. К получившейся таким образом неоднородной среде прикладывается нагрузка, в результате чего в этой среде происходит изменение НДС.

Единичный объем закладки вводится в выработанное пространство, когда геомеханические процессы, вызванные выемкой данного объема стабилизированы, и он не испытывает нагрузок до выемки следующего объема. Введение элементов, еще не испытавших нагрузок и деформаций, ставит НДС системы порода – закладка в прямую зависимость от последовательности работ, предшествующих рассматриваемому моменту времени. Каждый цикл работ (с определенной степенью детализации цикличности: в пределах забоя, участка, залежи, месторождения), вызывает в массиве комплекс геомеханических процессов –

ерераспределение напряжений, деформаций, смещения и разрушения пород, .е. изменяется НДС системы.

Несмотря на многочисленные публикации [4, 5, 7] о неоспоримых преимуществах цикличных расчетов, ни в одной из них не представлены алгоритмы решения задач и конкретные способы задания граничных условий. В данной работе рассматривается реализация принципа технологической последовательности на математической модели с использованием метода конечных элементов МКЭ). В одном из вариантов МКЭ, известном как метод перемещений, основные соотношения получаются на основе минимизации полной потенциальной энергии системы, выраженной через поле перемещений [2, 6].

Последовательность проведения расчетов на ЭВМ следующая:

I – назначение узлов, в которых определяются перемещения, и в соответствии с этим разбивка исследуемого объекта на конечные элементы;

2 – построение матриц жесткости элементов, определяющих соотношение между перемещением узлов и силовыми воздействиями;

3 – построение матрицы жесткости системы, отражающей равновесие и совместность элементов всей области при ее деформировании;

4 – определение значений разрешающих функций в узлах;

5 – нахождение напряжений и деформаций через значения разрешающей функции.

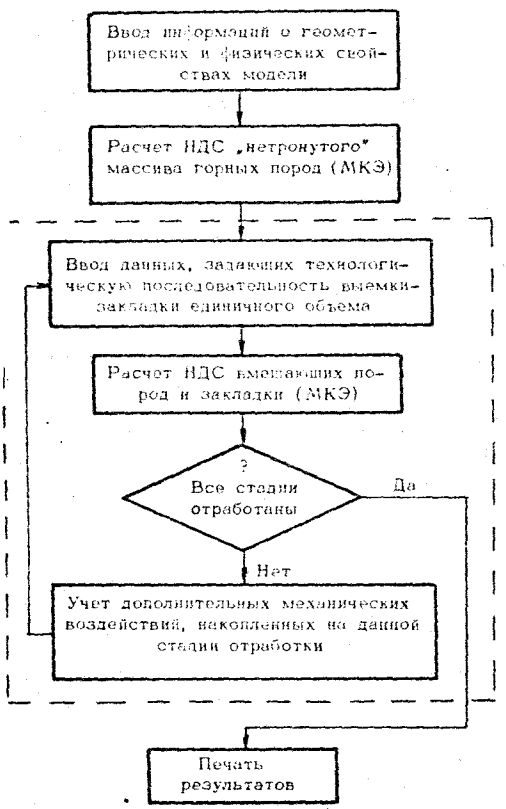


Рис.1. Блок-схема алгоритма расчета НДС для практической реализации принципа технологической последовательности при математическом моделировании

Этот алгоритм описывает расчет НДС в статических условиях (рис.I). Для реализации принципа технологической последовательности необходимо проводить расчет по данному алгоритму, начиная с п.2, но уже в новых условиях нагружения и для новых перемещений узлов конечно-элементной сетки.

Математическая модель представляет собой комплекс программ, реализующих описанный алгоритм, и набор входных данных, задающих геометрические параметры, физико-механические свойства системы, условия начального нагружения, граничные условия и заданный порядок технологической последовательности отработки исследуемого объекта.

Рассмотрим алгоритм постановки задачи для любого заданного количества стадий отработки [I].

Для n-й стадии отработки в горном массиве

$$\left\{\sigma_{ij}^{\text{полн}}\right\}=\left\{\sigma_{ij}^{\text{нет}}\right\}+\left\{\sigma_{ij}^{1}\right\}+\ldots+\left\{\sigma_{ij}^{n}\right\};$$

в закладке первой выработки

$$\left\{\sigma_{ij}^{\text{полн}}\right\}=\left\{\sigma_{ij}^{2}\right\}+\ldots+\left\{\sigma_{ij}^{n}\right\};$$

в закладке второй выработки

$$\left\{\sigma_{ij}^{\text{полн}}\right\}=\left\{\sigma_{ij}^{3}\right\}+\ldots+\left\{\sigma_{ij}^{n}\right\};$$

в закладке (n – I)-й выработки

$$\left\{\sigma_{ij}^{\text{полн}}\right\}=\left\{\sigma_{ij}^{n}\right\}.$$

На первой стадии расчета моделируется „нетронутый" массив с определенными физико-механическими свойствами и становятся известными начальные напряжения и деформации пород. На следующей стадии моделируется этап внемки-закладки путем изменения физико-механических свойств соответствующих элементов (порода, воздух, закладка). Расчет ведется в новых геомеханических условиях, созданных предыдущей стадией отработки.

Сначала в „нетронутом" массиве определяется величина напряжений, действующих по нормали к контуру выработки σ_x и σ_y и реакция породного участка, предназначенного к внемке, $-\sigma_x$ и $-\sigma_y$ (рис.2,а). После извлечения элементов, соответствующих выработке, на ее контуре будут действовать только дополнительные напряжения σ_x и σ_y, которые и вызовут деформацию контура (рис.2,б). Для определения этих деформаций методом конечных элементов необходимо знать действующие узловые силы (рис.2,в)

$$R_x=\frac{|\sigma_x|\,b}{2}\;;\quad R_y=\frac{|\sigma_y|\,a}{2}\;,$$

где R_x, R_y – дополнительные силы в узлах элемента; a, b – расстояние между двумя узлами.

Для правильной ориентации узловых сил необходимо верно установить знаки дополнительных напряжений. Важно, чтобы на каждом участке контура выработки дополнительные напряжения имели направление, противоположное направлению реакций со стороны извлекаемого участка массива. Очевидно, что если напряжения внутри контура выработки перед началом ее отработки окажутся сжимающими, то направление действия дополнительных напряжений, в которых будет производиться расчет, должно быть ориентировано от контура к центру выработанного пространства, а при растягивающих напряжениях наоборот (от контура в сторону массива). Поэтому задание соответствующих узловых сил осуществляется только после анализа НДС извлекаемого участка и пространственного положения его контура. Условия, позволяющие правильно

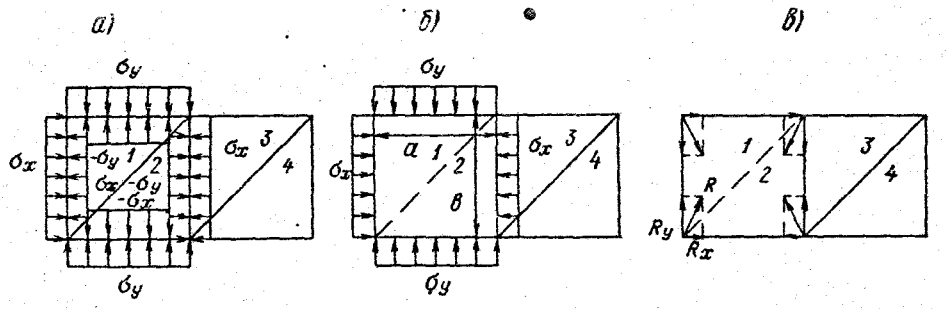


Рис.2. Схема к определению ориентации узловых сил: а - действие напряжений в элементе до выемки; б - дополнительные напряжения после извлечения элемента, соответствующего выработке: в -схема действия дополнительных узловых сил, эквивалентных дополнительным напряжениям
1-4 - номера элементов

задавать направления дополнительных узловых сил в извлекаемых участках массива, следующие:

при действии сжимающих напряжений $(\sigma_{xy}<0)$

$$C_{xy}<B_{xy} \Rightarrow R_{xy}<0;$$
$$C_{xy}>B_{xy} \Rightarrow R_{xy}>0.$$

при действии растягивающих напряжений $(\sigma_{xy}>0)$

$$C_{xy}<B_{xy} \Rightarrow R_{xy}>0;$$
$$C_{xy}>B_{xy} \Rightarrow R_{xy}<0,$$

где C_{xy} - координата узла; B_{xy} - барицентры элемента; R_{xy} - узловые силы.

Полученные значения дополнительных сил передаются программно в следующую стадию. Кроме того, по полученным перемещениям корректируются координаты узлов конечно-элементной сетки. Благодаря этому осуществляется учет изменения состояния системы, т.е. входными данными для каждого последующего цикла расчета являются показатели, в которых уже учтены изменения НДС системы, происшедшие на всех предыдущих циклах. Такой алгоритм расчета учитывает последовательность возведения искусственного массива закладки, которая сопровождается постепенным приложением нагрузки.

В сопоставительных расчетах отмечены расхождения с классическим методом расчета по конечному состоянию в значениях напряжений закладки и пород, т.е. окончательно НДС отличается от того, которое имело бы место при приложении тех же нагрузок к уже окончательно сформированному искусственному массиву. В связи с этим становятся ясными многие случаи расхождения расчетных величин с данными лабораторных исследований на моделях [3], а также некоторыми практическими замерами.

В качестве примеров приведены расчеты последовательной и двухподэтажной отработки крутопадающего месторождения с твердеющей закладкой

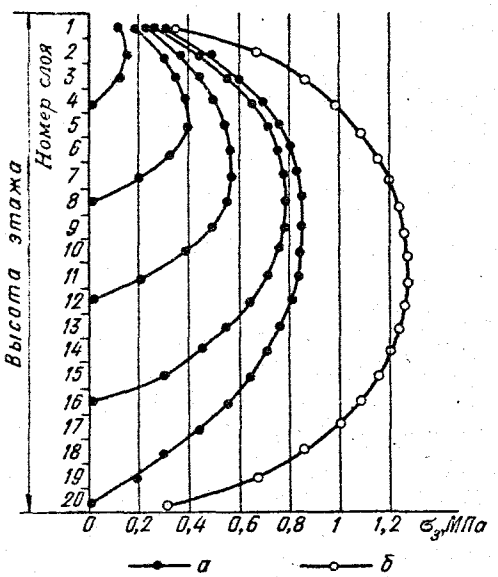


Рис.3. Характер распределения нагрузок на закладку при нисходящей выемке

с учетом цикличности и по конечному состоянию. Расчеты выполнены для конечно-элементной модели, содержащей 840 элементов, на ЭВМ ЕС-1045. Моделировался участок месторождения со следующими параметрами: высота отрабатываемого этажа 60 м; высота рабочего слоя 3 м; отрабатываемая мощность залежи 5 м; соотношение вертикальной и горизонтальной составляющей тензора напряжений 1:1.

На рис.3 представлены результаты расчетов последовательной отработки блока (этажа) за 20 стадий (слоев) с учетом цикличности (кривые $а$) и по конечному состоянию (кривая $б$) при относительной жесткости закладки (процентного отношения модулей упругости твердеющей смеси и вмещающей породы $(E_з/E_п)/100\% = 1$ %.

На рис.4 представлены результаты расчетов двухподэтажной отработки с учетом цикличности (по 10 стадий на подэтаж), (кривые $а$) и по конечному состоянию (кривые $б$), при относительной жесткости закладки, равной 10 %.

На рис.3 видно, что нагрузка на закладку, рассчитанная по конечному состоянию, имеет завышенные значения по сравнению с постадийным расчетом на последней стадии примерно в 1,5 раза (соответственно 1,3 и 0,85 МПа). При отработке следующих этажей это превышение еще более значительно. Таким образом, расчет НДС системы с учетом технологической последовательности очистных и закладочных работ позволяет получить наиболее достоверные данные о состоянии массива в процессе отработки и уточнить коэффициент запаса. Аналогичные сопоставительные расчеты были проведены для относительной жесткости, равной 10, 50 и 100 %.

Анализируя результаты расчета, представленные на рис.4, видим, что различия в расчетных значениях $\sigma_з$, полученных по сравниваемым методикам, возрастают по мере приближения к окончанию отработки запасов моделируемого участка и достигают максимума на последней стадии – при отработке целика между отработанными и заложенными подэтажами. Здесь различия носят уже качественный характер, отражая резкое нагружение участков искусственного массива, смежных с выемочным (кривые 1 и 2, слой 1-9). Это объясняется принципиальным различием в постановке задачи. Расчет, выполненный по конечному состоянию вообще противоречит физическому смыслу: только что возведенный участок искусственного массива в верхнем полублоке, смежный

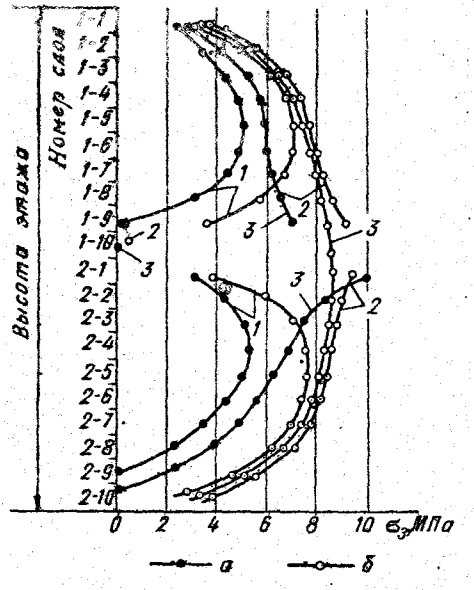


Рис.4. Характер распределения нагрузок на закладку при делении блока на два подэтажа по конечному состоянию и с учетом технологической последовательности
1 – нагрузка на закладку перед выемкой целика; 2 – то же после выемки целика; 3 – нагрузка на закладку после отработки и закладки блока на всю высоту

с внутриблоковым целиком, никак не может оказаться нагруженным до начала ведения очистных работ следующей стадии. Поэтому и значения нагрузок на закладку при воспроизведении выемки и закладки последнего слоя I-IO, полученные расчетом по конечному состоянию, не будут соответствовать реальности. Таким образом, неверные исходные посылки приведут к заведомо противоречивым результатам, несмотря на кажущуюся схожесть в некоторых конкретных случаях.

Предлагаемый способ расчета НДС системы порода – закладка более трудоемок, однако при современном оснащении проектных и научных организаций, производственных объединений вычислительной техникой не будет препятствий для его использования. Отказ от постадийности в таких расчетах может быть целесообразен только в том случае, если исследуемый участок отрабатывается одним фронтом. При многоочередности же очистных работ в пределах одного участка, наличии отдельных участков, извлекаемых в последнюю очередь, при необходимости учета изменения деформационных свойств закладки во времени, воспроизведение в расчетах технологической последовательности является единственной возможностью получить достоверную информацию об изменениях НДС исследуемой системы.

Достоинство предлагаемой методики – оперативный контроль состояния рассматриваемой геомеханической системы в процессе очистных работ, возможность задания сведений о реальной технологии на каждом слое (или камере), включая отклонения от принятой технологии очистных и закладочных работ, и изменения порядка отработки запасов. Результатом использования предлагаемой методики является возможность обоснованной дифференциации параметров закладки и порядка отработки запасов, текущей оптимизации проектных и производственных решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баймбетов М.О., Серяков У.М. Влияние порядка ведения очистных и закладочных работ на НДС месторождений // ФТПРПИ. 1984. № 4.

2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.

3. Кочетков Е.Д., Суглобов С.Н. О характере распределения боковых нагрузок на закладку // Физические процессы горного производства : Сб. науч. трудов / Ленинградский горный ин-т. Л., 1978.

4. Кузнецов С.Я., Одинцов В.И., Слоним М.Э., Трофимов В.А. Методология расчета горного давления. М.: Наука, 1981.

5. Разработка месторождений с закладкой / Под ред. С.Гранхольма. М.: Мир, 1987.

6. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987.

7. Хомяков В.М. Зарубежный опыт закладки на рудниках. М.: Недра, 1984.