УДК 622.273.2:622.831

А.П. ГОСПОДАРИКОВ, *д-р техн. наук, профессор, kaf_math_spmi@rambler.ru*
М.А. ЗАЦЕПИН, *канд. физ.-мат. наук, michael_zatsepin@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

A.P. GOSPODARIKOV, *Dr. in eng. sc., professor, kaf_math_spmi@rambler.ru*
M.A. ZATSEPIN, *PhD in phys. and math. sc., michael_zatsepin@mail.ru*
Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ПРОГНОЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПОЛОГИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Многообразие горно-геологических условий залегания пологих пластов и продолжающийся рост глубин разработки месторождений полезных ископаемых приводят исследователя к необходимости анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород вокруг подземных горных выработок всевозможного назначения и различного очертания.

Ключевые слова: прогноз, геомеханика, массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, численные методы.

THE FORECAST OF THE STRESS-STRAIN STATE OF MASSIFS ROCKS IN THE BED DEPOSITS

The variety of the mining and geological conditions with further increasing in depth of the development of bedded deposits leads to necessity for the analysis of stress-strain state near different types of excavations.

Key words: forecast, geomechanics, rock massif, stress-strain state, numerical methods.

Широкий круг проблем управления механическими процессами в массиве горных пород связан с очистными выработками и выемкой полезного ископаемого из недр, т.е. наличием в пределах выемочных участков выработанных пространств (рис.1). Результаты решения таких задач геомеханики позволяют не только обеспечить безопасность работ в очистных забоях, но и определить выбор оптимальных технологических решений. В первую очередь, это достигается исследованием НДС пород непосредственной и основной кровли пластов, представленной неоднородными элементами массива. Эти задачи решались многими исследователями различными аналитическими и численными методами. Так, хорошо известны результаты численно-аналитических расчетов оседания многослойного массива над выработанным пространством и опорного давления впереди очистного забоя на основе вариационного метода В.З. Власова в рамках линейного закона Гука (Н.Н. Кайдалов, В.Г. Лабазин и др.), а также примененного в работах А.П. Господарикова нелинейного закона деформирования горных пород [1].



Рис.1. Неоднородный слоистый массив в зоне влияния выработанного пространства без закладки

E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; h – мощность слоя; γ – объемный вес; i-n – слои пород; k – коэффициент упругого отпора; σ_z и σ_x – напряжение по соответствующим осям

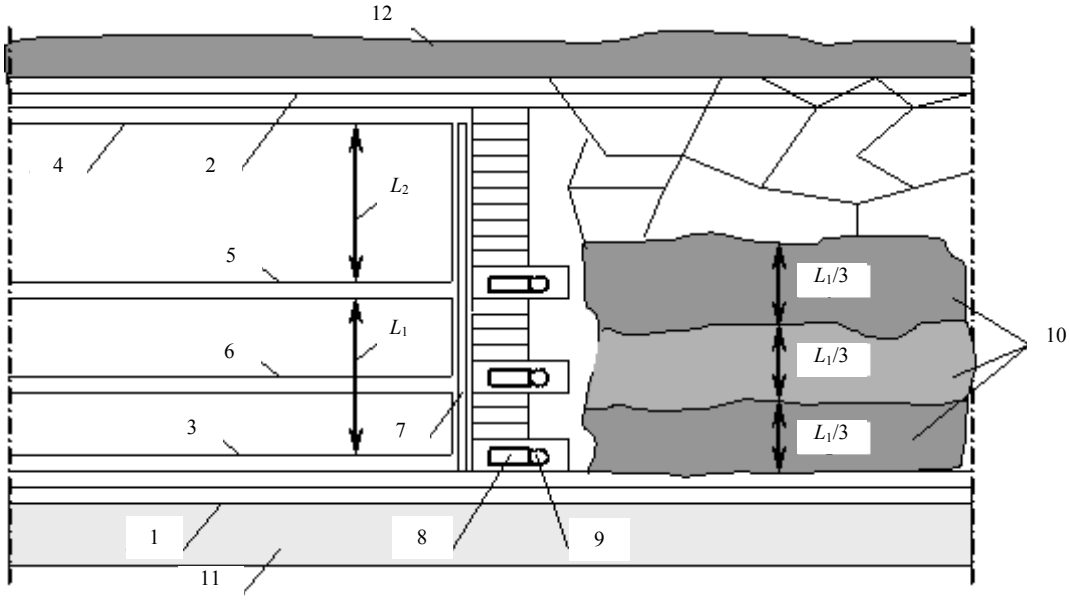


Рис.2. Способ управления труднообрушаемой кровлей

1 – панельный конвейерный штрек; 2 – разгружающий штрек; 3 – конвейерный штрек лавы; 4 – транспортный штрек лавы; 5 – центральный вентиляционный штрек; 6 – закладочный штрек; 7 – забойный конвейер; 8 – перегружатель; 9 – метатель; 10 – бутовые полосы; 11 – неотработанный участок шахтного поля, в котором подготавливается следующий выемочный столб; 12 – бутовая полоса отработанного столба; L_1 и L_2 – длина первой и второй полулав; $L_1/3$ – ширина бутовой полосы

Подобного рода задача возникает, например, при отработке Старобинского месторождения калийных солей, где за последние 20 лет подавляющее большинство случаев обрушений основной кровли происходило в полулаве со стороны массива. Так как разрушенного галита недостаточно для полной закладки выработанного пространства, то возникает необходимость усовершенствования схемы расположения галита в выработанном пространстве. Предлагается следующий способ управления труднообрушаемой кровлей (рис.2).

Следует отметить, что существенной трудностью применения вычислительных методов для определения НДС массива горных пород в указанном случае являются весьма приближенные значения геометрических параметров закладки и ее физико-механические характеристики. Однако в работах Е.И.Шемякина было показано, что с течением времени закладка становится такой же жесткой, как и основной массив горных пород, а значит, для определения НДС кровли в указанных условиях может быть использована схема целик – пролет – целик. В этом случае задача достаточно просто (при определенных допущениях и предположениях) может быть решена на основе вариационного метода В.З. Власова [2].

Приближенное решение задач механики сплошной среды может быть также обеспечено и на основе применения численных методов исследования НДС. Среди эффективных численных методов решения подобных задач наиболее широко известны метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ) и др., которые получили большое распространение в инженерной и научной среде при широком использовании мощной вычислительной техники. Эффективное применение указанных методов для решения важных прикладных задач геомеханики зависит от разработки соответствующих универсальных программ и их реализации на ЭВМ. Так, специалистами компании «Itasca» была разработана и успешно апробирована универсальная программа конечно-разностного анализа FLAC, которая является мощным и достаточно универсальным вычислительным инструментом для решения геомеханических задач на различных стадиях ведения горных работ (проходка и закладка выработок, ведение очистных работ). Благодаря вычислительной программе FLAC появилась возможность решения задач с учетом нелинейного закона деформирования горных пород. С помощью этой программы были определены вертикальные смещения в центре выработки и опорное давление на различных удалениях от забоя для массива горных пород [3].

Таким образом, от решения геомеханических задач по определению НДС призабойных зон пласта напрямую зависит управление состоянием массива непосредственно в лаве и эффективность выемки полезного ископаемого добычными комплексами.

В случае, когда массив горных пород ослаблен выработками не прямоугольного сечения (например, задача об определении НДС неподкрепленной выработки круглого сечения в однородном и изотропном массиве), использовать непосредственно разрешающие уравнения, полученные в рамках технической теории В.З. Власова, невозможно (рис.3): требуется вывод основных соотношений для определения НДС массива горных пород в полярной системе координат.

Для ее решения в работе используется метод конечных элементов. И хотя МКЭ нельзя рассматривать как универсальное средство, пригодное для абсолютно всех случаев горной практики, уже сейчас можно сказать, что с его помощью решаются многие важные задачи геомеханики.

На основе разработанного алгоритма численного решения задач геомеханики на основе МКЭ была составлена вычислительная программа. Для решения геомеханической задачи, например, представленной на рис.3, необходимо задать не только конструктивные особенности выработки, механические свойства массива горных пород (E, ν),

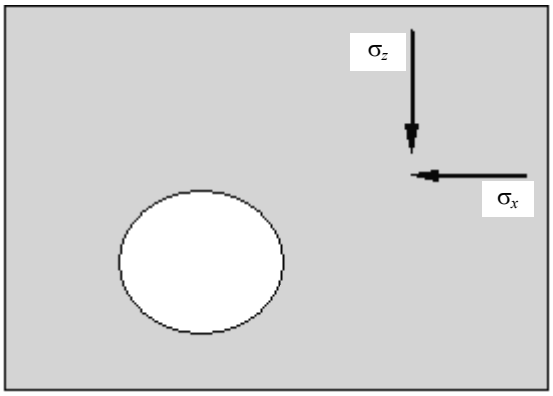


Рис.3. Однородный массив горных пород, вмещающий подземную горную выработку круглого сечения

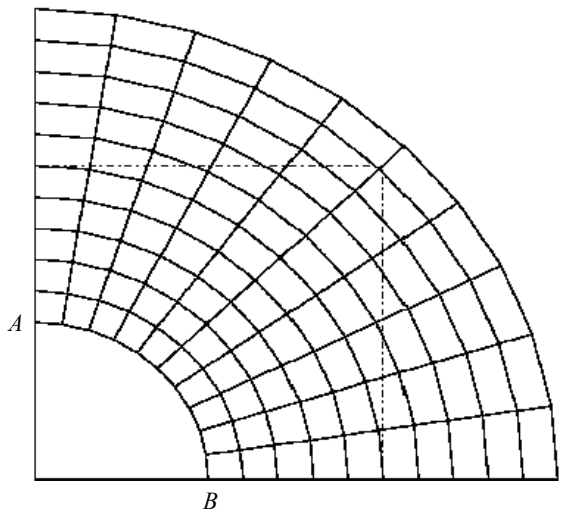


Рис.4. Разбиение массива горных пород на конечные элементы вокруг одиночной подземной горной выработки круглого сечения

но и определить вид потенциала П (работу деформации), определяющего связь между напряжениями σ_{ij} и деформациями ε_{ij}. Для упругого грунтового массива потенциал

$$\Pi = \frac{\lambda}{\nu}\left[\frac{I_1^2}{2}(1-\nu) - I_2(1-2\nu)\right],$$

где I_1 è I_2 – первый и второй инвариант тензора деформации соответственно; λ – константа Ламе; ν – коэффициент Пуассона.

Для проверки эффективности вычислительной программы была решена задача по определению НДС неподкрепленной выработки круглого сечения в однородном и изотропном массиве. В силу симметрии, рассматривается только четверть выработки, расположенная в первом квадранте. После задания входных параметров вычислительная программа автоматически разбивает область на конечные элементы и выводит разбиение на экран (рис.4).

Выходными параметрами программы являются компоненты вектора смещений, тензоров деформаций и напряжений слоев, прилегающих к выработке массива. Последние, в конечном итоге, определяют как безопасность ведения горных работ, так и необходимые мероприятия по закреплению подземных горных выработок. Следует отметить, что полученные результаты достаточно точно коррелируют с известными решениями подобных задач, выполненных А.П. Господариковым с помощью численно-аналитических методов.

Использование разработанной на основе МКЭ вычислительной программы, программы FLAC, реализующей метод конечных разностей, а также применение численно-аналитического алгоритма дали возможность произвести широкое сопоставление результатов расчета НДС массива горных пород, вмещающего выработки различных конфигураций и назначения. Последнее показало их достаточную сходимость для нужд практики. Кроме того, эти решения сравнивались с решениями других авторов, полученных на основе других методов. В результате такого сравнения расхождение не превышало 10 %, т.е. полученные решения пригодны для прикладных инженерных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Господариков А.П.* Метод расчета нелинейных задач механики горных пород при подземной разработке пластовых месторождений. СПб, 1999. 127 с.

2. *Господариков А.П.* Алгоритм расчета слоистого массива для прогноза напряженного состояния кровли и угольного пласта в зоне очистных работ / А.П.Господариков, С.В.Васильев, М.А.Зацепин // Записки Горного института. СПб, 2003. Т.155 (1). С.47-49.

3. *Зацепин М.А.* Математическое моделирование прогноза напряженно-деформированного состояния пологозалегающего массива горных пород // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер.10. Прикладная математика, информатика, процессы управления. 2009. Вып.1. С.68-73.

REFERENCES

1. *Gospodarikov A.P.* The method of the computation of the nonlinear problems of massif rocks. Saint Petersburg, 1999. 127 p.

2. *Gospodarikov A.P., Vasilev S.V., Zatsepin M.A.* The algorithm of the determination layered massifs rocks for the forecast of stress and strain state roof and coal seam in the longwall face zone // The Proceedings of Mining Institute/ Saint Petersburg, 2003. Vol.155 (1). P.47-49.

3. *Zatsepin M.A.* Mathematical modeling of forecast of stress and strain state of horizontal rock massifs // VSPbU. Ser.10. Applied mathematics, informatics, the process of management. 2009. Vol.1. P.68-73.