

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

ЗАДАЧИ ГОРНОГО ДЕЛА

АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯ ТӘСІЛІН ҚОЛДАНЫП ТАУ КЕН ІСТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ

INFORMATION TECHNOLOGY IN MODELING MINING PROBLEMS

Э.К. АБДЫЛДАЕВ, Н.Ж. ЗАУРБЕКОВА, Ж.Т. АЙТУГАНОВА, Д. СУЛЕЙМЕНОВ

E.K. ABDILDAYEV, N.D. ZAURBEKOVA, Z.T. AITUGANOVA, D. SULEIMENOVA

(Алматинский технологический университет)

(Алматы технологиялық университеті)

(Almaty Technological University)

E-mail: zhamila_aituganova@mail.ru

В статье приведены математические модели и результаты расчета задачи горного дела на основе информационной технологии и метода конечных элементов. Отладка программы, проверка качества конечно-элементной сетки и геомеханической модели породного массива осуществлены решением тестовых задач, имеющих аналитические решения.

Мақалада ақпараттық технологиялар мен ақырғы элементтер тәсілін қолдана отырып тау кен істерін математикалық модельдеу және оның нәтижелерін талдау мүмкіндіктері қарастырылған. Ұсынылған компьютерлік бағдарлама, ақырғы элементтер торының сапасын тексеру және кен жыныстарының геомеханикалық моделін құру нақты шешімдері бар тесттік есептер көмегімен іске асырылған.

To the article mathematical models and results of calculation of task of mountain business are driven on the basis of information technology and method of eventual elements. A program debug, quality of certainly-element net and geomechanical model of pedigree array control, is carried out by the decision of test problems having analytical decisions.

Ключевые слова: горнодобывающая отрасль, шахта, карьер, мониторинг, геомеханика, недр, деформация, горная порода

Негізгі сөздер: тау-кен өндіру, шахта, карьер, мониторинг, геомеханика, жер қойнауы, деформация, тау жыныстары

Key words: mining mine, quarry, monitoring, aeromechanics subsoil, deformation, rock

Введение

В народном хозяйстве Республики

Казахстан горнодобывающая отрасль промышленности занимает одно из важнейших мест по своей роли в общественном производстве,

экономической значимости и социальным факторам. В этой связи для создания эффективных и надежных конструкций шахт и карьеров, развитие системы экологического мониторинга окружающей среды, исследования в области горного дела должны быть комплексными в сочетании фундаментальных и прикладных наук.

В послании Президента Республики Казахстан – Лидера нации Н.А. Назарбаева народу Казахстана «Стратегия «Казахстан-2050» отмечено, что одним из приоритетов является наращивание темпов добычи и поставки на мировые рынки природных ресурсов с тем, чтобы использовать нынешний высокий мировой спрос в интересах страны. Конкурентоспособность горных предприятий в основном обеспечивается при больших объемах добычи полезных ископаемых. Высокопроизводительная их работа достигается на основе внедрения в практику результатов научных исследований по созданию новых и совершенствованию существующих технологических схем с включением техники циклического и непрерывного действия, рациональная комплектация оборудования, всемерное расширение области применения прогрессивных технологических решений, а также применение совершенных форм организации и управления массовыми горными работами.

Бурное развитие информационных технологий в настоящее время ставит новые требования перед традиционными, вполне сформировавшимися областями знаний, одной из которых является геомеханика и освоение недр. В связи с истощением запасов полезных ископаемых, залегающих на доступных глубинах, основным направлением развития горнодобывающей промышленности будет дальнейшее развитие и совершенствование методов и способов добычи полезных ископаемых с вовлечением в эксплуатацию месторождений со сложными горно-геологическими условиями, большой глубиной разработки и значительным сроком службы бортов карьеров и подземных выработок. Современный уровень развития математического аппарата решения

задач геомеханики и вычислительной техники позволяет автоматизировать процесс проектирования выработок, учесть все детали строения массива, добиться большей достоверности проектных решений, обеспечивающих минимальные объемы вскрышных работ, безопасные условия труда, рациональное использование недр и земельных ресурсов, что становится актуальным в условиях рыночной экономики.

Объекты и методы исследований

Горные предприятия в отличие от многих других промышленных объектов и сооружений (металлургических, машиностроительных, химических заводов и др.) являются природно-технологическими комплексами. Параметры и показатели экономической эффективности горных предприятий определяются для данного уровня техники в основном природными факторами (строением и размерами месторождений, рельефом местности, гидрологическими условиями и др.) и допустимым воздействием их на окружающую среду. Необходимо отметить, что на современном этапе развития горной науки это дифференциация горной науки, возникновение ее новых отраслей и подразделений на базе ее интеграции со смежными областями науки и техники. Поиск и научное обоснование методов рационального и комплексного использования недр обеспечивают их комфортные условия труда и оптимальное состояние природной среды.

Новейший этап в развитии горной науки следует связывать с развертыванием научно-технической революции (НТР). НТР, как известно, поставила перед человечеством новые проблемы: охрана окружающей среды и истощение минерально-топливных ресурсов. Эти проблемы особенно актуальны для горной промышленности и науки, не решив которые дальнейшее производственное использование полезных ископаемых может стать общественно малоэффективным. Следует заметить, что в районах горных разработок резко ухудшается географическая среда, сильный вред наносит ей способ открытых разработок, увеличение доли которого планируется в

ближайшей перспективе. Эффективность способа уже в настоящее время минуетеся большими неизбежными расходами на рекультивацию нарушенных разработками земель. Отсюда постановка перед наукой задач принципиального изменения в технологии добычи полезных ископаемых. Это особенно актуально потому, что современная технология не позволяет осваивать месторождения в глубоких недрах земли, а также с низким содержанием полезных ископаемых. Поэтому так актуально разработать принципиально новые методы и средства добычи полезных ископаемых, избежать при этом перемещения масс пустых пород, исключить присутствие под землей человека, резко повысить производительность труда. Это - реальная задача, так как налицо и внутренняя подготовленность и зрелость горной науки для обогащения ее новейшими достижениями фундаментальных наук, на базе которых можно осуществить принципиальный сдвиг в техническом базисе горного производства. В мировой практике технический прогресс, в первую очередь, связан с ориентацией на широкое применение самоходного горного оборудования: разработка самоходного бурового, погрузочно-доставочного и транспортного оборудования, самоходные ковшовые погрузочно-доставочные машины (ПДМ) как с дизельным, так и электрическим приводом. Развитие информационных и коммуникационных технологий, повсеместное внедрение автоматизации и дистанционного управления горными машинами и агрегатами являются приоритетными направлениями совершенствования подземной техники. Дифференциация горной науки на базе ее интеграции со смежными областями науки и техники и в то же время - это синтез горных наук в единую систему знаний для поиска методов рационального и комплексного использования недр, обеспечивающих комфортные условия труда и оптимальное состояние природной среды. Цель горной науки - не только в описании, объяснении условий средств и способов разведки добычи и первичной переработки полезных ископаемых, но главным образом в поиске путей их совершенствования и изменения для облегчения условий труда и повышения экономичности производства.

Горная наука сегодня - это сложный, развивающийся комплекс научных дисциплин. Все процессы и явления, происходящие при разведке, добыче и переработке полезных ископаемых, содержат внутренние и внешние противоречия, открытие, исследование и разрешение которых является главной задачей горной науки.

Горные науки по уровню исследований и методам решения задач существенно отличаются от таких фундаментальных наук, как физика или химия, которые используют для решения стоящих перед ними задач количественные методы. В основе решения задач, стоящих перед горными науками - качественное изучение объектов исследования. Очень часто в практике используются статистическое накопление факторов и их субъективная оценка, которая базируется на методе аналогий. Это можно объяснить тем, что объекты горной науки представляют собой конкретные условия, для которых трудно установить законы, "общие для всех мест и времен". Общая тенденция математизации наук не обошла и горные науки, но для решения большинства крупных горных проблем на сегодня недостаточно математических средств, поскольку задачей, например, разработки месторождений является создание самоорганизующихся многофакторных систем, а в дальнейшем и самопрограммирующихся автошагов. На современном этапе количественно решать задачи, возникающие, например, при разработке полезных ископаемых, можно только применительно к определенным, идеальным месторождениям. Поэтому для придания практического значения таким "количественным" решениям допущения, лежащие в основе анализа, должны, в соответствии с принятыми величинами, согласовываться с естественными условиями.

Результаты и обсуждения

В процессе образования в массиве открытых или подземных горных выработок нарушается естественное напряженно-дефор-

мированное состояние. Вокруг выработок различного назначения появляются зоны неупругих деформаций. Особенно важное значение имеют закономерности деформирования горных пород за пределы прочности, связанные с разрыхлением (необратимым увеличением объема), разупрочнением (снижением сопротивляемости) и упрочнением. Указанные закономерности в значительной мере определяют характер напряженно-деформированного состояния породного массива вблизи выработок, особенно при комбинированной разработке месторождений полезных ископаемых открытым и подземным способами во взаимном влиянии друг на друга. Сложность горногеологических и горнотехнических условий, их большое разнообразие, отсутствие комплексных методов оценки свойств и состояние породного массива ставит перед геомеханикой (наука о механическом поведении породного массива под действием тектонических сил и производственной человеческой активности) все новые проблемы. При этом одной из важнейших является проблема разработки общей методологии и метода, учитывающих вышеназванные особенности, на основе современного достижения в области численных методов математики, механики твердого деформируемого тела (теории пластичности и разрушения) и информационных технологий.

Запишем закон Гука для условий плоской деформации ($\varepsilon_2 = 0$) в следующем виде:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= E_{\Pi}(\varepsilon_1 + \nu_{\Pi} \varepsilon_3)/(1 - \nu_{\Pi}^2) \\ \sigma_3 &= E_{\Pi}(\varepsilon_3 + \nu_{\Pi} \varepsilon_1)/(1 - \nu_{\Pi}^2),\end{aligned}\quad (1)$$

где E_{Π}, ν_{Π} – «плоские» аналоги модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν , связанные с ними соотношениями: $E_{\Pi} = E/(1 - \nu^2)$, $\nu_{\Pi} = \nu/(1 - \nu)$.

Считая, что предел прочности рассматриваемой среды в области сжатия описывается критерием Кулона:

$$\sigma_1 = S + \sigma_3 \operatorname{ctg} \delta, \quad (2)$$

где $S = 2c \operatorname{ctg}(\pi/4 - \varphi/2)$ – прочность на одноосное сжатие; $\operatorname{ctg} \delta = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)$; c, φ – сцепление и угол внутреннего трения.

В области растяжения дополним критерием $\sigma_3 = T$, T – прочность на растяжение. После несложных преобразований получим описания границ прочности через главные деформации – сжатия считаются положительными:

$$[(E_{\Pi} \varepsilon_1 - S)(1 - \nu_{\Pi} \operatorname{ctg} \delta) / (\operatorname{ctg} \delta - \nu_{\Pi}) - \nu_{\Pi} S] / E_{\Pi} - \varepsilon_3 = 0 \quad (3)$$

$$T(1 - \nu_{\Pi}^2) / E_{\Pi} - \nu_{\Pi} \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 0 \quad (4)$$

В координатах ε_1 и ε_3 уравнения (3) и (4) имеют вид соответственно прямых $A'B'$ и $D'A'$ (рис. 1,а). Таким образом, в области 1 в пределах контура $D'A'B'$ по известным деформациям ε_1 и ε_3 напряжения σ_1 и σ_3 могут быть найдены по формулам (1). За пределами контура $A'B'C'$ действуют иные уравнения связи деформаций и напряжений.

Пусть в процессе нагружения деформированное состояние элемента среды вышло в некоторую точку E' на границе зоны упругости (рис. 1). Рассмотрим закономерности дальнейшего пластического деформирования, протекающего при постоянном минимальном главном напряжении. Увеличение деформации ε_1 (т.е. укорочение элемента среды в направлении ε_1) сопровождается уменьшением деформации ε_3 (расширением в перпендикулярном направлении). Полный вектор пластических деформаций ε_p состоит из двух компонентов: ε_{1p} и ε_{3p} , а взаимосвязь этих компонентов определяется принятым законом течения (рис. 1).

Если принять $\varepsilon_{3p} = -\varepsilon_{1p}$, то укорочение в направлении ε_1 будет равно удлинению в направлении ε_3 , а объем элемента среды при пластическом деформировании будет оставаться неизменным. Такое пластическое течение может быть названо равнообъемным. В более общем случае связь компонентов пластических деформаций может быть охарактеризована соотношением вида

$$\varepsilon_{3p} = -ctg\beta\varepsilon_{1p}. \quad (5)$$

Угол β на рисунке 1,а определяет степень разрыхления при пластическом течении; величина $ctg\beta$ может быть названа коэффициентом дилатации. При $\beta = \delta$ формула (5) соответствует принципу нормальности (ассоциированному закону течения).

При этом, если деформации элемента среды ε_1 и ε_3 характеризуют точку F' на рисунке 1,а, то они могут быть представлены в виде суммы упругих и пластических компонентов:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1e} + \varepsilon_{1p}; \varepsilon_3 = \varepsilon_{3e} + \varepsilon_{3p} \quad (6)$$

Упругие компоненты ε_{1e} и ε_{3e} являются координатами точки E' и определяются из формул упругости (1) при подстановке в них значения σ_1 на границе упругости по формуле Кулона (2). Подставив полученные таким образом значения ε_{1e} и ε_{3e} и величину ε_{3p} из формулы (5) в уравнения (6), получим систему двух уравнений, решив которые относительно σ_3 и ε_{1p} , найдем величину напряжения σ_3 соответствующую данному деформированному состоянию:

$$\sigma_3 = [E_{II}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + S(v_{II} - 1)] / (1 - v_n ctg\delta + ctg\delta - v_{II}) \quad (7)$$

Для определения величины σ_1 должно быть задано семейство графиков связи σ_1 и ε_1 при пластическом деформировании в условиях $\sigma_3 = const$ (рис. 1,б). Если в процессе деформирования сопротивляемость остается постоянной (идеальная пластичность), то графики σ_1 - ε_1 имеют вид горизонтальных прямых

(сплошные линии на рисунке 1,б), а сама величина σ_1 может быть рассчитана по ранее определенной величине σ_3 с помощью формулы (2).

Для пород, разупрочняющихся в процессе запредельного деформирования, может быть предложено [3], например, семейство графиков, изображенных на рисунке 1,б штриховыми линиями. Эти графики характеризуют среду, сопротивляемость которой в процессе пластического деформирования снижается от исходной величины, определяемой по формуле (2), до остаточной величины

$$\sigma_1 = \min [(S + \sigma_3 ctg\delta), (S' + \sigma_3 ctg\delta')], \quad (8)$$

где S' и δ' – характеристики остаточной прочности ($S' < S$, $\delta' < \delta$).

Разработанные модели реализованы в виде численных процедур для случаев плоской деформации в деформационном варианте теории пластичности на основе метода конечных элементов.

Основная процедура метода конечных элементов рассматривает среду как упругую и сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных перемещений $\{u\}$:

$$\{F\} = [K]\{u\}, \quad (9)$$

где $[K]$ - матрица жесткости системы; $\{F\}$ - вектор узловых сил.

Поскольку исследование напряженно-деформированного состояния породного массива с учетом запредельной деформируемости представляет собой нелинейную задачу, в работе нами получены новые разработки в области комбинированной процедуры применительно к общему случаю, когда закон состояния среды задается на основе предложенной модели. Отладка программы, проверка качества конечно-элементной сетки и геомеханической модели породного массива осуществлены решением тестовых задач, имеющих аналитические решения.

Для количественной и качественной оценки решения МКЭ по разработанной программе проведено решение, сопоставимое с классической задачей Галина. Заданы свойства идеально-пластической среды с критерием текучести Треска. Численные характеристики: $E = 103$ Мпа, $\nu = 0.3$, $\gamma = 0$, $c = 1$ Мпа, $\varphi = 0$. Коэффициент дилатации $\lambda = 1$, что обеспечивает равнообъемное течение.

Для того чтобы выяснить характер роста зоны пластических деформаций с изменением нагрузки, задача решалась в двух вариантах. В первом варианте нагрузка $\sigma_y = 3$ МПа и $\sigma_x = 2,4$ МПа прикладывалась целиком, во втором

задавалось приращениями в пять ступеней. Результаты расчетов по вариантам, соответствующим полной нагрузке, совпадают. На рисунке 2 показаны перемещения точек контура выработки U, рост зоны пластических деформаций. По полученному решению контур пластической зоны представляет собой эллипсоподобную фигуру с большой полуосью $a = 3,14R$ и малой полуосью $b = 1,77R$ (R -радиус отверстия). Из решения Галина следует, что зона пластических деформаций имеет вид эллипса с полуосями $a = 3,05R$, $b = 1,64R$. Напряжение вблизи контура отверстия равно пределу прочности на одноосное сжатие, а вдали от контура на поверхности - заданным напряжениям.

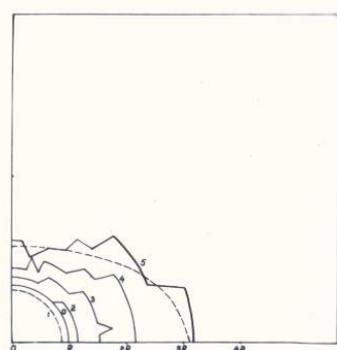


Рисунок 2 - Перемещения точек контура выработки U и рост зоны пластических деформаций.

В таблице 1 приведена величина перемещения узлов контура – отверстия в долях R , а в таблице 2 - значения напряжений в пластической зоне, полученные по формулам

Галина и по МКЭ. Из таблицы следует, что даже при сравнительно крупной сети элементов аналитическое и численное решения очень близки.

Таблица 1 - Величина перемещения узлов контура – отверстия

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta x \cdot 10^3/R$	-41	-40	-38	-34	-29	-24	-18	-12	-6	-4	0
$\Delta y \cdot 10^3/R$	0	-9	-16	-23	-29	-32	-36	-38	-39	-39	-39

Таблица 2 - Значения напряжений в пластической зоне

Горизонтальная ось					Вертикальная ось				
$\sigma_x \sigma_y$					$\sigma_x \sigma_y$				
r/R	по Галину	по МКЭ	по Галину	по МКЭ	r/R	по Галину	по МКЭ	по Галину	по МКЭ
1	0	0.1	2	2.07	1	0	0	2	2.08
1.28	0.49	0.49	2.49	2.62	1.14	0.27	0.39	2.27	2.39
1.8	1.18	1.20	3.18	3.37	1.28	0.49	0.58	2.49	2.58
2.14	1.52	1.50	3.52	3.60	1.64	0.99	1.10	2.99	2.88
2.57	1.89	1.85	3.89	3.92					
3.05	2.23	2.19	4.23	4.24					

Заключение

В заключении необходимо отметить, что разработанные процедуры и программы позволяют решать с помощью современных компьютеров широкий класс задач горного производства, в которых требуется определять напряженно-деформированное состояние породного массива, ослабленного выработками в разных горнотехнических и горногеологических условиях. Компоненты естественного поля напряжений представляются в виде зависящих от геомеханических структур месторождения, и в программе учитываются с помощью граничных условий. При этом граничные условия могут быть заданы в виде нулевых или ненулевых узловых сил или перемещений (или же смешанных условий). Неоднородность массива учитывается по моделям путем введения различных прочностных и деформационных характеристик $E, \nu, \gamma, c, \varphi$ (модуль упругости, коэффициент

Пуассона, плотность, сцепление и угол внутреннего трения). Поверхности ослабления и нарушения в массиве имитируются слоями элементов с соответствующими пониженными прочностными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдылдаев Э.К. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи выработок. - Фрунзе: Илим, 1990. - 164 с.
2. Ракишев Б.Р., Машанов А.А., Абдылдаев Э.К. Структура массива и деформируемость горных пород». – Алматы: Полиграфия-сервис, 2011. -281 с.
3. Абдылдаев Э.К. Метод конечных элементов при решении прикладных задач. – Алматы, Полиграфия-сервис, 2011. - 111 с.