УДК 622.83.001.57

2012 г. А.Б. Цветков, В.Н. Фрянов

Сибирский государственный индустриальный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В КУСОЧНО-ОДНОРОДНОМ ИЗОТРОПНОМ МАССИВЕ*

Анализ напряженно-деформированного состояния горизонтально-слоистых массивов, включающих в себя выработки, геологические нарушения, породные коллекторы флюидов, остается актуальной задачей [1, 2]. Вклад в ее решение внесли многие ученые и специалисты, такие как Б.В. Власенко, Г.И. Грицко, А.Н. Динник, В.Е. Миренков, В.Н. Опарин и др. Для изучения напряженно-деформированного состояния вмещающих пород вокруг контура выработки требуется рассчитать величины дополнительных перемещений, напряжений и деформаций. На предварительной стадии их расчета необходимо определить напряженно-деформированное состояние ненарушенного массива. Авторами предложен метод решения краевых задач для моделирования напряженно-деформированного состояния неоднородных массивов на основе метода конечных разностей [3]. Для этого необходимо представить неоднородный массив в виде однородных подобластей и согласовать их между собой с помощью граничных условий. При этом можно на микроуровне моделировать взаимодействие блоков между собой. На мезоуровне, варьируя физико-механическими свойствами и расположением блоков, можно моделировать структурное строение массива. В сравнении с общеизвестным методом конечных элементов [4, 5] ширина ленты основной матрицы системы при таком подходе к решению краевой задачи стала меньше. Это позволило сократить время решения системы линейных уравнений, что актуально при высоком порядке системы и многократном моделировании напряженно-деформированного состояния.

Описание математической модели

Приведены результаты исследования распределения перемещений и напряжений массивов, полученных путем численного решения краевой задачи для расчетной области, состоящей из нескольких горизонтальных однородных блоков прямоугольной формы. Для решения краевой задачи с однородными и неоднородными граничными условиями составлена компьютерная программа.

В рассмотренной модели горизонтально-слоистого массива напряжения обусловлены собственным весом пластов. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния сопоставлялись с численным решением, полученным методом конечных элементов.

Постановка краевой задачи

Решали двумерную краевую задачу в прямоугольной системе координат OXY (OX и OY – горизонтальная и вертикальная оси).

Основным объектом исследования является часть массива горных пород прямоугольной формы длиной 800 и глубиной 600 м. Вмещающая толща на глубине 477 м включает пласт угля прямоугольной формы мощностью три метра. В прямоугольной системе координат массив представлен прямоугольником соответствующих размеров. Стороны прямоугольника заданы вертикальными прямыми $x = 0$, $x = 800$ и горизонтальными прямыми $y = 0$, $y = 600$. Прямоугольник был принят за расчетную область и обозначался Ω. При математическом моделировании для характеристики физико-механических свойств массива горных пород использовались следующие параметры: ρ – плотность массива; λ и μ – постоянные Ламе; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости. При решении краевой задачи расчетная область состояла из прямоугольных однородных горизонтальных слоев, расположенных последовательно в направлении вертикальной оси OY. Краевая задача решалась при условии, что массовые силы направлены вдоль оси OY и создавались собственным весом пластов. Анализ напряженно-деформированного состояния массива горной породы был

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по контракту № 53822011 от 24.11.2011 г.

основан на изучении значений его перемещений и напряжений, построенных по результатам численного решения краевой задачи.

Постановка краевой задачи. Найти вектор перемещений $U = (u,v)$, $u = u(x,y)$, $v = v(x,y)$, удовлетворяющий внутри прямоугольника Ω системе дифференциальных уравнений Ламе

$$\begin{cases} \mu(u''_{xx} + u''_{yy}) + (\lambda+\mu)(u''_{xx} + v''_{xy}) = 0; \\ \mu(v''_{xx} + v''_{yy}) + (\lambda+\mu)(u''_{xy} + v''_{yy}) + \rho g h = 0 \end{cases} \quad (1)$$

и следующим граничным условиям: на сторонах прямоугольника $x = 0$, $x = 800$, $y = 0$ и $y = 600$ заданы нулевые горизонтальные перемещения $u(0,y) = 0$, $u(800,y) = 0$, $u(x,0) = 0$, $u(x,600) = 0$; на сторонах $x = 0$, $x = 800$ производные $v'_x(x,y)$ равны нулю, т.е. $v'_x(0,y) = 0$, $v'_x(800,y) = 0$; на верхнем основании $\sigma_y(x,0) = 0$; на нижнем основании $v(x,600) = 0$.

Расчетная область Ω состояла из двух породных слоев Ω_1, Ω_3 и угольного пласта Ω_2,

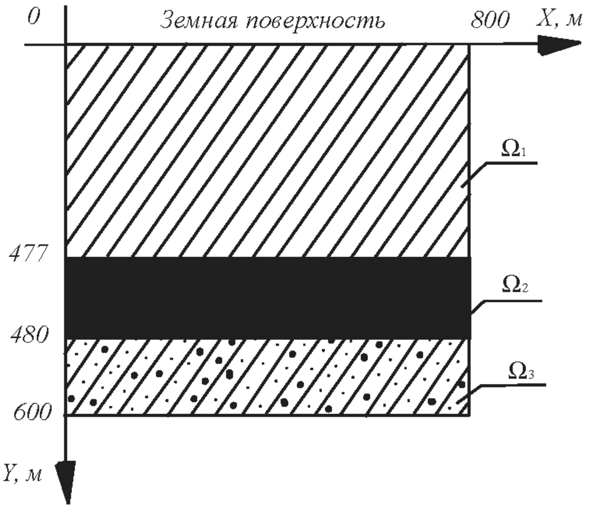

Рис. 1. Расчетная область Ω

которые отмечены штриховкой на рис. 1. Область Ω_1 – это аргиллит со следующими физико-механическими свойствами: $\rho = 2600$ кг/м^3, $E = 2{,}6 \cdot 10^4$МПа, $\nu = 0{,}28$; область Ω_2 – это уголь с $\rho = 1380$ кг/м^3, $E = 0{,}3 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0{,}34$; область Ω_3 – это алевролиты с $\rho = 2700$ кг/м^3, $E = 2{,}8 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0{,}27$.

Численное решение приведено на рис. 2, *а*, *б*. На рис. 2, *а* показаны вертикальные перемещения при $x = 400$ м. Сплошной тонкой линией приведена зависимость вертикальных перемещений Y от глубины v. Из рис. 2, *а* видно, что величина перемещений зависит от глубины и физико-механических свойств пластов. На рис. 2, *б* приведен график вертикальных напряжений при $x = 400$ м и $y \in [450, 490]$.

Из рис. 2, *а* видно, что первому слою мощностью 477 м соответствуют перемещения 0,91 м. Это составляет 0,19 % от мощности пласта. Третьему слою мощностью 120 м соответствуют перемещения 0,48 м, что составляет 0,4 % от мощности пласта. Слою угля мощностью 3 м соответствуют перемещения 0,081 м, что составляет 2,7 %. Из этого следует, что слою угля соответствуют наибольшие деформации.

Из рис. 2, *б* видно, что в массиве действуют только сжимающие напряжения. Причем распределение значений напряжений σ_y постоянно на одной и той же глубине. На графике виден скачок напряжений σ_y на границах слоя с углем.

Из анализа рис. 2, *а* следует, что слой угля подвергается наибольшей деформации. Согласно рис. 2, *б*, трехслойный массив представляет собой область сжатия. Проводилась верификация результатов математического моделирования с решением, полученным методом конечных элементов. Относительная погрешность составила около 1 %.

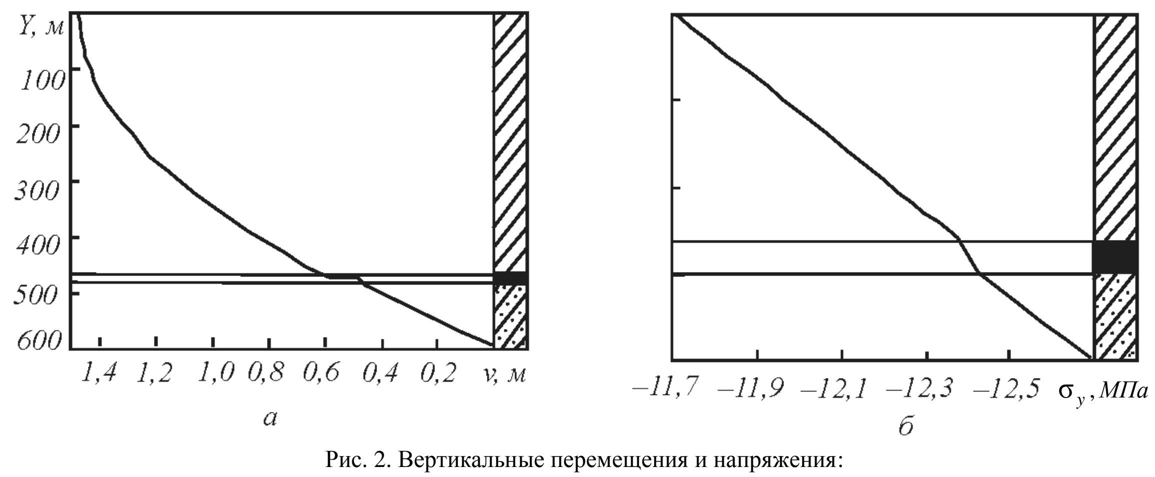

Рис. 2. Вертикальные перемещения и напряжения:
а – вертикальные перемещения, м; *б* – вертикальные напряжения σ_y, МПа

Выводы. Приведены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния горизонтально-слоистого массива горных пород. Для этого с применением разработанной методики была решена краевая задача. Выявлено, что закономерности распределения напряженно-деформированного состояния в неоднородном углепородном массиве при отсутствии в нем горных выработок качественно не противоречат зависимостям, полученным для однородного массива. Однако при существенном отклонении характеристик угля от соответствующих параметров горных пород происходят скачки напряжений и перемещений, зависящие от модуля упругости угля и породы. Проведенное исследование является первым этапом решения актуальной научно-практической задачи прогноза параметров напряженно-деформированного состояния при разработке паспортов выемочных участков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Д и н н и к А.Н. Статьи по горному делу. – М.: Углетехиздат, 1957. – 428 с.
2. Б о р и с о в А.А. Механика горных пород и массивов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
3. Р и х т м а й е р Р., М о р т о н К. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 414 с.
4. З е н к е в и ч О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 271 с.
5. Ф а д е е в А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

Поступила 25 апреля 2012 г.

УДК 622.831

2012 г. Т.В. Лобанова

Сибирский государственный индустриальный университет
Научно-исследовательский центр «Геомеханика»

СДВИЖЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД ТАШТАГОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

Таштагольское железорудное месторождение отличается проявлением мощных горно-тектонических ударов. Опасность проявления таких динамических событий, как правило, не обнаруживается, и в местах последующего разрушения выработок удароопасное их состояние не выявляется, поскольку очаг первичного разрушения, как правило, находится в глубине массива или формируется под воздействием массового взрыва и динамической пригрузки сдвигающихся боковых пород. Учитывая высокую энергию проявления горных ударов, накапливаемую при геодинамических процессах в блоках высокого ранга, проведены исследования поведения больших участков массива, охваченных наблюдениями на комплексных геодинамических полигонах на поверхности и в шахте.

Наблюдения за сдвижением земной поверхности и горных пород проводятся геодезическими и маркшейдерскими методами с использованием точных нивелиров с компенсаторами, жестких отвесов с уровнями, компарированных рулеток и нивелирных реек с уровнями, спутниковой геодезической системы Trimble 4600 LS (США). Замер смещений глубинных реперов осуществляется рулетками конструкции ВНИМИ.

На земной поверхности в 2005 – 2011 гг. в районах подвижных тектонических структур проведены исследования сдвижения горных пород с использованием методов спутниковой геодезии. Для этого разработана схема геодинамического полигона на базе наблюдательной станции за сдвижением земной поверхности (рис. 1). Пункты наблюдений охватывали разломы в районе месторождения. Комплекс оборудования состоял из четырех одночастотных приемников Trimble 4600. За базовую точку, относительно которой выполнялись наблюдения, был взят пункт полигонометрии п.п. 1111, находящийся в Юго-Восточном геодинамиче-

*Работа выполнена по государственному заданию Минобрнауки РФ (регистрационный номер 548922011).