УДК 622.831.3

А.А. Бобылев, В.В. Левит

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВБЛИЗИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОРОД

Запропоновано обчислювальний алгоритм моделювання геомеханічних процесів поблизу вертикальних стовбурів на основі математичної моделі, що враховує структурну неоднорідність породного масиву та особливості трибогеомеханічної взаємодії на поверхнях контакту кріплення стовбуру з породним масивом і на поверхнях розділу породних шарів. Бібліогр.: 4 найм.

В работе [1] предложена математическая модель геомеханических процессов вблизи вертикальных стволов с учетом естественной и наведенной структурной неоднородности приконтурных пород. В качестве расчетной схемы взаимодействия крепи ствола и вмещающего породного массива используется континуальная модель, в соответствии с которой крепь моделируется сплошным неоднородным полым цилиндром переменной толщины, а породный массив - сплошной слоистой средой с цилиндрическим отверстием. Для моделирования особенностей трибогеомеханического взаимодействия на поверхности контакта ствола с породным массивом и на поверхностях раздела породных слоев используются три типа граничных условий: полного сцепления, двухстороннего контакта с трением Кулона и двухстороннего идеального гладкого контакта.

В результате применения принципа возможных перемещений для геомеханической системы "крепь вертикального ствола - вмещающий породный массив" получена вариационная формулировка задачи:

$$\begin{aligned}&\int_{\Omega} \sigma_{ij}(\vec{u})\left(\varepsilon_{ij}(\vec{v})\right)-\varepsilon_{ij}(\vec{u})d\Omega+\int_{\Omega}\gamma\left(v_2-u_2\right)d\Omega+\int_{\Gamma_0}\gamma\, H\left(v_2-u_2\right)d\Gamma+\\&+\int_{\Gamma_N} Ku_n(v_n-u_n)d\Gamma_N++\int_{\Gamma_{бок}} Ku_n(v_n-u_n)d\Gamma_{бок}-\\&-\Gamma_{в}\left(C_0+\sigma_n(\vec{u})tg\varphi\right)\left(\left|\vec{v}_T-\vec{v}_T\right|-\left|\vec{v}_T'-\vec{v}_T''\right|\right)d\Gamma_{в}\geq 0.\end{aligned} \tag{1}$$

где $(\vec{u})$ - решение задачи; $(\vec{v})$ - произвольное кинематически допустимое поле перемещений.

Здесь сохранены обозначения, принятые в работе [1].

В настоящей работе предложен вычислительный алгоритм моделирования геомеханических процессов вблизи вертикальных стволов на основе решения квазивариационного неравенства (1).

Напряженно-деформированное состояние горных пород и элементов крепи ствола в рассматриваемой математической модели [1] *описывается нелинейными физическими соотношениями* теории пластичности деформационного типа. Поэтому целесообразно провести линеаризацию исходной задачи. В настоящей работе с этой целью используется метод переменных параметров упругости [2]. В результате решения исходной физически нелинейной контактной задачи механики горных пород сводится к решению последовательности контактных задач теории упругости, описываемых квазивариационным неравенством (1) при условии, что

$$\sigma_{ij}(\vec{u}) = C_{ijKl}\varepsilon_{Kl}(\vec{u}), \tag{2}$$

где C_{ijKl} - тензор модулей упругости обобщенного закона Гука.

Для численного решения линеаризованного квазивариационного неравенства (1) используется итерационный процесс, описанный в монографии [3]. На каждом шаге этого процесса распределение нормальных напряжений на контактных поверхностях принимается на основе решения, полученного на предыдущем шаге. В результате решение квазивариационного неравенства сводится к решению последовательности вариационных неравенств с заданным трением

$$\begin{aligned}&\int_{\Omega} C_{ijKl}\left(\vec{u}^{(m)}\right)\left(\varepsilon_{ij}(\vec{v})\right) - \varepsilon_{ij}\left(\vec{u}^{(m)}\right)d\Omega + \int_{\Omega} \gamma\left(v_2 - u_2^{(m)}\right)d\Omega + \int_{\Gamma_0} \gamma\, H\left(v_2 - u_2^{(m)}\right)d\Gamma_0 + \\ &+ \int_{\Gamma_N} Ku_n^{(m)}(v_n - u_2^{(m)})d\Gamma_{бок} - \int_{\Gamma_в}\left(C_0 + \sigma_m\left(\vec{u}^{(k-1)}\right)tg\varphi\right)\left(\left|\vec{v}_T - \vec{v}_T\right| - \left|\vec{v}_T^{\prime(m)} - \vec{v}_T^{\prime(m)}\right|\right)d\Gamma_в \geq 0\end{aligned} \tag{3}$$

где m - номер итерации.

При численном исследовании вариационных неравенств, как правило, осуществляют переход от исходного неравенства к эквивалентной экстремальной задаче [4]. Для вариационного неравенства (3) эквивалентная экстремальная задача имеет вид:

$$
\begin{aligned}
\frac{\inf}{v \in V} \Bigg\{ J^{(m)}(\vec{v}) = \frac{1}{2}\int_{\Omega} C_{ijKl}\varepsilon_{ij}(\vec{v})\varepsilon_{Kl}(\vec{v}) + \int_{\Omega} \gamma\, v_2 d\Omega + \int_{\Gamma_0} \gamma\, H v_2 d\Gamma_0 + \\
+ \frac{1}{2}\int_{\Gamma_N} K v_n^2 d\Gamma_N + \int_{\Gamma_{бок}} K v_2^2 d\Gamma_{бок} - \int_{\Gamma_б} \left(C_0 + \sigma_n^{(m-1)} tg\varphi\right)\left|\vec{v}_T' - \vec{v}_T''\right| d\Gamma_б \Bigg\},
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

где V - множество кинематически допустимых перемещений.

Дискретизация вариационной задачи (4) производится на основе метода конечных элементов. Полученная в результате дискретизации конечномерная задача является задачей нелинейного программирования большой размерности. Для ее решения в настоящей работе используется метод последовательной верхней релаксации [4].

Таким образом, разработанный вычислительный алгоритм моделирования геомеханических процессов вблизи вертикальных стволов на основе математической модели, предложенной в работе [1], включает в себя три вложенных итерационных процесса: переменных параметров упругости, решения контактной задачи с заданным трением и последовательной верхней релаксации.

Разработанный вычислительный алгоритм реализован в виде объектно-ориентированной программы для персональных компьютеров типа PC. Под объектно-ориентированной программой понимается программа расчета, жестко привязанная к конкретному классу подземных объектов, в данном случае - вертикальных стволов, в отношении возможных форм геометрии и механических характеристик их конструктивных элементов, специфики взаимодействия с массивом горных пород и горно-геологических условий. Расчет параметров вертикального ствола с помощью такой программы требует минимальной входной информации и может быть выполнен специалистом-геомехаником, не имеющим специальной компьютерной подготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобылев А.А., Левит В.В. Математическая модель геомеханических процессов с учетом структурной неоднородности пород вблизи вертикальных стволов // Геотехническая механика.

Сб.науч.тр. ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск. - 1997. - Вып. 3. - С. 74-79.

2. Уравнение и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие / Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. - Киев: Наук.думка, 1981. - 496 с.

3. Главачек И., Гаслингер Я., Нечас И., Ловишек Я. Решение вариационных неравенств в механике. - М.: Мир, 1986. - 270 с.

4. Гловински Р., Лионс Ж.-Л., Тремольер Р. Численное исследование вариационных неравенств. - М.: Мир, 1979. - 574 с.

УДК 622.7.002.5

В.Н. Потураев, В.А. Зенин

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ МАГНИТО-ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Перспективи розвитку магнітних методів збагачення розглянуті в аспекті оптимізації комплекса гравітаційних, гідродинамічних та магнітних сил, діючих в процесі сепарації залізорудних пульп. Аналіз сил, діючих при традиційних способах розподілу в барабанних магнітних сепараторах та при сепарції магніто-гравітаційним способом, показує, що в останьому випадку напруженість магнітних полів можливо зменшити на 1-2 порядки. Бібліогр.: 2 найм.

Тонковкрапленные магнетитовые руды относятся к типу трудообогатимых из-за тонкого (30-100 мкм) прорастания частиц окислов железа в кварциевые слои и частиц кварца в рудные слои.

Основным методом обогащения этих руд является мокрая магнитная сепарация железорудной пульпы (тонкоизмельченной руды в водной среде), состоящей из смеси раскрытых рудных и нерудных частиц.

Типовая схема обогащения таких руд включает, как правило, 3 стадии измельчения исходной руды, 3-5 стадий магнитной сепарации, 2 стадии дешламации слива гидроциклонов.

При конечной крупности измельчения 90-95 % класса -74 мкм, отвечающей размеру свободных частиц магнетита, содержание железа в товарном концентрате составляет 62-65 %, в зависимости от технологических характеристик руд.