УДК 622.831.32.322

О.В.КОВАЛЕВ, И.Ю.ТХОРИКОВ, К.А.БОНДАРЕВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ УГЛЕНОСНЫХ МАССИВОВ НА ИХ ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Приведены основные факторы, которые должны быть учтены при разработке методики учета взаимовлияния геомеханического состояния массива горных пород и его фильтрационных (коллекторских) свойств. Проанализированы основные подходы к решению подобных задач (аналитические, экспериментально-аналитические), отмечены их преимущества и недостатки. Приведены результаты исследований, позволяющие установить функциональную взаимосвязь параметров напряженно-деформированного состояния массива и его газопроницаемости, основанную на анализе объемной деформации массива и ее влияния на фильтрационные свойства среды.

The article gives the main factors which must be taken into account while developing the technique to account the intercoupling of geomechanical condition of a rock strata and its filtrational properties. The main approaches to the solution of similar problems and their disadvantages-advantages are analyzed. The research results allow to establish functional interrelation between strain and stress state of rock strata and its gas permeability. The interrelation is based on the analysis of volumetric strain of the strata and its influence on the filtration characteristics of medium.

Анализ известных аналитических подходов к возможной оценке взаимовлияния механических состояний и газодинамических параметров массива показал достаточную ограниченность использования таких решений из-за необходимости рассмотрения и решения всего комплекса уравнений, описывающих геомехано-газодинамическое состояние массива, являющегося гетерогенной средой, представленной, в частности, следующими фазами: твердой (скелет пород, угля), газообразной, которую возможно отнести к трещинам и макропорам (свободные газы) и к микропорам (связанные газы). В такой постановке известный комплекс уравнений будет включать общее уравнение механического равновесия твердой фазы квазиупругого массива, уравнения движения газа в макропорах (трещинах) и уравнения движения газа в микропорах, геометрические уравнения для твердой фазы и физические уравнения равновесия для твердой и газообразной фаз [1-3 и др.].

Принимая определенные упрощения и задавая некоторые граничные (начальные) условия, можно обеспечить конкретизацию решения рассматриваемой задачи для некоторых частных случаев. Однако получение замкнутого решения требует аналитического описания геометрии объекта (его контура) и условий на нем. Возникающие в связи с этим трудности (в том числе математического характера) получения количественных показателей, характеризующих фильтрационные и механические параметры исследуемых процессов, свидетельствуют об ограниченности использования чисто аналитических подходов к решению рассматриваемой проблемы.

Анализ механических свойств и текстурно-структурных особенностей характерных месторождений полезных ископаемых показал необходимость рассмотрения геомеханической задачи для однородной, многосвязанной, квазисплошной среды, условия на границе выделенной области которой не могут быть априорно заданы достаточно отвечающими таковым в окрестности

рассматриваемых объектов [2]. В связи с изложенным, нереально достаточно надежное использование чисто аналитических методов при определении всего комплекса параметров, описывающих состояния техногенно-возмущенного массива горных пород (МГП), поскольку, используя такие методы, практически невозможно получить замкнутые решения известного однородного уравнения, описывающего механическое состояние конкретных элементов МГП (например, подстилающих толщ рабочих пластов), и имеющего, как известно, вид

$$\Delta^2\varphi = 0, \qquad (1)$$

где

$$\Delta^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}; \qquad (2)$$

φ – функция Эри (функция напряжений), для которой (при отсутствии объемных сил)

$$\sigma_y = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}; \ \sigma_x = \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}; \ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2\varphi}{\partial x \partial y}. \qquad (3)$$

В то же время взаимовлияние геомеханических и газодинамических параметров МГП может быть с достаточной для практики точностью оценено на базе экспериментально-аналитического подхода к решению поставленной задачи. Базой такого подхода является оценка сформированных в массивах механических состояний и отвечающих им газодинамических условий, которые предопределены геометрией полостей (контуров), граничными условиями на них и механическими (деформационными) характеристиками рассматриваемой среды.

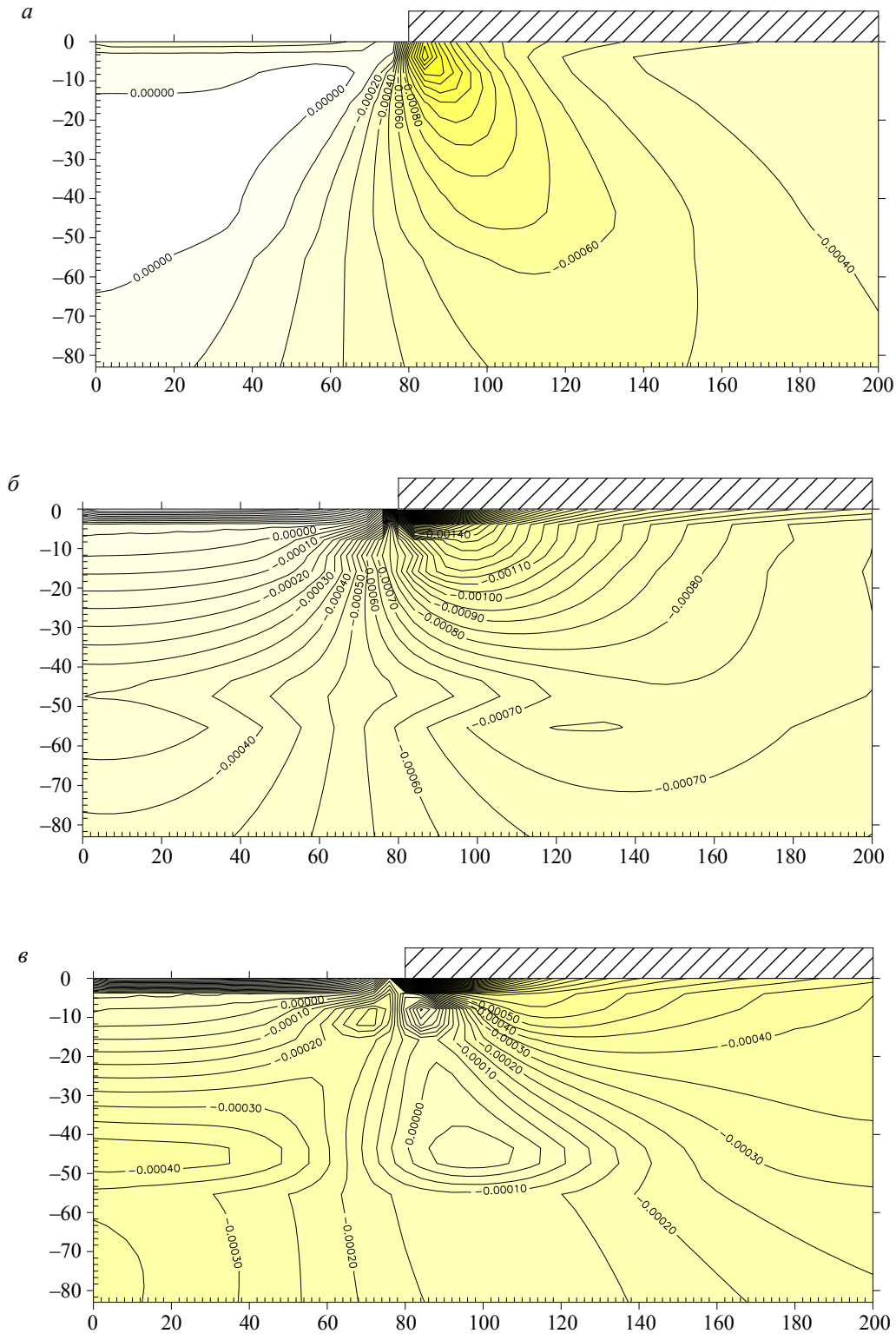
Связь между газодинамическими параметрами МГП (коллекторскими, фильтрационными и др.) и его механическим состоянием можно учесть, основываясь на информации о компонентах тензоров напряжений и деформаций, а также вектора перемещений. Предварительные исследования показали необходимость анализа не собственно указанных компонент, а некоторой их производной, которая более адекватно может отражать изменение фильтрующей способности среды в процессе изменения ее напряженного состояния (перераспределения напряжений в массиве). Такой производной величиной может являться параметр, характеризующий изменение (приращение) объемной деформации в точке МГП,

$$\Delta\Theta = \Theta_0 - \Theta_i, \qquad (4)$$

где $\Delta\Theta$ – изменение (приращение) объемных деформаций; Θ_0 – объемная деформация в точке, например, надрабатываемого МГП, но при $\sigma_{ср} \approx \gamma H$, т.е. в условиях еще невозмущенного (на конкретный момент времени) горными работами массива; Θ_i – значения величин объемной деформации в тех же точках МГП, но при i-х состояниях – уже возмущенного горными работами массива.

Общая пористость углей в среднем может достигать 12 %, но поскольку она обычно состоит из сорбционного и фильтрирующего объемов, то ее последняя составляющая (эффективная пористость, эквивалентная параметру n) достигает ~3 %. Данные объемы обычно представлены порами (трещинами) с размерами от 10^{-6} до 10^{-1} см, образующими сложную систему сообщающихся между собой транспортных каналов (пустот). Указанные величины отвечают условию, когда уголь находится в разгруженном от механических напряжений состоянии ($\sigma_{ср} \to 0$). Предварительные оценки показали, что наличие внешних нагрузок, отвечающих геостатическому полю (γH) до глубин ~1500 м, несущественно сказывается на изменении сорбционного объема угля, представленного, в основном, ультрапорами, а изменяет лишь их фильтрующую пористость.

Рассмотренный подход к оценке изменчивости напряженно-деформированного состояния (НДС) углесодержащих массивов, возмущенных ведением горных работ, обеспечивает возможность исследования нетривиальных геомехано-газодинамических состояний МГП, являющихся базой необходимо-достаточного обоснования комплексного извлечения как твердого, так и газообразного энергоносителя при отработке угольных месторождений.



Поле компонентов деформации ε_x (*а*) и ε_y (*б*) и параметра θ (*в*) в исследуемой области при времени подвигания забоя лавы ≤ 15 сут. и отходе ее от монтажной камеры на 60 м

Необходимо отметить, что извлечение газообразного энергоносителя не может рассматриваться сегодня как существенная часть в общем энергетическом балансе извлекаемых на угольных месторождениях энергоносителей, однако в некоторых случаях газообразная доля извлекаемого сырья полностью может обеспечить энергетические нужды самого предприятия (либо поселка, города). Вопросы эффективной дегазации углесодержащих толщ всегда были и остаются весьма актуальными, особенно при обеспечении высоких нагрузок на очистные забои в условиях отработки высокогазоносных угольных пластов [1]. Без решения этих вопросов практически нереально внедрение на шахтах высокопроизводительного очистного оборудования.

Исследование изменчивости собственно горно-геомеханических параметров какого-либо оцениваемого объекта может быть выполнено с помощью известных методов, например, граничных элементов (МГЭ), либо конечных элементов (МКЭ) и др.

В качестве примера (см. рисунок) для условий надработки одного из пластов Воркутского месторождения приведены результаты оценок полей ε_x, ε_y и результирующего $\theta_i = \varphi(x, y)$.

Отметим, что разработанная и принятая к реализации для численного экспериментирования методика оценки НДС МГП позволяет получать данные о параметре $\Delta\Theta$ в функции координат (пространства). Задавая некоторые фиксированные (для определенных моментов времени) положения фронта очистных работ, можно получить и функциональную зависимость искомых параметров от времени для частных случаев рассмотрения процессов деформирования толщи горных пород в условиях конкретной задачи.

Выполненные исследования показали, что существует взаимосвязь параметра эффективной пористости n и средних значений $\sigma_{ср}$, действующих в горном массиве напряжений. Следовательно, в квазиупругодеформируемых средах очевидна и взаимозависимость параметров n и Θ_i.

$$\Theta_i = k\sigma_{ср}, \qquad (5)$$

где k – параметр, $k = 3/E(1\text{-}2\mu)$; E – модуль упругости структурных литотипов пород МГП; μ – коэффициент Пуассона тех же элементов МГП.

Это позволяет определить роль НДС пород в изменении показателя их эффективной (фильтрирующей) пористости, т.е. газопроницаемость среды можно выразить следующим образом:

$$k_{ср} = k_0^{ср} + a\,\sigma_{ср}, \qquad (6)$$

где $k_{ср}$ – средние для исследуемых точек МГП значения величин газопроницаемости пород; $k_0^{ср}$ – то же, при наличии в точке МГП условия $\sigma_{ср} \to 0$; a – эмпирический коэффициент.

Очевидно, что при наличии условия (5) зависимость (6) может быть интерпретирована в виде функции:

$$k_{ср} = \Phi(\Theta_i). \qquad (7)$$

Обобщая результаты выполненных исследований, отметим, что они могут быть использованы при решении двух проблемных вопросов горного производства. Во-первых, для обеспечения на высокогазоносных угольных шахтах условий эффективного проветривания выемочных участков за счет существенной систематизации дегазационных параметров различных зон МГП, а соответственно, и при применении при добыче угля высокопроизводительной очистной техники и, во-вторых, как методическая база решения задач экологической безопасности на угольных месторождениях в части снижения (управления) выбросами парникового газа (CH_4) в пределах горных отводов предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Айруни А.Т.* Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. М.: Недра, 1981.

2. *Лидин Г.Д.* Исследование закономерностей дегазации разрабатываемых, подрабатываемых и надрабатываемых угольных пластов / Г.Д.Лидин, А.Т.Айруни; ИГД им. А.А.Скочинского, М., 1969.

3. *Руппенейт К.В.* Деформируемость массива трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1975.