УДК 622.831.32.322

О.В.КОВАЛЕВ, *д-р техн. наук, профессор, spggi4@mail.ru*
С.П.МОЗЕР, *канд. техн. наук, доцент, mozer1@yandex.ru*
И.Ю.ТХОРИКОВ, *канд. техн. наук, научный сотрудник, spggi4@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

O.V.KOVALEV, *Dr.eng. sc., professor, spggi4@mail.ru*
S.P.MOZER, *PhD in eng. sci., associate professor, mozer1@yandex.ru*
I.Y.THORIKOV, *PhD in eng. sc., research assistant, spggi4@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Рассмотрены основные закономерности фильтрации газов на разных этапах отработки угольных месторождений. Приведена методика, используемая для изучения комплексного освоения энергоресурсов угольных месторождений, позволяющая применительно к конкретным условиям получать инженерные зависимости для количественной оценки всех основных параметров исследуемых процессов. На основании разработанного подхода к комплексному освоению предложен алгоритм практического решения проблемы.

Ключевые слова: фильтрация газов, угольные месторождения, инженерные зависимости, алгоритм решения проблемы.

DESIGNING OF COMPLEX MINING OPERATIONS IN COAL MINES

The basic laws of gas filtration at different stages of coal deposit mining are considered. The technique used for studying complex development of power resources of coal deposits, allowing with reference to concrete conditions to receive engineering dependences for a quantitative estimation of all key parametres of investigated processes is given. On the basis of the developed approach to complex development the algorithm of the practical solution of the problem is offered.

Key words: gas filtration, coal deposit, engineering dependences, algorithm of the practical solution of a problem.

Позитивный опыт комплексного использования шахтного метана на отдельных угольных шахтах России и мира [2-3] требует разработки методики предпроектной оценки параметров газоотдачи массива с учетом изменения его напряженно-деформированного состояния (НДС) в зависимости от стадии разработки запасов месторождения.

Запасы шахтного метана в пределах угольных бассейнов страны сопоставимы с ресурсами месторождений природного газа. Только в пределах Воркутского месторождения в Печорском бассейне запасы метана с учетом коэффициента современной его сохранности в угленосной толщи составляют до $6 \cdot 10^9$ м^3, а в пределах шахтных полей Кузбасса – до $18 \cdot 10^9$ м^3. Запасы этого энергоносителя на месторождениях РФ и стран СНГ исследователи оценивают ориентировочно в $5 \cdot 10^{13}$ м^3. Таким образом, проблема извлечения метана может и должна рассматриваться, с одной стороны, как самостоятельная (с учетом оцениваемых его запасов), с другой, как комплексная, так как решение проблемы эффективного каптажа метана на шахтных полях позволит повысить техническую и экологическую безопасность ведения горных работ.

Однако необходимо отметить, что на действующих угольных шахтах проблема

каптажа и последующего использования метана, содержащегося в угольных пластах, имеет «подчиненный» характер, поскольку стоимость угля как энергетического продукта практически на два порядка превосходит стоимость содержащегося в этом угле метана. В связи с этим постановка вопроса о комплексном извлечении «равноценных» видов энергетического сырья не является правомерной. Создание отдельного комплекса выработок для обслуживания работ по дегазации пластов (без последующего их использования для добычи угля) нерентабельно.

С другой стороны, все приведенные доводы никак не могут служить доказательством «малозначительности» рассматриваемой проблемы, они лишь подчеркивают «подчиненность» в стоимостях извлекаемого угля и газа, который в нем содержится. В то же время эффективность и безопасность отработки угля в значительной степени определяется количеством метана, который содержится в разрабатываемом пласте, а также в пластах-спутниках. При газообильности выемочных участков 5-10 $м^3$ метана на тонну среднесуточной добычи газовый фактор практически не сказывается на себестоимости добываемого сырья, а при газообильностях до 70 $м^3$ метана на тонну среднесуточной добычи становится определяющим, поскольку себестоимость угля, добываемого высокопроизводительными очистными забоями, увеличивается в разы и делает добычу в таких лавах убыточной. В указанных горно-геологических условиях добыча угля должна вестись только с использованием комплекса работ по дегазации углевмещающего массива и различных способов управления аэрологическими параметрами выемочного участка, включающих как прямоточные схемы проветривания, так и различные способы изолированного отвода метановоздушной смеси.

Проблему дегазации угольных пластов (как разрабатываемых, так и пластов-спутников) необходимо рассматривать отдельно для двух следующих моментов времени: до начала очистных работ и во время ведения очистных работ. В свою очередь, способы (и средства) управления газовыделением на выемочном участке подразделяются по источникам метановыделения: разрабатываемый пласт, надрабатываемые пласты и подрабатываемые пласты. В то время как для первых двух источников на стадии отработки выемочного участка могут быть использованы только методы аэрологии и изолированного отвода метановоздушной смеси, для третьего источника основными могут считаться методы дегазации через скважины. Поскольку одним из основных параметров, определяющих скорость фильтрации газов в горных породах, является их пористость, которая, в свою очередь, зависит от напряженного состояния техногенно-возмущенного (или невозмущенного) массива горных пород, учет последнего при расчетах параметров дегазации надрабатываемого массива позволит обоснованно подойти к проектированию систем дегазационных скважин и расчету их дебитов в различные моменты времени и на различных участках по длине выемочного столба.

Задачей научных исследований являлось изучение механизма повышения «газоотдачи» земных недр в функции различных ретроспективных горно-геологических ситуаций, характерных для периода нормальной работы шахты, а также периода, включающего момент ликвидации угольного предприятия. Параметр «газоотдача» предопределен изменчивостью геомеханического состояния техногенно-возмущенного массива и, достаточно синхронно, соответствующей изменчивостью фильтрационных свойств горных пород. В общей постановке изучение таких механизмов – задача нетривиальная. Целесообразные решения в обобщенном виде (пригодном для целого класса процессов, а не для условий локализованных частностей) могут быть получены двумя путями: аналитическим либо экспериментально-аналитическим.

Аналитический подход требует рассмотрения и решения всего комплекса уравнений, описывающих геомеханогазодинамическое состояние массива, являющегося гетерогенной средой, представленной обычно следующими фазами: твердой («скелет» пород, угля); газообразной, которую возможно отнести к трещинам и макропорам («свободные» газы); и газообразной, относимой к микропорам. В такой постановке известный комплекс уравнений будет иметь

вид: общее уравнение геомеханического состояния (равновесия) твердой фазы квазиупругого массива

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_1 m_1 \frac{\partial V_1}{\partial t}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho_1 m_1 V_i V_j - m_1 \sigma_{ij}\right)+$$

$$+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(m_2 P_2 + m_3 P_3\right)=0;$$

уравнение движения газа в макропорах и трещинах

$$\frac{m_2}{ZRT}\frac{\partial P_2}{\partial t}-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{m_2 K_{\text{г}}}{\mu_1 ZRT} P_2 \frac{\partial P_2}{\partial x_i}\right)=q;$$

уравнение движения газа в микропорах:

$$\operatorname{div}\left[\left(\frac{P_3}{ZRT}+D_{\text{г}}\right)\operatorname{grad} P_3\right]=\frac{1}{ZPT}\frac{\partial P_3}{\partial t};$$

геометрические уравнения для твердой фазы

$$\varepsilon_{ij}=0{,}5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right);$$

$$V_i=\frac{\partial u_i}{\partial t};$$

уравнения состояния (физические уравнения) для твердой и газообразной фаз:

$$\sigma_{ij}=2\mu\varepsilon_{ij}+\delta_{ij}\left(\lambda e - c_1\xi_1 - c_2\xi_2\right);$$

$$P_2=-c_1 e + M_1\xi_1 + N\xi_2;$$

$$P_3=-c_2 e + M_2\xi_2 + N\xi_1,$$

где t – время; ρ_1 – плотность «скелета»; m_1 – мощность пласта (фильтрующкго слоя); V_i – средняя скорость движения «скелета»; σ_{ij} – тензор напряжений; m_2 и m_3 – объемная макро- и микропористость; Z – коэффициент сжимаемости газа; P_2, P_3 – давление газа в макро- и микропорах; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура среды; x_i – текущие координаты; $K_{\text{г}}$ – коэффициент газопроницаемости среды; μ_1 – вязкость газа; q – интенсивность перетока газа; $D_{\text{г}}$ – коэффициент диффузии; ε_{ij} – тензор деформаций; λ, μ – обобщенные коэффициенты Ламе; δ_{ij} – символ Кронекера; e – объемная деформация «скелета»; c_1, c_2, M_1, M_2, N – упругие коэффициенты в представлении энергии через инварианты деформации (e, ξ_1; ξ_2).; $\xi_1 = \operatorname{div} m_2 \times \times (\vec{U}^{(2)} - \vec{U}^{1}); \xi_2 = \operatorname{div} m_3 = (\vec{U}^{(3)} - \vec{U}^{1});$ $\operatorname{div} = \partial/(\partial x_1) + \partial/(\partial x_2) + \partial/(\partial x_3)$; $\vec{U}^{(1)}$, $\vec{U}^{(2)}$, $\vec{U}^{(3)}$ – векторы перемещений соответственно твердой, газообразной в макропорах и газообразной в микропорах фаз.

Задавая некоторые граничные и начальные условия, можно конкретизировать решение рассматриваемой задачи. Однако для исследуемого объекта получение замкнутого решения будет предопределено как заданной геометрией его контура и условиями на нем, так и специальными (в значительной мере априорными) представлениями о истинном НДС объекта. Возникающие в связи с этим трудности получения количественных показателей исследуемых процессов говорят об ограниченности использования чисто аналитических подходов к решению рассматриваемой проблемы. В то же время рациональным следует считать выполнение проверочных аналитических оценок для отдельных «узлов» комплексного алгоритма решения данных вопросов.

В большей степени целесообразным и практически оправданным следует считать подход, базирующийся на экспериментально-аналитическом принципе определения интересующих нас количественных показателей изучаемых процессов. Такой подход позволяет субпозиционно подойти к решению проблемы, объединяя феноменологический принцип оценок процессов фильтрации газа в массиве с методами численной (экспериментальной) оценки геомеханического состояния пород, обусловленного теми или иными техногенными процессами в недрах и их посттехногенным воздействием на вмещающий пласты массив. В этом случае очевидна и необходимость пространственно-временной синхронизации в изучении данных процессов. Последняя может быть достигнута за счет постадийного рассмотрения процессов в течение времени работы шахты, включая и момент ее ликвидации.

Геомеханическое состояние массива горных пород может быть оценено на основании численных решений [1]. Таковые, с высокой точностью отражения адекватных состояний изучаемого объекта, возможно

получить, применяя известный метод граничных элементов (ГЭ), который в общей постановке сводится к решению граничного интегрального уравнения или его матричного аналога вида

$$A \times P = R,$$

где A – матрица преобразования единичных усилий в напряжения, действующие в произвольных точках пространства; P – матрица искомых усилий на участках; R – вектор граничных усилий на участках.

Для оценки геомеханического состояния объекта наиболее удобно применение метода разрывных смещений как варианта метода ГЭ. Оценка параметров фильтрационных процессов во взаимосвязи с отмеченным механическим состоянием пород, определяющая возможный каптанаж метана, может быть выполнена с использованием ряда практически реальных (в феноменологическом плане) допущений. Например, плановый характер фильтрации газа в слоистом массиве достаточно предопределен условиями развития «генеральных» зон трещинообразования в подрабатываемых толщах пород при их деформировании. Основной фильтрующийся поток газа может быть отнесен к трещиноватой (макропористой) среде, превалирующе определяющей эффективную ее пористость. Движение газа в таких средах с достаточной точностью будет соответствовать условиям его ламинарного течения. Очевидно, что в рамках рассматриваемой проблемы можно не учитывать диффузионный перенос газа, характерный для микропористой части коллектора. В такой постановке фильтрационные процессы, на базе которых оценивается возможный каптанаж метана из подрабатываемых недр, будут характеризоваться следующими зависимостями: уравнением фильтрации (Дарси)

$$U = -\frac{k}{\mu}\mathrm{grad}P;$$

уравнением состояния фильтрующегося газа

$$P = R_0 T \rho;$$

уравнением сохранения массы фильтрующегося (свободного) газа

$$\frac{\partial(n_0\rho)}{\partial t} = \mathrm{div}(\rho U),$$

где U – средняя объемная скорость фильтрации; k – коэффициент проницаемости массива; μ – динамическая вязкость метана; P – давление газа; R_0 – удельная газовая постоянная; T – температура пород; ρ – плотность газа (в функции P); n_0 – трещинная пористость массива.

Возможный дебит метана следует оценивать при соответствующим образом заданных граничных и начальных условиях.

Приведенная методика, используемая для изучения комплексного освоения энергоресурсов угольных месторождений, позволяет применительно к конкретным условиям получать инженерные зависимости для количественной оценки всех основных параметров исследуемых процессов.

Таким образом, на основании рассмотренного подхода может быть предложен следующий алгоритм практического решения проблемы:

- опережающая экспертная оценка горно-геологических условий отработки шахтных полей предприятий, в том числе и планируемых в соответствии с программой реструктуризации к закрытию;
- внесение возможных корректировок в схемы (порядок) ведения горных работ вплоть до момента закрытия шахт, которые предусматривают изменение геомеханического состояния надрабатываемого и подрабатываемого массива для повышения эффективности его «газоотдачи»;
- организация по разработанным схемам управления метановыделением из углевмещающих толщ, включая возможность его целенаправленного каптажа и использования в качестве дополнительного энергетического сырья.

В целом можно констатировать, что рассмотренные вопросы комплексного извлечения энергосырья на угольных месторождениях представляют значительную научную и практическую проблему. Своевременное ее решение будет способствовать повышению как уровней технической и экологической безопасности шахт, так и их

конкурентоспособности на рынке угля, в том числе и за счет использования добытого метана в инфраструктуре регионов угольных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мозер С.П.* Горная геомеханика: физические основы и закономерности проявлений геомеханических процессов при подземной разработке месторождений / С.П.Мозер, Е.Б.Куртуков. СПб: Недра, 2009. 136 с

2. *Петренко Е.В.* Развитие инновационной деятельности в угольной отрасли России // Уголь. 2006. № 1. С.30-34.

3. *Пучков Л.А.* Решение проблем угольного метана: метанобезопасность, промышленная добыча газа, экология/ Л.А.Пучков, С.В.Сластунов // Уголь. 2005. № 5. С.5-7.

REFERENCES

1. *Mozer S.P., Kurtukov E.B.* Rock mechanics: basic physics and mechanism of occurrence of geomechanical processes in underground mining / Saint Petersburg: Nedra, 2009.136 p.

2. *Petrenko E.V.* Development of innovative activity in Russia coal branch // Ugol. 2006. № 1. P.30-34.

3. *Puchkov L.A., Slastunov S.V.* Decision of problems of coal methane: methane-safety, an industrial gas production, ecology // Ugol. 2005. № 5. P. 5-7.