

УДК 622.59.46

К.Д. Лукин

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ И ГАЗА В УГЛЕПОРОДНОМ МАССИВЕ\*

Увеличение глубины разработок и зоны сдвижения пород сопровождается повышением метанообильности и водопритока в выработки угольных шахт, предъявляет повышенные требования к методам прогноза и оценки газового состояния разрабатываемых месторождений и их водонасыщенности. Математическая модель должна учитывать анизотропию углепородного массива. Уточнение моделей взаимодействия газов, воды на основе законов нелинейной фильтрации является актуальной научно-практической задачей. Создание методик, алгоритмов и программ расчетов на ЭВМ параметров фильтрации жидкостей и газа, в первую очередь, требует анализа и обобщения моделей движения воды и газа в указанных условиях с учетом напряженно-деформированного состояния горного массива.

Для описания движения жидкостей и газов в пористых средах предложены различные модели фильтрации, в частности:

- линейная модель Дарси [1]:

$$\vec{V}^{\rho} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla(P + \gamma h), \quad \gamma = g\rho; \quad (1)$$

- модель с начальным градиентом давления [1]:

$$\vec{V}^{\rho} = \begin{cases} -\frac{\kappa}{\mu} \left(1 - \frac{\rho}{|\nabla P|}\right) \nabla P, & \text{при } |\nabla P| \geq \rho \\ 0, & \text{при } |\nabla P| \leq \rho \end{cases}; \quad (2)$$

- полигональная модель [1]:

$$\vec{V}^{\rho} = \begin{cases} -\frac{\kappa}{\mu} \left(1 - \frac{\beta \mu}{|\nabla P|}\right) \nabla P, & \text{при } |\nabla P| \geq \beta \\ -\frac{\kappa}{\mu} \nabla P, & \text{при } |\nabla P| \leq \beta \mu_0 = 1 - \frac{\mu}{\nu} \end{cases}; \quad (3)$$

- модель Хеega [1]:

$$\vec{V}^{\rho} = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{|\nabla P|}{\beta + |\nabla P|} \nabla P; \quad (4)$$

- гиперболическая модель [2]:

$$\vec{V}^{\rho} = -\frac{\kappa}{\mu} \left[ \sqrt{\beta^2 + (\nabla P)^2} - \beta \right] \frac{\nabla P}{|\nabla P|}; \quad (5)$$

- модель, рекомендованная М.Г. Алишеевым [5]:

$$\vec{V}^{\rho} = \begin{cases} -\frac{\kappa}{\mu} \nabla P & \text{при } |\nabla P| \geq \beta, \quad V_0 = \frac{\kappa}{\mu} \\ 0, & \text{при } |\nabla P| \leq \beta \end{cases}; \quad (6)$$

- двучленная модель [4]:

$$-\nabla P = \frac{\mu}{\kappa} \vec{V}^{\rho} + \frac{\rho}{l} |\vec{V}^{\rho}| \vec{V}^{\rho}; \quad (7)$$

- обобщенная модель Дарси [1]:

$$\vec{V}_i^{\rho} = -\frac{\kappa}{\mu_i} \kappa_i^* (S_i) \nabla(P_i + \gamma_i h); \quad (8)$$

- модель фильтрации, предложенный С.А. Христиановичем [2]:

$$-\nabla P = \Phi \left( \frac{\rho}{|\vec{V}^{\rho}|} \right) \frac{\vec{V}^{\rho}}{|\vec{V}^{\rho}|}, \quad (9)$$

где  $\vec{V}^{\rho}$  и  $|\vec{V}^{\rho}|$  - скорость и модуль скорости фильтрации соответственно;  $\mu$  и  $\nu$  - коэффициенты динамической вязкости соответственно при больших и малых градиентах давления;  $\beta$  - значение начального градиента давления;  $\kappa_i^*$  и  $\kappa$  - коэффициенты фазовой проницаемости и проницаемости пористой среды;  $\rho$  - плотность;  $l$  - некоторый характерный коэф-

\*Работа выполнена по тематическому плану НИР СибГИУ по заданию Минобразования РФ: «Разработка теории миграции флюидов в неоднородном массиве под влиянием переменных механических напряжений и температуры». Регистрационный номер 1.3.04.

фициент;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $h$  – расстояние от рассматриваемой точки среды до некоторой фиксированной поверхности;  $\Phi$  – заданная функция.

Большое число исследований по теории фильтрации выполнялось в пределах перечисленных моделей (1)-(9) при различных режимах фильтрации. Результаты этих исследований отражены в многочисленных научных статьях, монографиях и обзорных работах. Так, А. Х. Мирзаджанзаде [4] предложил феноменологическую теорию фильтрации жидкости, в основе которой лежит модель фильтрации с начальным градиентом давления (2).

Если же фильтрация жидкости при малых градиентах давления оказывает заметное влияние на фильтрационную картину в целом, и, следовательно, ею нельзя пренебречь, то в этом случае необходимо пользоваться моделями фильтрации, которые учитывают течение жидкости при малых градиентах давления. К указанным моделям можно отнести полигональные (3) и гиперболические (5) модели фильтрации [2, 5]. В литературе описаны и другие виды фильтрации жидкостей в пористой среде. Так, В. Хеег и Ф.Хефнер [3] предложили модель фильтрации вида (4). В работах М.А. Сагтарова [4] приводятся серии таких формул скорости фильтрации в капиллярах и пористых средах в зависимости от градиентов напора.

Для математического описания фильтрации жидкости и газа с начальным градиентом давления так же были введены различные модели механической среды. Сюда можно отнести и приближенную модель фильтрации (6). Достоинством данной модели с математической точки зрения является ее простота. В обзоре работы [5] В.Н. Ентовым сформулирована задача об определении предельно равновесной конфигурации потока жидкости, возникающей при вытеснении ее газом. В области движения воды имеет место модель Дарси, откуда следует, что на границе сред модуль скорости равен  $\frac{\kappa}{\mu} \beta$ .

Кроме моделей фильтрации, где формулировки задачи о вытеснении друг другом двух сред, используются уравнения неразрывности для каждой из фаз. Поскольку предполагается, что среды взаимно нерастворимы, уравнение неразрывности могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m\rho_i S_i) + \text{div}(\rho_i \vec{V}_i) = 0, \quad (10)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности фаз;  $S_1 + S_2 = 1$ ,  $S_i$  – насыщенность  $i$ -й фазы.

В работе А. Бана на основе схемы предельной анизотропии рассматривалось вытеснение в двухслойном пласте без учета сил гравитации. Из предположения о равенстве давлений в каждой из фаз в обоих слоях следует, что капиллярные давления также должны быть одинаковыми, а это, в свою очередь, означает, что насыщенности слоев  $S_1$  и  $S_2$  удовлетворяют соотношению:

$$P_{c1}(S_1) = P_{c2}(S_2) \quad (11)$$

Для правильного описания тех или иных фильтрационных процессов, протекающих в пористых средах, основополагающую роль играет модель фильтрации. Кроме того, немаловажное значение имеет форма его записи, связанная с математическими вопросами исследования и получения решения краевых задач теории фильтрации. В некоторых случаях предпочтительно приведение модели фильтрации к виду, предложенному С.А. Христиановичем (9), а в других – целесообразна форма, разрешенная относительно скорости фильтрации. На основании проведенного анализа использования моделей для описания условий фильтрации воды и газа в сообщающихся слоях горных пород, имеющих различные физико-механические характеристики рекомендуется принимать второй случай, поэтому модели (1)-(6) можно переписать в следующем формализованном виде:

$$\vec{V}_i = -\frac{\kappa}{\mu_i} \kappa_i^* (\nabla P_i, \beta, \lambda) \nabla P \quad (12)$$

где  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5)$  – параметр формализации; функция  $\kappa_i^*$  имеет достаточно сложный вид и поэтому в работе не приводится. Однако анализ ее показывает, что форма записи в виде (12) позволяет генерировать различные модели (1)-(6) при различных значениях  $\beta$  и  $\lambda$ . Действительно, при  $\beta=0$  следует линейная модель Дарси – (1); при  $\beta > 0$  и  $\lambda = (1,0,0,0,0)$ ;  $\lambda = (0,0,0,1,0)$ ;  $\lambda = (0,1,0,0,1)$ ;  $\lambda = (0,1,1,0,1)$ ;  $\lambda = (0,0,0,0,0)$  – модели фильтрации (2)-(6).

Следовательно, основное преимущество модели (12) сводится к разработке единого вычислительного алгоритма, позволяющего получать решение задач в различных постановках по одной программе.

На основе проведенного анализа и обобщения моделей движения воды и газа в углепо-

родном массиве рекомендуется в качестве основного использовать алгоритм (12). Реализация этого алгоритма в настоящее время проводится посредством численного решения методом конечных элементов системы дифференциальных уравнений. Программа исследований включает в себя поэтапное решение следующих задач: определение напряженно-деформированного состояния углеродного

массива вне и в зоне влияния горных выработок; расчет исходного водо- и газонасыщенного состояния углеродного массива вне зоны влияния горных выработок; пошаговое моделирование (в соответствии со скоростью движения забоя) напряженно-деформированного состояния углеродного массива, миграции воды и газа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хеег В.О. формировании нелинейного закона фильтрации и о численном решении многомерных задач фильтрации/В. Хеег, Ф.О. Хефнер//В сб.: численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости.- Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1975, с. 315-318.

2. Молокович Ю.М. Фильтрация жидкостей в условиях проявления релаксационных и нелинейных эффектов/Ю.М. Молокович// Автореф. докт. дисс.,-Казань, 1978.

3. Минский Е.М. Приближенное решение задачи об установившейся фильтрации реальных газов/Е.М. Минский, Ю.П. Коротаев, Г.А. Зотов// Труды ВНИИГаз, М.: Гостехиздат, 1963, вып. 18/26.

4. Саттаров М.А. О неустановившейся фильтрации в слоистых грунтах/М.А. Саттаров//ЖПМ и ТФ, 1970, №4, с. 106-112.

5. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1987 гг.). Сб. под ред. П.Я. Кочина. – М.: Наука, 1990.

#### Коротко об авторах

Лукин Константин Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Разработка пластовых месторождений» Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк.



© К.Д. Лукин, 2005

УДК 622.272.013.3

**К.Д. Лукин**

### **ИЗВЛЕЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАНА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Семинар № 12

С увеличением глубины горных работ и необходимостью отработки высококачественных углей, резко возросла опасность ведения горных работ, связанная с внезапными выделениями и взрывами пыле-газо-воздушной смеси (шахты «Зырянская», «Первомайская»,

«Шевякова», «Тайжина», в Кузбассе и др. В такого рода авариях решающую роль играет газ метан. В угольных бассейнах России общий объем метана оценивается в пределах от 100-150 до 240-250 трлн м<sup>3</sup> [3, 6]. Достоверно можно оценить ресурсы метана лишь в

разведанных пластах угля и приближенно в спутниках и прослоях. Кроме того, поступление в атмосферу свободного метана оказывает негативное влияние на климатические условия угледобывающего региона. Было отмечено, что в болотистых низменностях среднегодовая температура атмосферы непосредственно над поверхностью на 3–5 градуса выше средней по региону. Данный факт наглядно свидетельствует о связи выделяемого метана и, так называемого, «парникового» эффекта, поэтому нельзя пренебрегать довольно значимым влиянием свободного газа в формировании климата на Земле.

В этой связи актуальными являются исследования, направленные на решение следующих задач:

- предварительная дегазация месторождений;
- дегазация через скважины выработанного пространства;
- использование подземных вакуумных установок;
- выделение метана в шахтовую вентиляционную сеть.

Идея предварительной дегазации угольных пластов, реализованная в различных технологических схемах, получила широкое признание как эффективный путь снижения метаноопасности отработываемых угольных пластов. Данный способ применяется как на строящихся (проектируемых шахтных полях), так и на уже работающих предприятиях. В данном случае предварительная дегазация угольных пластов, предлагаемых к отработке, и пластов-спутников осуществляется через сеть пробуренных геологоразведочных скважин. Кроме того, наряду с решением чисто геологических задач, производится апробация технологий интенсификации газоотдачи в продуктивных группах пластов и в дальнейшем откачкой свободного газа. Это может быть кавитация, гидроразрыв, акустическое и электровоздействие на углепородный массив. Следует отметить, в данном случае речь идет о скоплениях в угольных пластах сорбированного метана, доля которого может достигать 90–95 %. В свою очередь, добытый газ метан, по возможности, необходимо использовать в народно-хозяйственных нуждах.

Дегазация через скважины выработанного пространства осуществляется следующими способами:

- с земной поверхности;

- непосредственно из подземных горных выработок.

Первый способ считается наиболее эффективным, т.к. возможно использование уже сформированной структуры технологического комплекса. В данном случае обычно проблемы возникают с восстановлением, ремонтом или повторным бурением газотсасывающих скважин. При использовании газотсасывающих скважин в подземных условиях резко снижается общая безопасность ведения горных работ в целом с одновременным повышением материальных затрат на добычу угля.

Содержание метана в выдаваемой средстами дегазации на поверхность газовоздушной смеси находится в пределах от 20 до 50 %, редко более 70 %. В промышленных целях по условиям взрывобезопасности допускается использование метановоздушных смесей с содержанием метана менее 2,5 %.

Способ с использованием подземных вакуумных установок не лишен выше перечисленных недостатков с проведением дополнительной газодренажной выработки. В данном случае концентрация метана в газовоздушной струе не постоянна и может составлять 2-95 %, что ставит под вопрос возможность утилизации и последующего использования метана. Благодаря разработанным в Кузбассе способам газоправления на выемочных участках шахт средствами вентиляции до 80 % метана, выделяющегося в зоне рабочих мест удается вывести на поверхность, минуя действующие выработки.

В настоящее время, в угольных шахтах мира при добыче угля выделяется ежегодно 25-28 млрд м<sup>3</sup> метана [1-3]. Большая часть из этого количества (свыше 80 %) выбрасывается в атмосферу с вентиляционной струей при содержании в ней метана менее 1 %.

До середины XX века единственной мерой борьбы с метаном была вентиляция, которая не всегда обеспечивала безопасные условия в шахтах и высокую интенсивность ведения горных работ. Выделение метана из углепородного массива в шахтовую вентиляционную сеть в настоящее время является определяющим фактором в возникновении аварийных ситуаций. К сожалению, следует констатировать, что в большинстве своем этот процесс является неуправляемым. Значительной проблемой является использование низкоконцентрированных метановоз-

душных смесей, т.е. метана, выдаваемого из шахт вентиляционной струей. Существуют различные схемы утилизации метана при его концентрации в газозвушной смеси менее 0,75 %; совместное сжигание с углем под слоем твердого топлива (в опытной установке в шахтоуправлении "Октябрьское", Донецкий угольный бассейн, достигнуто снижение расхода угля на 25-30 %); высокотемпературное окисление метана для использования в газотурбинных установках; каталитическое окисление; прямое сжигание в вихревых потоках.

На шахте Stafford (Великобритания) создана экспериментальная двухкамерная установка для полной утилизации метана исходящей вентиляционной струи. В специальной камере-рекаупере низкоконтрированная газозвушная смесь (концентрация метана 1,5 %) нагревается до температуры 1273 °С, в результате чего сгорает практически весь метан. В другой камере сжигают кондиционный шахтный метан. Обе струи газов смешивают и подают на газовую турбину генератора (мощность 2000 кВт).

По данным [6] возможно эффективное повышение нижнего предела концентрации метана в используемой для энергетических целей газозвушной смеси до 3,5 % и снижение верхнего предела до 25 %, Реализация полученных данных и разработка соответствующих схем и технических средств требуют проведения специальных исследований.

Недостатками изложенных методов является отсутствие системы комплексного воздействия на углепородный массив. По мнению автора эффективными являются способы, использующие закономерности деформирования и разрушения угля и горных пород в окрестности горных выработок, миграции газа и воды в углепородном массиве, изменение температуры. Для достижения поставленной цели нужна математическая модель, описывающая взаимодействие этих процессов. Данная модель позволит оптимизировать параметры управления газ-вода-НДС. В настоящее время такая система создается в Сибирском государственном индустриальном университете.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айруни А.Т. Разработка угольных пластов в шахтах с высоким уровнем выделения метана и газодинамическими явлениями за рубежом/А.Т. Айруни, Е.И. Слепцов, П.М. Зенкович. - М.: ЦНИЭИуголь, 1990. - 63 с.
2. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах/А.Т. Айруни. - М.: Наука, 1987. - 310 с.
3. Архипов Н.А. Добыча угля и рациональное природопользование/Н.А. Архипов, Е.А. Ельчанинов, Д.Т. Горбачев. - М.: Недрa, 1987, 285 с.

4. Агошков М.И. Развитие идей и практики комплексного освоения недр/М.И. Агошков// Горный журнал. - 1984. -№ 3.-С. 3-6.
5. Баймухаметов С.К. Опыт извлечения запасов мощного пласта на ранее отработанных участках/С.К. Баймухаметов, А.Г. Саламатин, Н.А. Абдикаримов // Уголь. - 1986. -№ 2.- С. 30-32.
6. Перспективы использования ресурсосберегающих технологий в угольной промышленности/А.А. Беляев, И.П. Крапчин, М.Я. Шпирт и др. - М.: ЦНИЭИуголь, 1991. - 49 с.

#### Коротко об авторах

Лукин Константин Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Разработка пластовых месторождений» Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк.

