

УДК 622.831

И. С. Елкин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССОПЕРЕНОСА В УГОЛЬНОМ МАССИВЕ ПРИ УВЛАЖНЕНИИ

На практике при расчетах технологических параметров предварительного увлажнения угольных пластов руководствуются техническими возможностями и инструкциями по ведению горных работ на угольных пластах склонных к горным ударам и выбросам [2]. Как показывают многочисленные исследования, основная формула для расчета радиуса увлажнения лишь приближенно оценивает величину радиуса увлажнения. Поэтому в целях повышения эффективности увлажнения необходимо проведение более глубоких теоретических исследований процессов массопереноса в угольном массиве при увлажнении, разработка модели, учитывающая все факторы протекающего процесса и позволяющая произвести расчет основных технологических параметров, например, расход жидкости, давление нагнетания, расстояние между скважинами, время нагнетания и др.

Для описания процессов движения жидкости и газа в угольном массиве при увлажнении используют уравнения массо- и теплопереноса. В общем виде эти уравнения могут быть записаны в виде дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial(u\rho)}{\partial t} = -\operatorname{div}(\vec{j}_{\text{диф}} + \vec{j}_{\text{мол}}) + I, \quad (1)$$

или

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\operatorname{div}(D\nabla C) + I, \quad (2)$$

где $\vec{j}_{\text{диф}} = \rho\vec{v}$ – плотность диффузионного потока; $\vec{j}_{\text{мол}}$ – плотность молекулярного потока; C – концентрация; D – коэффициент диффузии; u – удельное содержание жидкости; I – источник жидкости или газа или сток; ρ – плотность.

Закон фильтрации Дарси при действии сил напорного давления и сил тяжести для двухфазной системы можно записать в виде

$$\vec{v}_w = -\frac{K_{\text{пр}}}{\eta_w}(\nabla P + \rho g \nabla h), \quad (3)$$

$$\vec{v}_g = -\frac{K_{\text{пр}}}{\eta_g}(\nabla P + \rho g \nabla h), \quad (4)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент проницаемости пористого тела; η_w, η_g – коэффициент вязкости воды и газа, соответственно; h – гидравлический напор жидкости; P – давление.

К этой системе уравнений необходимо добавить уравнение неразрывности массового потока

или закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\vec{v}) = 0. \quad (5)$$

Уравнения состояния для фаз гетерогенной системы приближенно можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \rho_s &= \text{const}, \\ \rho_w &= \text{const}, \\ \rho_g &= \frac{PM}{RT}, \end{aligned} \quad (6)$$

где ρ_s – плотность скелета пористой среды; ρ_g – плотность газа; ρ_w – плотность воды; $R=8.31$ Дж/(К·моль); M – молярная масса газа; P, T – давление и температура газа, соответственно.

Для решения краевой задачи к системе уравнений добавляются граничные и начальные условия для давления:

$$\begin{aligned} p(t, 0, y, z) &= f(t, 0, y, z); \\ p(t, l, y, z) &= f(t, l, y, z); \\ p(0, x, y, z) &= f(x, y, z). \end{aligned}$$

При нестационарном протекании процесса увлажнения многие коэффициенты в уравнениях (1) – (4) изменяются в зависимости от внешних условий, воздействий или других факторов. Эти зависимости можно представить в виде набора эмпирических функций:

$$\begin{aligned} K_{\text{пр}} &= f(t, x, y, z, T); \\ \sigma, \eta &= f(t, x, y, z, T); \\ Q &= f(t, x, y, z, T), \end{aligned}$$

где t, T – время и температура, соответственно; Q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

С течением времени коэффициент проницаемости при увлажнении вследствие протекания динамических или физико-химических процессов в угле, например, процесса набухания, изменяется по закону

$$K_{np} = K_{np0} (\beta + \exp(-\alpha t))$$

(рис. 1) [1], где K_{np0} – коэффициент фазовой проницаемости в данном направлении для сухого угля; α, β – эмпирические постоянные, которые зависят от внешних параметров, определяющих внешнее воздействие на систему.

Дополнительно необходимо учесть, что напряжения в краевой части угольного массива изменяются с расстоянием X от очистного забоя или подготовительной выработки. Общее уравне-

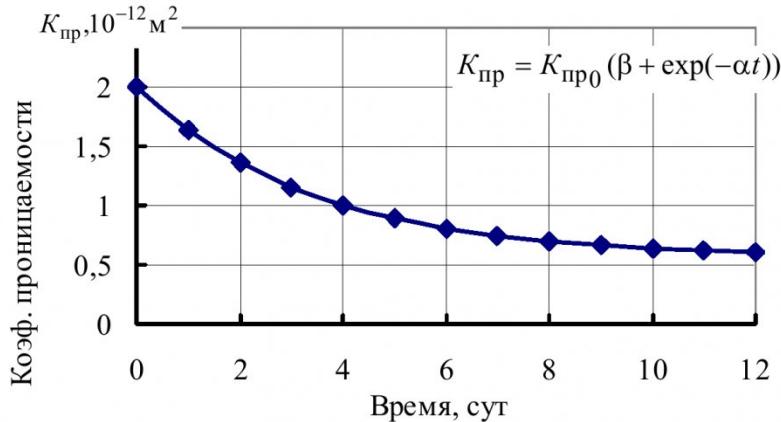


Рис.1. Изменение проницаемости с течением времени

ние для напряжений в краевой части угольного массива можно представить в виде уравнения [3] (рис. 2)

$$\sigma(x) = a(x - c) \cdot e^{-bx} + \sigma_0. \quad (7)$$

где a, b, c, σ_0 – параметры, зависящие от горно-

геологических условий залегания пласта и технологии его вскрытия.

Коэффициент проницаемости закономерно зависит от напряженного состояния угольного массива по закону (рис. 3)

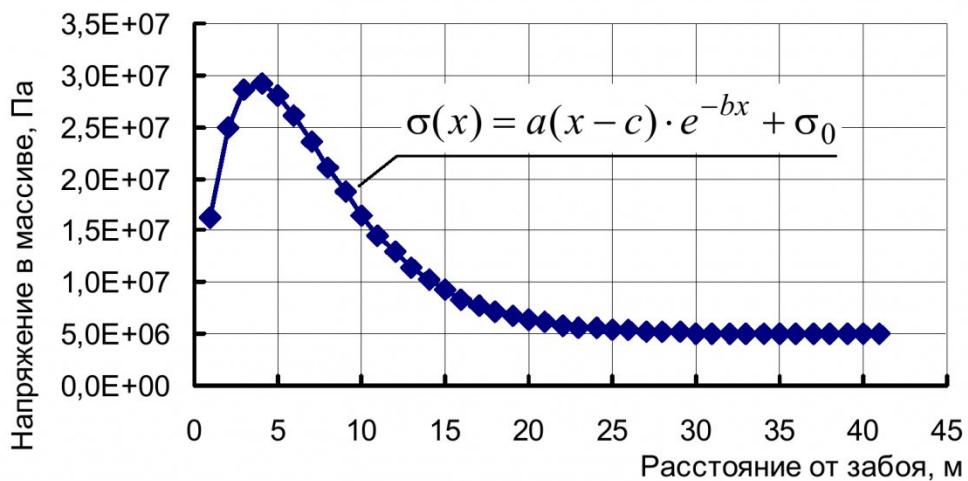


Рис.2. Изменение нормальных напряжений в краевой части угольного массива

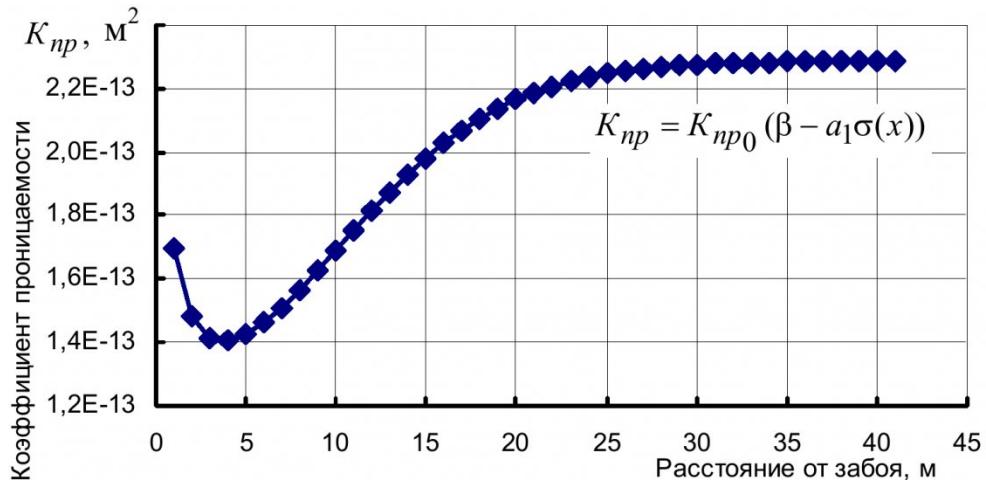


Рис.3. Изменение проницаемости в краевой части угольного массива

$$K_{np} = K_{np_0}(\beta - a_1 \sigma(x)) = \\ = K_{np_0}(\beta - a_1((x - c) \cdot e^{-bx} + \sigma_0)), \quad (8)$$

где K_{np_0} , a_1 , β , γ – эмпирические постоянные.

В зоне максимума опорного давления коэффициент проницаемости принимает минимальное значение. В глубине величина проницаемости массива соответствует значениям, характерным для нетронутого массива.

Нами была разработана программа, позволяющая на основе численных методов произвести расчет по вышеприведенным уравнениям основных технологических параметров увлажнения угольного массива.

Используя основную формулу из [2], мы оцениваем радиус действия от одной скважины

$$R_{\text{увл}} = 31,6 \sqrt{Q_T t / \pi \cdot m N \gamma}, \quad (9)$$

где $N = 10(W_{m2} - W_e)$ – норма увлажнения, л/т; W_{m2} – максимальная гигроскопическая влажность, %; W_e – естественная влажность, %; Q_T – темп нагнетания, м³/ч; t – время нагнетания, ч; m – мощность пласта, м; γ – объемная плотность угля, т/м³.

Затем, подставляя основные параметры в программу, рассчитываем время нагнетания при начальных и краевых условиях, а также при дополнительных связях (6) – (8). Например, требуется

определить необходимое время нагнетания воды двумя скважинами, пробуренных по напластованию из вентиляционного штрека. По формуле (9) для пласта мощностью 2,0 м при коэффициенте анизотропии 1,6, рабочей пористости 6% и газовом давлении в пласте 1 атм расстояние между скважинами составит 2,8 м при ориентировочном времени увлажнения 2 ч. Расход жидкости считаем постоянным равным 0,8 м³/ч при давлении нагнетания 10 МПа, что соответствует общим рекомендациям согласно [2] для глубины разработки 280 м. В программе при расчете задаем точку контроля, находящуюся по середине между скважинами с координатами (5, 16, 3). Основным параметром для контроля является влажность массива. Дополнительно задаем длину герметизации скважины 5 м, при общей длине скважины $l = 32$ м. Расчет прекращается при достижении необходимой влажности в контрольной точке массива.

На рис. 4 приведены результаты расчетов распределения влажности при увлажнении угольного пласта двумя скважинами. Очевидно, что наилучшее увлажнение наблюдается в зоне с большей проницаемости – в глубине массива. Результаты расчетов показывают, что минимальное необходимое время нагнетания для данных условий составляет 3,5 ч.

Таким образом, методом последовательных приближений мы определяем значения технологических параметров увлажнения, а также нагляд-

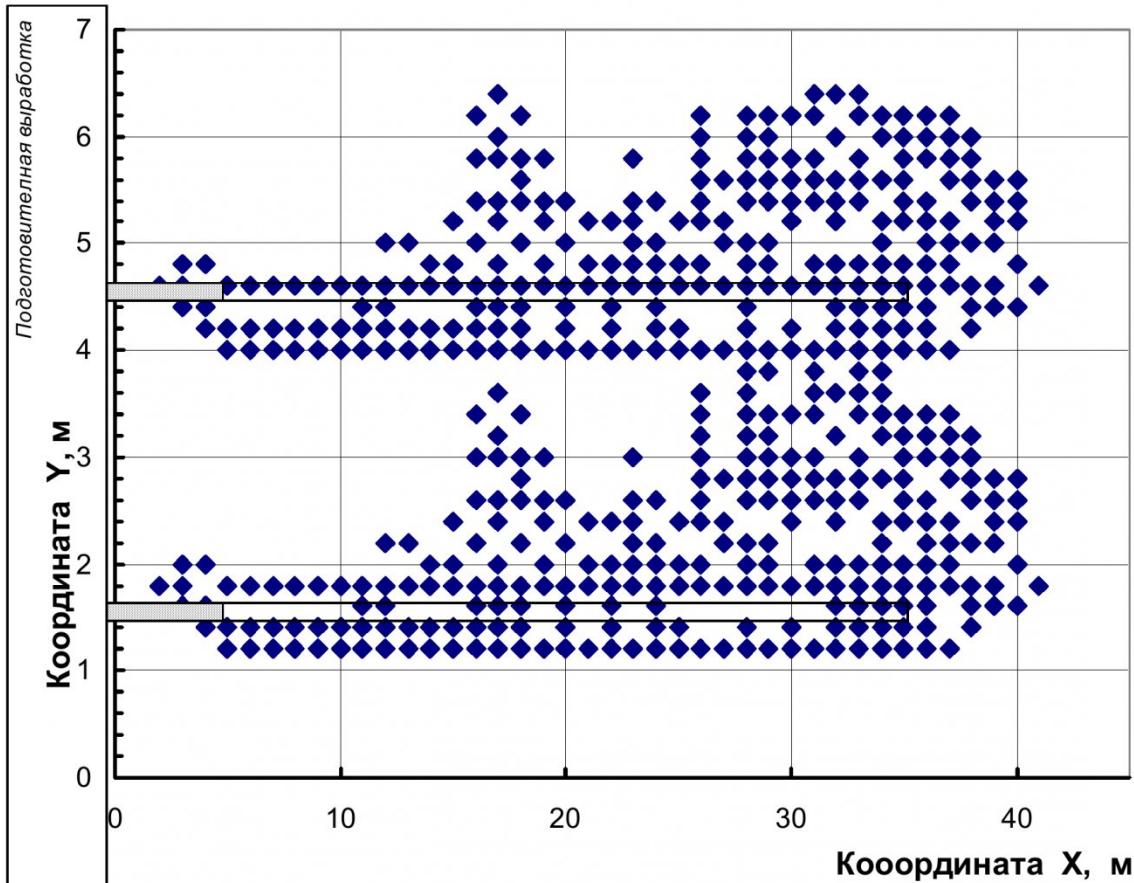


Рис.4. Распределение воды в краевой части угольного массива

но представлять протекание процесса увлажнения массива.

В более сложном случае необходимо учитывать изменение свойств жидкости, газа и твердого тела, а также изменение фильтрационных свойств взаимодействующих фаз и влияние внешних физических воздействий. Функционально также можно учесть влияние изменения давления нагнетаемой жидкости при нестабильной работе насоса.

Дополнительные исследования на модели показывают, что при наличии магистральных трещин или разломов в пласте достижение необходимой влажности и равномерности распределения влаги становится проблематичным. Бурение скважин в этом случае необходимо осуществлять с учетом расположения трещин, так чтобы скважина не пересекала их.

В натурных условиях для достижения максимальной эффективности противовыбросных мероприятий необходимо дополнительно использовать современные системы контроля за процессами увлажнения [4, 5] основанные на электрометрических, акустических или иных методах измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елкин, И. С. Повышение эффективности низконапорного увлажнения угольных пластов / И. С. Елкин, В. В. Дырдин, В. Н. Михайлов. – Кемерово: Кузбассвязиздат, 2001. – 100 с.
2. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих пластины, склонные к горным ударам (РД 05-328-99). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). – М.: Государственное предприятие НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – С 4 – 119.
3. Плотников, Е. А. Влияние очистных работ на геомеханическое состояние массива в зоне подготовительных выработок / Е. А. Плотников, В. В. Дырдин, В. П. Тациенко [и др.]. // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., – 2004. – №5. – С. 10–12.
4. Егоров, П. В. Исследование разрушения твердых тел методом регистрации импульсного электромагнитного излучения / П. В. Егоров, Л. А. Колпакова, А. А. Мальшин [и др.]. – Кемерово : Кузбассвузиздат, 2001. – 201 с.
5. Шиканов, А. И. Оценка ударо- и выбросоопасности увлажненных зон угольных пластов / А. И. Шиканов, В. В. Дырдин, О. П. Егоров и др. – Кемерово: Кузбассвязиздат, 2000. – 134 с.

Автор статьи:

Елкин
Иван Сергеевич
- канд. техн. наук, доц. каф. физики
КузГТУ,
e-mail: jelkin@mail.ru