

Р.А.Агаев, вед. инж.,
К.К. Софийский, д.т.н., проф.,
(ИГТМ)

П.Е. Филимонов, к.т.н.,
(шахта им. А.Ф. Засядько)

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПНЕВМОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

У роботі розглянуто математична модель процесів пневмодинамічного впливу на газо-насичений тріщинувато-пористий порідний масив та встановлення закономірностей процесу пневмодинамічного впливу.

INDUCEMENT OF PROCESS OF THE PNEUMODYNAMICAL INFLUENCE

In a work the mathematical model of processes of the pneumodynamical influence on the mountain range which appear gas-saturated, cleft-porous and inducement of process the pneumodynamical influence.

Отличительной особенностью пневмодинамического воздействия на пористый водогазонасыщенный пласт, сорбирующий породугольный массив является повышение его фазовой проницаемости для газа, независимо от режима внедрения воздуха в пласт, а также снижение сорбционной способности угля для метана за счет нагрева угля воздухом и вследствие химической реакции кислорода воздуха с угольным веществом на поверхностях пор и трещин [1].

Внедрение воздуха в пласт происходит как по естественным путям фильтрации, так и по раскрывающимся естественным трещинам пласта. Раскрытие трещин происходит ввиду недостаточности фильтрующей способности пласта для пропуска всего подаваемого воздуха, что приводит к повышению давления и, как следствие этого, к раскрытию естественных трещин пласта, являющихся поверхностями ослабления массива.

Рассматривается математическая модель процессов пневмодинамического воздействия на газонасыщенный трещиновато-пористый породный массив и ставится задача контроля технологических параметров.

Исходные физические предпосылки для теоретического описания процесса:

- 1) воздействие осуществляется путем создания давления воздуха в скважине, пробуренной на определенную глубину в породном массиве, содержащем газ метан в связанном состоянии, с последующим его сбросом;
- 2) целью воздействия является активизация газовыделения из массива как средство его дегазации;
- 3) за счет воздействия воздуха, давление в котором доводится до значительных величин, нарушается равновесие в системе «порода-воздух-метан» благодаря изменению сорбционных свойств массива,

которые и вызывает усиление движения газа к обнаженной поверхности.

В первом приближении будем считать, что скорость метано-воздушной смеси подчиняется закону Дарси:

$$V = \frac{k}{m} \times \frac{\nabla P}{\nabla x}.$$

В основу математической модели авторы [1] предлагают положить уравнение:

$$\frac{\nabla P}{\nabla t} = \frac{k}{m_{\text{э}}} \times \frac{\nabla^2 P^2}{\nabla x^2}. \quad (1)$$

Для решения задачи уравнение сводится к безразмерным переменным.

В отличие от уравнений движения жидкости, данное уравнение не позволяет получить удобные расчетные зависимости, и теоретические исследования необходимо проводить с применением компьютера.

Рассмотрим полную математическую модель процесса пневмодинамического воздействия [1, 2].

Считая, что движение газовой смеси подчиняется закону Дарси, и, используя уравнения неразрывности для компонентов потока [3], запишем уравнения фильтрации газа относительно их концентрации:

$$n_{\text{э}} \frac{\nabla C}{\nabla t} = \operatorname{div} \frac{\dot{\epsilon} k T}{\dot{\epsilon} m_{\text{э}}} C \operatorname{grad}(CR) \dot{u} + q; \quad (2)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\nabla C_M}{\nabla t} = \operatorname{div} \frac{\dot{\epsilon} k T}{\dot{\epsilon} m_{\text{э}}} C_M \operatorname{grad}(CR) \dot{u} + q_M; \quad (3)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\nabla C_0}{\nabla t} = \operatorname{div} \frac{\dot{\epsilon} k T}{\dot{\epsilon} m_{\text{э}}} C_0 \operatorname{grad}(CR) \dot{u} + q_0, \quad (4)$$

где $n_{\text{э}}$ – эффективная пористость, %; C – концентрация газа в фильтрационном объеме, г/см³; T – абсолютная температура смеси газов, К; μ – вязкость смеси, Н·с/м²; R – газовая постоянная, Дж/кг·град; W – скорость притока газа из пористых блоков в фильтрационный объем, г/см²·с;

$$q = -(W_M + W_0); \quad q_M = -W_M; \quad q_0 = -W_0,$$

где «м», «о» – индексы, относящиеся соответственно к метану и кислороду; переменная без индексов относится к метано-воздушной смеси.

Вязкость смеси определяется следующим образом [1]:

$$m = \frac{d_M m_M \sqrt{M_M T_{кр.м}} + d_г m_г \sqrt{M_г T_{кр.г}}}{d_M \sqrt{M_M T_{кр.м}} + d_г \sqrt{M_г T_{кр.г}}}, \quad (5)$$

$T_{кр.м}$, $T_{кр.в}$ – критические температуры метана и воздуха.

Расчетным путем определяем газовую постоянную метано-воздушной смеси [1]:

$$R = \frac{R_{вн}}{d_M M_M + d_г M_г}. \quad (6)$$

Объемные доли метана и воздуха в смеси можно определить следующим образом:

$$d_M = \frac{C_M r_{в.н.у.}}{C_M r_{в.н.у.} + (C - C_M) r_{в.н.у.}}, \quad (7)$$

$$d_г = 1 - d_M, \quad (8)$$

где $\rho_{в.н.у.}$ – плотность воздуха при нормальных условиях.

Десорбция и диффузия метана с достаточной для практики точностью описывается уравнением:

$$\frac{da_M}{dt} = a_M (C_M - C_{м.р.}), \quad (9)$$

где a_M – концентрация сорбированного метана, г/см³; α_M – кинетический коэффициент скорости процесса, 1/с; $C_{м.р.}$ – равновесная концентрация метана, г/см³.

Уравнение (9) объединяет десорбцию и диффузию метана в единый процесс, характеристикой скорости которого является коэффициент a_M , определяемый экспериментально для каждого массива.

Давление, под которым находится в фильтрационном объеме метано-воздушная смесь, оказывает существенное отрицательное влияние на скорость диффузии метана.

Поскольку нас будет интересовать не распределение газа в массиве, а движение потока в целом, можно считать, что коэффициент проницаемости и эффективная пористость не зависят от координат. Учитывая, что сжимаемость газов значительно выше сжимаемости массива, следует ожидать, что при относительно небольших давлениях, развиваемых при пневмовоздействии, не будет существенной деформации массива. Поэтому примем коэффициент проницаемости и эффективную пористость постоянными. Кроме того, во всех уравнениях значение температуры будем считать постоянным. С учетом сделанных предположений уравнения примут вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{kT}{n_3^2 m} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial t} = \frac{kT}{n_3^2 m} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C_M}{\partial x} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = \frac{kT}{n_3^2 m} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C_0}{\partial x} \right) \quad (12)$$

где C – концентрация газа в фильтрационном объеме, г/см³; T – абсолютная температуры смеси газов, K ; M – вязкость смеси, н·с/м²; P – плотность метано-воздушной смеси, г/см³; β_y , β – удельные теплоемкости угля и метано-воздушной смеси, дж/кг·град; « M », « O » - индексы, относящиеся к метану и кислороду; переменная без индексов относится к метано-воздушной смеси.

Начальные условия:

$$\begin{aligned} C(x,0) &= C_M(x,0) = C_{м.исх}; \\ C_0(x,0) &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} C(0,t) &= \frac{P_H L}{RT}; \quad C_0(0,t) = 0,23 \frac{P_H L}{RT}; \\ C_M(0,t) &= 0; \quad C(L,t) = \frac{P_{амм} L}{RT}; \\ 0 \leq x \leq L; \quad t \geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

где $C_{м.исх}$ – концентрация свободного метана в необработанном массиве, %; P_H – давление нагнетания воздуха, МПа; L – нормируемая длина по расстоянию, м.

Система решается методом конечных разностей, решения получаем в виде таблиц, по которым можно построить графики (рис. 1, 2.).

В результате реализации процесса пневмодинамического воздействия осуществляется принудительное внедрение воздуха под высоким давлением, что вызывает структурные изменения, сопровождающиеся расширением пор и трещин. После сброса давления активизируется метановыделение из массива в скважину.

Управляющим параметром процесса является давление на скважине. Ввиду сложности построения инженерных методик, исследования и расчет параметров в общем случае приходится проводить с применением ЭВМ.

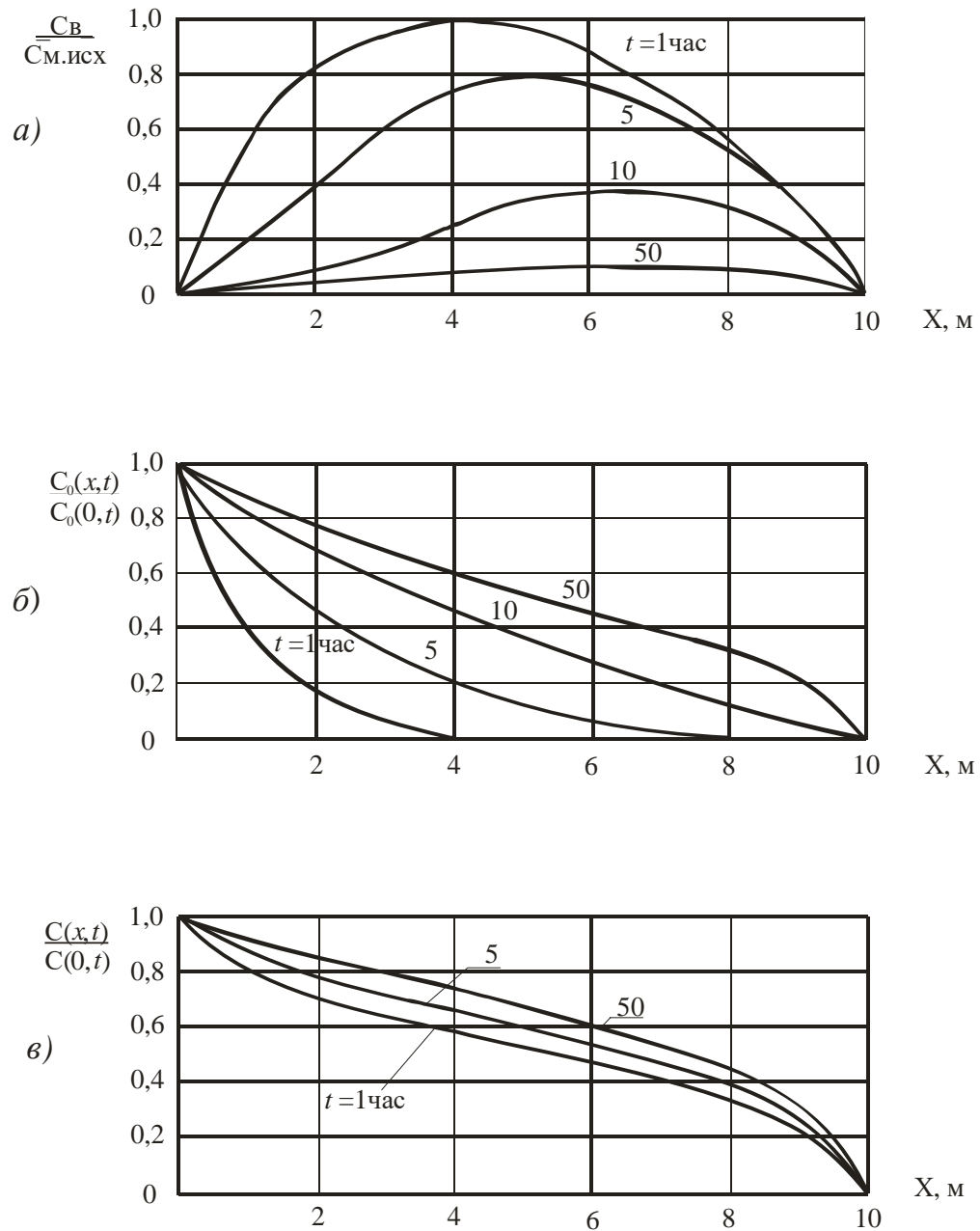
Вместе с тем, для практики удобно иметь инженерные методики, позволяющие выполнить ориентировочные расчеты.

Анализ графиков показывает, что максимальная концентрация газа метана в скважине наблюдается в течение 1 часа (рис.1а), с последующим увеличением времени концентрация газа метана в скважине понижается. На рис.1.б видно, что концентрация кислорода, относительно 0 и пространства увеличи-

вается прямопропорционально времени. На рис.1в показано уменьшение концентрации метановоздушной смеси в пространстве и времени.

Воспользовавшись соображениями, приведенными в работе [1], введем нормирующую величину для давления нагнетания:

$$P_H = \frac{m_0 L^2}{kT}, \quad (15)$$

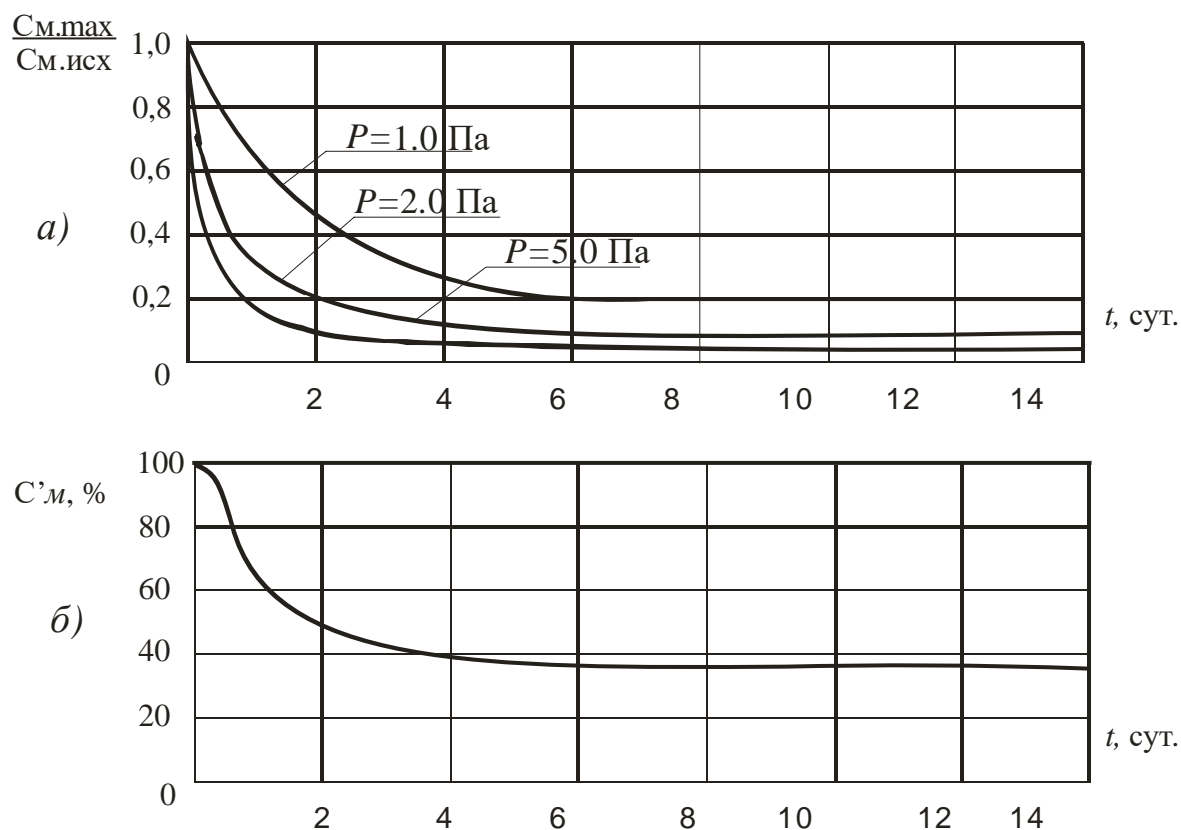


а)–метана, б)– кислорода, в) –метано-воздушной смеси

Рис. 1 – Распределение в пространстве и времени относительных концентраций

где T – норма времени нагнетания.

Задаваясь величиной T и рассчитав давление по выражению (15), проводим экспериментальное нагнетание и контролируем процесс метановыделения. На основании полученных значений строится таблица 1, в которой представляются результаты экспериментально-аналитических исследований. Изменение представлено на рисунке 2.



а) – максимальной по обрабатываемой зоне, б) – объемной в скважине
Рис. 2 – Изменение концентрации свободного метана

Как видно из графиков рис.2, при увеличении нагнетания воздуха в скважину, уменьшается концентрация свободного метана в скважине, а также уменьшение объемной доли метана с увеличением времени.

Таблица 1 - Результаты экспериментально-аналитических исследований процесса пневмодинамического воздействия

№	1	2	3	4	...	n
T	T_1	T_2	T_3	T_4	...	T_n
P	$P_{н1}$	$P_{н2}$	$P_{н3}$	$P_{н4}$...	$P_{нn}$
C_M	C_{M1}	C_{M2}	C_{M3}	C_{M4}	...	C_{Mn}

Экспериментальные нагнетания проводятся до тех пор, пока концентрация метана, достигнув максимума, не начнет снижаться. На рис. 3 приведен график для абстрактного примера.

Из построенного ряда выбирается $\max(C_{Mi})$, ($i = 1, \dots, n$), на основании чего

принимается рекомендация о величине времени воздействия T_j и давлении нагнетания P_{nj} , где j соответствует $\max(C_{Mi}) = C_{Mj}$.

Таким образом, на основании теоретических представлений о процессе пневмодинамического воздействия выведены практические рекомендации для ориентировочного определения параметров воздействия.

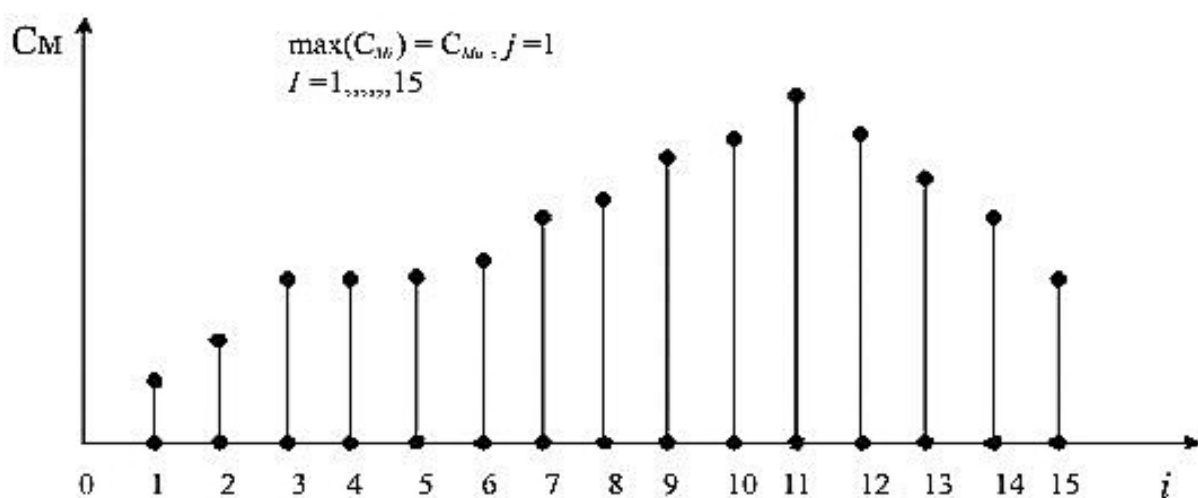


Рис. 3 – Результаты экспериментально-аналитических исследований

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствования технологии процессов воздействия на угольные пласты. / В.Н. Павлыш: - Донецк: РВА ДонНТУ, 2005.-347 с.
2. Софийский К.К. Задача управления процессом пневмодинамического воздействия на газонасыщенный породный массив в условиях шахты им. А.Ф. Засядько. / К.К. Софийский, В.В. Чередников, С.С. Серешников // Сб. научн. тр. «Международной научно – практической конференции (2-3 октября 2007 г.) «Геотехнологии и управление производством XXI века» - Донецк: 2007. – С.58-63.3
3. Павлыш В.Н. Математическое моделирование динамических процессов в системах с распределенными параметрами / В.Н. Павлыш, Ю.Н. Добровольский // Сб. научн. тр. ДонНТУ: «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем. – Донецк: ДонНТУ, 2002.- Вып. 52. – С.48-56.

УДК 622.341.1.002.612:622.013.364.2/.3

Е.В. Бабий, к.т.н.,