

УДК 517.958:622.831.325.3

## ТРЕХМЕРНАЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОСЛОЙНЫЙ УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ЗОНОЙ ФЛЮИДИЗАЦИИ

*Наседкина А. А.<sup>1</sup>, Труфанов В. Н.<sup>2</sup>*

3D-FINITE ELEMENT MODEL FOR HYDRODYNAMIC ACTION ON A MULTILAYER COAL  
SEAM WITH FLUIDIZATION ZONE

Nasedkina A. A., Trufanov V. N.

The paper suggests a mathematical model for the process of hydrodynamic action on a multi-layer coal seam with fluidization zone for methane extraction. Degasification of fluidization zones in coal seams is extremely important because of abnormally increased methane concentration in these zones. The model is formulated as a three-dimensional problem of transient fluid filtration in porous medium with nonlinear fluid pressure dependences for the filtration coefficients for coal and fluidization zone. A filtration-temperature analogy permits to solve the initial boundary-value problem obtained as a problem of thermal conductivity. Finite element approximation of the problem is presented. The computations are carried out using finite element method with the help of thermal analysis module of ANSYS finite element package. The results of the computations enable to determine the size of degassing zone for the coal seam and fluidization zone.

### Введение

Работа посвящена моделированию процесса гидродинамического воздействия для извлечения метана из угольных пластов. С помощью метода конечных элементов проводится расчет зоны дегазации угольного пласта с зоной флюидизации вблизи скважины ГГД-4 Краснодонецкого месторождения Восточного Донбасса.

Проблема дегазации угольных пластов приобрела в последнее время большое значение в связи с разработкой угольных месторождений на больших глубинах, где угольные пласты обладают высокой степенью газоносности и выбросоопасности. Предварительное извлечение метана из газонасыщенных угольных пластов является таким образом неотъемлемым этапом подготовки месторождений к безопасной и эффективной разработке. Кроме того, в настоящее время угольный метан рассматривается как важнейший нетрадиционный вид энергетического сырья.

В связи с этим представляют большой интерес встречающиеся в углепородных массивах

аномальные по газоносности зоны, которые являются специфическими углегазовыми залежами с высокой концентрацией углеводородных газов. Эти зоны возникли в результате процессов углеводородной флюидизации [1], обусловленных фильтрацией сложных по составу паро-водо-газовых растворов по зонам тектонических разрушений при высоких перепадах термодинамических параметров. Явления флюидизации углей и углевлещающих пород привели к существенной трансформации практически всех свойств углей и формированию метанообильных зон в угольных пластах (зон флюидизации).

Особенностью технологии дегазации угольных пластов является то, что метан в угольном веществе находится в связанном сорбированном состоянии, поэтому все методы гидродинамического воздействия направлены на повышение трещиноватости угольных пластов и освобождение метана из открывшихся трещин. В данной работе моделируется метод *гидродинамического расчленения*, который состоит в следующем. Через специально пробуренную скважину в пласт под большим дав-

<sup>1</sup>Наседкина Анна Андреевна, аспирант, младший научный сотрудник НИИ механики и прикладной математики Ростовского государственного университета.

<sup>2</sup>Труфанов Вячеслав Николаевич, д-р геол.-минерал. наук, профессор, зав. кафедрой месторождений полезных ископаемых геолого-географического факультета Ростовского государственного университета.

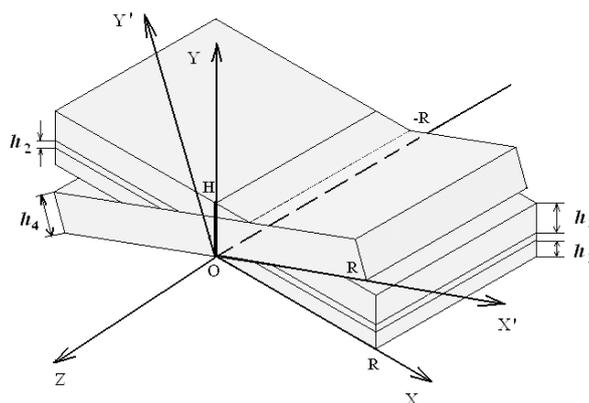


Рис. 1. Схема трехслойного угольного пласта, пересеченного зоной флюидизации

лением нагнетается рабочая жидкость. Фронт жидкости перемещается вглубь пласта в режиме фильтрации, отесняя и сжимая содержащийся в порах газ. Когда давление достигает давления гидроразрыва, в пласте появляются трещины, из которых высвобождается метан. Основной целью моделирования является определение размеров зоны дегазации скважины.

В основе построения модели лежит представление об угольном пласте как о пористой среде, в которой распространяется жидкость (вода) в режиме фильтрации. Пористая среда в данном случае является двухфазной, состоящей из твердой фазы, так называемого скелета, и жидкой фазы фильтрующегося в порах флюида. Давление жидкости и вектор перемещений пористого твердого тела являются независимыми переменными и основными неизвестными в двухфазной пористой среде. В общем случае предполагается связанный анализ для твердой и жидкой фаз, то есть совместное решение уравнений деформации пористого тела и фильтрации жидкости в пористой среде. Однако, процесс гидродинамического расчленения характеризуется в основном изменением распределения порового давления в угольном пласте под действием фильтрующейся жидкости. Поэтому в рассматриваемом случае пористая среда представлена только уравнением фильтрации в предположении, что угольный пласт не деформируется.

Аналитическая модель гидродинамического воздействия на угольный пласт была предложена в [2]. Основным параметром модели было давление нагнетания жидкости в скважину, которое рассматривалось как функция пластовой координаты и времени. Уравнение

фильтрации жидкости выводилось из уравнения неразрывности и линейного закона Дарси с применением коэффициента фильтрации. Процесс гидродинамического расчленения характеризовался нелинейной зависимостью коэффициента фильтрации угля от давления жидкости, согласно которой в момент гидроразрыва происходит резкое увеличение коэффициента фильтрации. Полученная одномерная осесимметричная задача решалась численно методом конечных разностей.

В данной работе в продолжение исследований [3, 4] рассматривается трехмерная нелинейная задача нестационарной фильтрации для трехслойного угольного пласта с зоной флюидизации. Благодаря аналогии между полученной начально-краевой задачей для функции давления и задачей теплопроводности, расчеты проводятся методом конечных элементов с помощью модуля температурного анализа конечно-элементного пакета ANSYS.

Результаты модельных расчетов позволяют получить картины распределения давления в пласте и определить значения функции давления в различные моменты времени и в различных точках расчетной области. По графику изменения давления вдоль координаты расчетной зоны можно определить размеры зоны влияния дегазационной скважины.

## 1. Описание расчетной области

Изучаемый угольный пласт Краснодонского месторождения Восточного Донбасса состоит из трех слоев угля ( $h_1$ ), песчанистого сланца ( $h_2$ ) и глинистого сланца ( $h_3$ ), пересеченных зоной флюидизации ( $h_4$ ), которая

наклонена под углом  $20^\circ$  к угольному пласту (рис. 1).

Зона флюидизации образована породами, проницаемость которых в два раза больше проницаемости угольного слоя. В месте пересечения пробурена скважина ГГД-4, так чтобы гидродинамическое воздействие было направлено не только на уголь, но и на зону флюидизации.

Проницаемости слоев угля и зоны флюидизации изменяются по двум горизонтальным направлениям. Для угольного слоя проницаемость в направлении  $x$  в два раза больше проницаемости в направлении  $z$ , аналогично, для зоны флюидизации проницаемость в направлении  $x'$  в два раза больше проницаемости в направлении  $z$ .

В принятой модели угольный пласт с зоной флюидизации симметричен относительно плоскости  $OXY$ . В связи с этим можно рассматривать только половину области слева или справа от плоскости симметрии. Для рассматриваемого угольного пласта ставится трехмерная задача.

Рассмотрим угольный пласт общей толщины  $H = h_1 + h_2 + h_3$ , пересеченный зоной флюидизации толщины  $h_4$  (рис. 1) в системе координат  $(x, y, z)$ . Начало координат  $O$  расположено в точке пересечения линии нижнего основания угольного слоя с линией нижнего основания зоны флюидизации. Ось  $x$  проходит по линии нижнего основания слоя угля, ось  $y$  — по оси скважины, представленной линией  $OH$  на оси  $y$ . Для зоны флюидизации вводится система координат  $(x', y', z')$  с тем же началом координат. Ось  $x'$  проходит по линии нижнего основания зоны флюидизации и повернута на угол  $\phi = 20^\circ$  относительно оси  $x$ . Расчетная зона простирается на расстояние  $R$  по осям  $x, x'$  и  $z$ .

Уравнение фильтрации жидкости в пористой среде для функции давления  $P = P(x, y, z, t)$  в системе координат  $(x, y, z)$  записывается в форме

$$\rho g(\beta_2 + m\beta_1) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx}(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy}(P) \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz}(P) \frac{\partial P}{\partial z} \right), \quad (1.1)$$

где  $P$  — давление жидкости,  $K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}$  — коэффициенты фильтрации,  $\rho$  — плотность

жидкости,  $m$  — пористость;  $\beta_1, \beta_2$  — коэффициенты сжимаемости жидкости и пористого тела,  $g$  — ускорение свободного падения.

Тензор коэффициентов фильтрации  $\mathbf{K}(P)$  является диагональным:  $K_{xy} = K_{yz} = K_{xz} = 0$ . Согласно экспериментальным данным примем, что для угольного слоя  $h_1$

$$K_{xx}^1 = K_{yy}^1 = 2K_{zz}^1,$$

для слоев сланцев  $h_2$  и  $h_3$

$$K_{xx}^{2,3} = K_{yy}^{2,3} = K_{zz}^{2,3}$$

(верхний индекс — номер слоя). Для зоны флюидизации тензор коэффициентов фильтрации в системе координат  $(x', y', z')$  также имеет диагональный вид

$$K_{x'y'} = K_{y'z'} = K_{x'z'} = 0, \quad K_{x'x'}^4 = K_{y'y'}^4 = 2K_{z'z'}^4,$$

$$x' = x / \sin \phi.$$

## 2. Граничные условия

Пусть рассматриваемая часть угольного пласта занимает объем  $V$ . Введем обозначения:  $\Gamma_{\text{inf}}$  — граница расчетной области в направлении основного распространения жидкости в процессе гидродинамического воздействия;  $\Gamma_b$  — граница скважины (borehole),  $\Gamma_{\text{flux}} = \partial V \setminus (\Gamma_{\text{inf}} \cup \Gamma_b)$  — оставшаяся часть границы, включающая границу кровли и почвы пласта, отделяющую угольный пласт от вышележащих пород. Для моделирования трехмерного случая скважину можно представить как линию, проходящую через центр объема  $V$ , так как радиус скважины очень мал по сравнению с размером расчетной области.

В ненарушенном пласте до начала процесса гидродинамического воздействия присутствует давление сжатого газа, которое будем считать равным исходному пластовому давлению  $P_s$ . Тогда в качестве начального условия примем

$$P(x, y, z, t) = P_s, \quad t = 0. \quad (2.1)$$

Подача жидкости в скважину выражается некоторой известной функцией давления от времени  $P^*(t)$ , которая задается на границе скважины  $\Gamma_b = \{(x, y, z) | x = 0, z = 0\}$ :

$$P(x, y, z, t) = P^*(t), \quad (x, y, z) \in \Gamma_b. \quad (2.2)$$

В данном случае рассматривается простейшая зависимость  $P^*(t)$ , где давление линейно возрастает от исходного пластового давления  $P_s$  до некоторого максимального значения  $P_2$ ,

достигнутого в момент прекращения закачки жидкости в скважину  $t = t_2$ .

На бесконечности процесс дегазации затухает, поэтому на границе расчетной зоны

$$\Gamma_{\text{inf}} = \{(x, y, z) | x = \pm R\} \cup \{(x, y, z) | x' = \pm R\} \cup \{(x, y, z) | z = R\}$$

давление полагается равным исходному пластовому давлению  $P_s$ :

$$P(x, y, z, t) = P_s, \quad (x, y, z) \in \Gamma_{\text{inf}}. \quad (2.3)$$

Предполагается, что на оставшейся границе  $\Gamma_{\text{flux}} = \partial V \setminus (\Gamma_{\text{inf}} \cap \Gamma_b)$  выполняется условие отсутствия потока, в том числе отсутствует утечка рабочей жидкости в почву и кровлю пласта

$$\frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial n} = 0, \quad x \in \Gamma_{\text{flux}}, \quad (2.4)$$

где  $n$  — внешняя нормаль к границе  $\Gamma_{\text{flux}}$ .

Вид начальных и граничных условий можно упростить, если рассматривать функцию избыточного давления  $P'(x, y, z, t) = P(x, y, z, t) - P_s$ . При этом вид уравнения (1.1) не изменится, а условия (2.1) и (2.3) станут однородными. Начально-краевая задача фильтрации для функции избыточного давления  $P'$  примет вид

$$\begin{aligned} & \rho g(\beta_2 + m\beta_1) \frac{\partial P'}{\partial t} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx}(P') \frac{\partial P'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy}(P') \frac{\partial P'}{\partial y} \right) + \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz}(P') \frac{\partial P'}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$P'(x, y, z, t) = 0, \quad t = 0, \quad (2.6)$$

$$P'(x, y, z, t) = P^*(t) - P_s, \quad (x, y, z) \in \Gamma_b, \quad (2.7)$$

$$P'(x, y, z, t) = 0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_{\text{inf}}, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P'(x, y, z, t)}{\partial n} = 0, \quad x \in \Gamma_{\text{flux}}. \quad (2.9)$$

Компоненты тензора коэффициентов фильтрации  $K = K(P(\mathbf{x}, t))$  являются существенной характеристикой пласта. Для тех слоев угольного пласта, которые подвергаются активному гидродинамическому расчленению

( $h_1$  и  $h_4$ ), в данной работе принимается следующая зависимость компонент тензора коэффициента фильтрации от давления [2]

$$K(P) = \begin{cases} K_0, & P_s < P < P_1, \\ \frac{P - P_1}{P_2 - P_1} (K_2 - K_1) + K_1, & P_1 \leq P \leq P_2. \end{cases} \quad (2.10)$$

Согласно (2.10), пока величина давления  $P$  меньше величины давления гидроразрыва  $P_1$ , коэффициент фильтрации постоянен и равен начальному значению  $K_0$ . При  $P = P_1$  происходит скачок коэффициента фильтрации до значения  $K_1$ . Далее коэффициент фильтрации линейно возрастает до некоторого значения  $K_2$ , достигаемого при  $P = P_2$ . Для сопутствующих слоев угольного пласта коэффициент фильтрации полагается постоянной величиной.

### 3. Конечно-элементная аппроксимация трехмерной задачи

Заметим, что уравнение фильтрации (1.1) или (2.5) имеет тот же вид, что и уравнение теплопроводности в системе координат  $(x, y, z)$

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz}(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $T$  — температура,  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{zz}$  — коэффициенты теплопроводности,  $c$  — удельная теплоемкость.

По фильтрационно-температурной аналогии можно сделать замену обозначений  $P' = T$ ,  $g(\beta_2 + m\beta_1) = c$ ,  $K = k$  в уравнении фильтрации и рассматривать данную задачу (2.5), (2.6)–(2.9) для функции избыточного давления  $P'$  как нелинейную нестационарную задачу теплопроводности (3.1) с соответствующими начальными и граничными условиями.

Численное решение этой задачи включает две стадии аппроксимации. Первая стадия, называемая *аппроксимацией по пространству*, состоит в построении слабой формы уравнения (3.1) по пространственным переменным и получении набора обыкновенных дифференциальных уравнений относительно времени. Пусть область  $\Omega_h$ , аппроксимирующая об-

ласть  $\Omega$ , составлена из конечного числа элементов  $\Omega^e$ :  $\Omega \approx \Omega_h = \bigcup_e \Omega^e$ . На каждом элементе  $\Omega^e$  неизвестная функция  $T(x, y, z, t)$  аппроксимируется функцией  $T^e(x, y, z, t)$

$$T(x, y, z, t) \approx T^e(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n T_j^e(t) \phi_j(x, y, z), \quad (3.2)$$

где  $T_j^e(t)$  — значения функции  $T^e(x, y, z, t)$  в узловых точках  $(x_j, y_j, z_j)$  элемента  $\Omega^e$ ,  $\{\phi_j\}_{j=1}^n$  — система аппроксимационных функций,  $n$  — число узлов. Слабая форма уравнения (3.1) примет вид

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} w \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = & \\ = - \int_{\Omega} k_{xx}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} dx dy dz - & \\ - \int_{\Omega} \left( k_{yy}(T) \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} + k_{zz}(T) \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right) dx dy dz + & \\ + \int_{\Gamma} k_{xx}(T) \frac{\partial T}{\partial x} n_x w dx dy dz + & \\ + \int_{\Gamma} \left( k_{yy}(T) \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_{zz}(T) \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) w dx dy dz. & \end{aligned} \quad (3.3)$$

Здесь  $n_x, n_y, n_z$  — компоненты вектора внешней единичной нормали к границе  $\Gamma$ ,  $w$  — произвольная достаточно гладкая функция, удовлетворяющая однородным главным граничным условиям.

Конечно-элементная аппроксимация по пространству выполняется по методу взвешенных остатков Галеркина, в котором в качестве весовой функции  $w(x, y, z)$  выступают аппроксимационные (базисные) финитные функции  $w = \phi_i(x, y, z)$ . В итоге получим матричное дифференциальное уравнение

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{F\}. \quad (3.4)$$

Глобальные матрицы теплоемкости  $[C]$  и теплопроводности  $[K]$  составляются из соответствующих элементных матриц

$$C_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \rho c \phi_i^e \phi_j^e dx dy dz,$$

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \left( k_{xx} \frac{\partial \phi_i^e}{\partial x} \frac{\partial \phi_j^e}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial \phi_i^e}{\partial y} \frac{\partial \phi_j^e}{\partial y} + k_{zz} \frac{\partial \phi_i^e}{\partial z} \frac{\partial \phi_j^e}{\partial z} \right) dx dy dz.$$

Вектор  $\{F\}$  обусловлен заданными граничными условиями.

На следующей стадии осуществляется *аппроксимация по времени*, которая состоит в численном интегрировании обыкновенных дифференциальных уравнений с использованием конечно-разностных схем, например, схемы Кранка-Николсона

$$\begin{aligned} \{T\}_{m+1} = \{T\}_m + (1-\theta)\Delta t \{\dot{T}\}_m + \theta\Delta t \{\dot{T}\}_{m+1}, \\ 0 \leq \theta \leq 1, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где  $\{T\}_m = \{T(t_m)\}$ ;  $t_m = m\Delta t$ ,  $\Delta t$  — шаг по времени;  $\theta$  — параметр метода. В результате на каждом временном шаге получаем набор нелинейных алгебраических уравнений относительно узловых значений неизвестной функции  $\{T\}_{m+1}$

$$\begin{aligned} \left( \frac{1}{\theta\Delta t} [C] + [K] \right) \{T\}_{m+1} = \{F\} + \\ + [C] \left( \frac{1}{\theta\Delta t} \{T\}_m + \frac{1-\theta}{\theta} \{\dot{T}\}_m \right). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Отметим, что на каждом шаге итерационного процесса имеем нелинейное уравнение (3.6), поскольку  $[K] = [K(k(T))]$ .

#### 4. Расчет зоны дегазации трехслойного угольного пласта с зоной флюидизации

Входные данные по структуре угольного пласта и характеристикам реализуемого процесса гидродинамического расчленения в районе скважины ГГД-4 Краснодонского месторождения Восточного Донбасса приведены в таблице. Коэффициенты фильтрации угольного слоя и зоны флюидизации в направлениях  $x$  и  $z$  различны и скачкообразно зависят от давления по указанной ранее зависимости  $K(P)$ :  $K_0$  — начальное значение коэффициента фильтрации,  $K_1$  — значение в момент гидроразрыва,  $K_2$  — конечное значение коэффициента фильтрации. Все значения коэффициентов фильтрации по  $x$  для угольного слоя были взяты из [2], значения коэффициентов фильтрации по  $z$  в два раза меньше значений

Входные данные для трехмерной модели гидродинамического расчленения трехслойного угольного пласта с зоной флюидизации

| Характеристики угольного пласта с зоной флюидизации |                  |   |                                      |
|---|------------------|---|--------------------------------------|
|   | Пористость $m_0$ | Кэф. сжимаемости $\beta_2$ ,<br>$1/\text{Па}\cdot 10^{-11}$ | Мощность слоя<br>угольного пласта, м |
| Уголь, $h_1$  | 0,1              | 1   | 1,35                                 |
| Глинистый сланец, $h_2$                             | 0,018            | 2,75  | 0,6                                  |
| Песчанистый сланец, $h_3$                           | 0,021            | 4,28  | 2,4                                  |
| Зона флюидизации, $h_4$                             | 0,15             | 1   | 3,0                                  |

|                       | Коэффициенты фильтрации $K$ , $\text{м}/\text{с}\cdot 10^{-6}$ |       |       |        |       |       |
|-----------------------|--|-------|-------|--------|-------|-------|
|                       | по $z$   |       |       | по $x$ |       |       |
|                       | $K_0$  | $K_1$ | $K_2$ | $K_0$  | $K_1$ | $K_2$ |
| Уголь                 | 0,52   | 24,95 | 27,98 | 1,044  | 49,9  | 55,96 |
| Глинистый<br>сланец   | 0,6  |       |       | 0,6    |       |       |
| Песчанистый<br>сланец | 0,6  |       |       | 0,6    |       |       |
| Зона флюидизации      | 5  | 39,9  | 44,77 | 10     | 79,8  | 89,54 |

| Характеристики процесса                       |  |                                     |  |   |
|---|--|-------------------------------------|--|---|
| Начальное<br>пластовое<br>давление $P_s$ , Па | Давление<br>гидроразрыва $P_1$ ,<br>Па | Максимальное<br>давление $P_2$ , Па | Время<br>закачивания воды<br>в скважину, с | Длина расчетной<br>зоны по $z$ и по $x$ , м |
| $4.5\cdot 10^6$                               | $8\cdot 10^6$                          | $15\cdot 10^6$                      | 720  | 200   |

коэффициентов фильтрации по  $x$ . Коэффициенты фильтрации сланцев не зависят от давления и не меняются по направлениям, для них были взяты одинаковые средние значения.

Для расчетов использовался конечно-элементный пакет ANSYS (модуль нестационарного температурного анализа Thermal Transient analysis). При построении конечно-элементной модели (рис. 2) применялось регулярное разбиение объемов на восьмиузловые объемные конечные элементы на основе заданного разбиения основных линий, которое сгущается вокруг линии скважины. Материальные свойства зоны флюидизации задаются во вспомогательной системе координат.

Поскольку все входные данные соответствуют реальному процессу гидродинамического расчленения, то из-за больших значений давления расчеты проводятся относительно *нормированного* по отношению к максимальному давлению  $P_2$  *избыточного давления*  $P'_n = P'/P_2$ .

Результаты расчетов позволяют найти неизвестные значения нормированного избыточного давления в угольном пласте в различные моменты времени. По картинам распределения давления в конце процесса можно визу-

ально оценить размер зоны дегазации. Графическое представление решения позволяет проследить, как изменяется давление в пласте от момента начала процесса гидродинамического воздействия до его окончания. По динамике изменения давления в пласте (и форме участков распределения) можно установить момент, когда происходит гидроразрыв угольного пласта.

На рис. 3 представлена картина распределения нормированного избыточного давления в угольном пласте с зоной флюидизации по окончании процесса гидродинамического расчленения ( $t=720$  с). Видно, что зона дегазации в угольном пласте меньше, чем в зоне флюидизации. Это соответствует условию задачи, по которому проницаемость угольного слоя в два раза меньше проницаемости зоны флюидизации.

На рис. 4 картины распределения нормированного избыточного давления представлены отдельно для угольного пласта (а) и зоны флюидизации (б). Из рисунков видно, что зоны дегазации в горизонтальных сечениях приобретают форму эллипсов вследствие того, что коэффициенты фильтрации изменяются по двум направлениям. Выступ на зоне де-

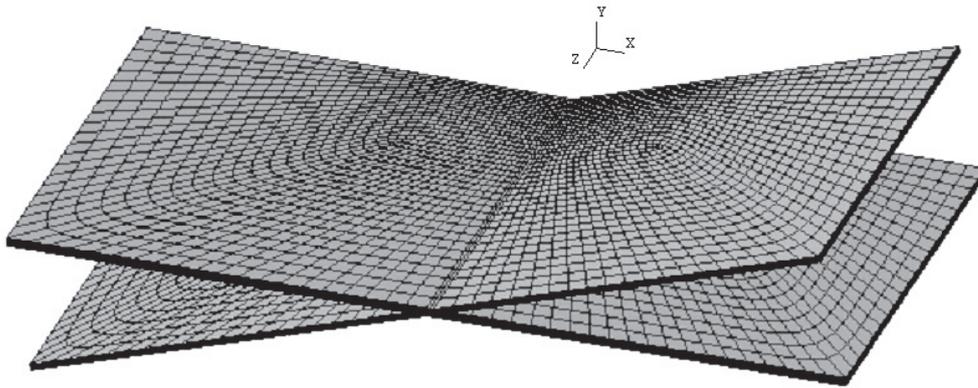


Рис. 2. Трехмерная конечно-элементная модель угольного пласта с зоной флюидизации

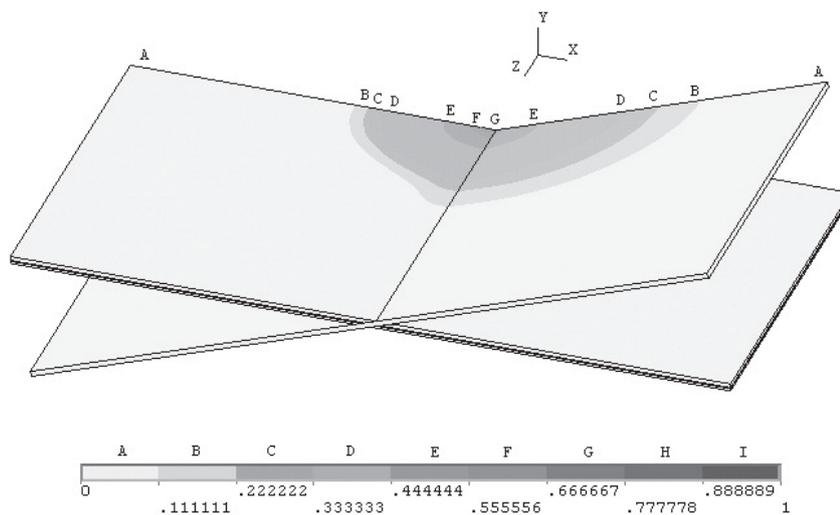


Рис. 3. Распределение нормированного избыточного давления в угольном пласте с зоной флюидизации

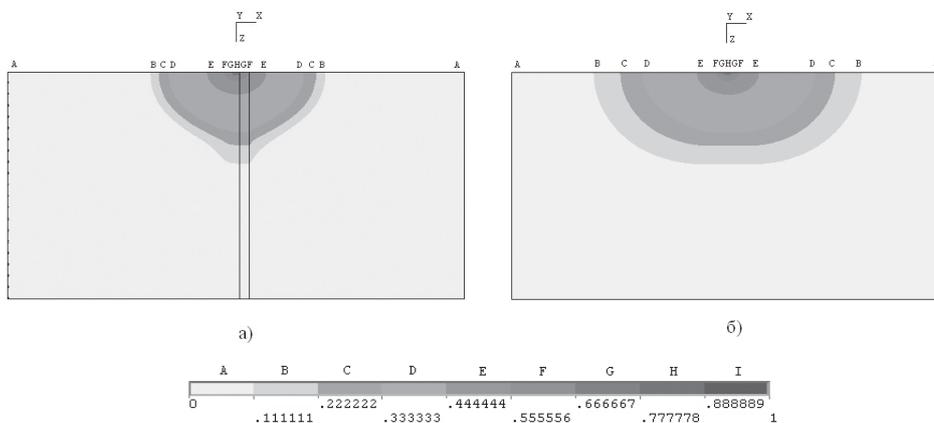


Рис. 4. Распределение нормированного избыточного давления в угольном пласте (а) и в зоне флюидизации (б), вид сверху

газации для угольного пласта (рис. 4а) обусловлен тем, что в этом месте угольный пласт пересекается с зоной флюидизации, проницаемость которой выше проницаемости угольного пласта.

Графики распределения давления (рис. 5), выражающие зависимости давления от пластовых координат по окончании процесса гидродинамического расчленения ( $t=720$  с), позволяют оценить размеры зоны дегазации (зоны влияния скважины). Из графиков видно, что при гидродинамическом воздействии на угольный пласт с зоной флюидизации в зоне влияния скважины обнаруживаются три основных участка: зона максимального разрушения, зона активного гидрорасчленения и зона разупрочнения. Так, зона максимального разрушения как для угольного слоя, так и для зоны флюидизации составляет 10 м (рис. 5а–в). Размер зоны активного гидрорасчленения различен: для угольного пласта по оси  $x$  — 60 м (рис. 5а), для зоны флюидизации по оси  $x$  — 80 м (рис. 5б) и по оси  $z$  — 50 м (рис. 5в). Считается, что граница зоны разупрочнения угольного пласта с выделением метана заканчивается там, где давление стабилизируется. По графику (рис. 5а) размер зоны разупрочнения угольного пласта по оси  $x$  оценивается в 110–120 м. Размер зоны разупрочнения для зоны флюидизации составляет: по оси  $x$  — более 200 м (рис. 5б), а по оси  $z$  — около 150 м (рис. 5в).

### Заключение

Рассмотрена математическая модель процесса гидродинамического воздействия на трехслойный угольный пласт с нелинейной зависимостью коэффициентов фильтрации угля и зоны флюидизации от давления жидкости. Поставлена трехмерная начально-краевая задача нестационарной фильтрации и проведена ее конечно-элементная аппроксимация. С использованием фильтрационно-температурной аналогии нелинейная нестационарная задача фильтрации решена методом конечных элементов с помощью пакета ANSYS как задача теплопроводности. Результаты расчетов позволили определить размеры зоны влияния скважины для угольного пласта и для зоны флюидизации. Сравнение результатов показало, что в зоне флюидизации зона дегазации имеет значительно больший размер, чем в собственно угольном пласте. Кроме того, было обнаружено, что в зоне дегазации выделяют-

ся три основных участка с разными уровнями разрушения.

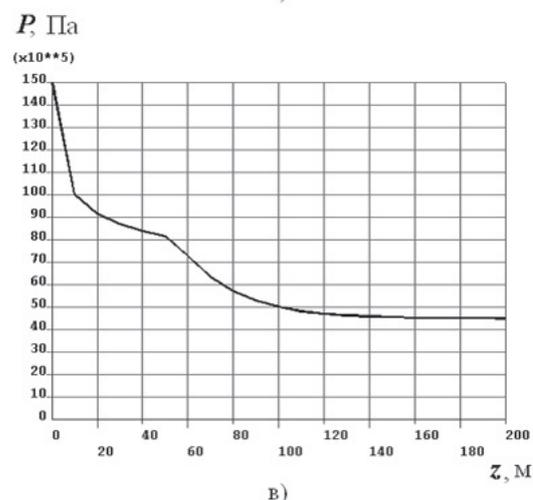
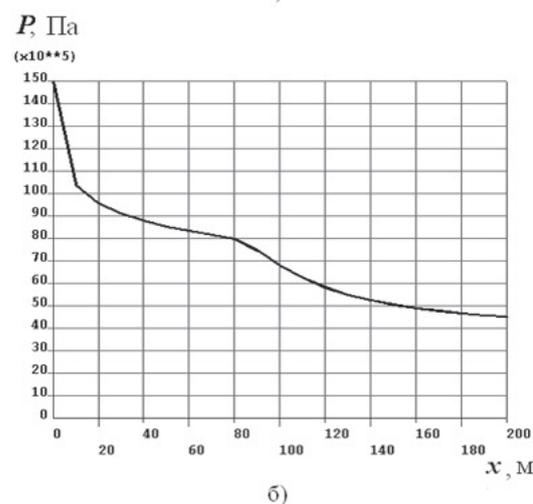
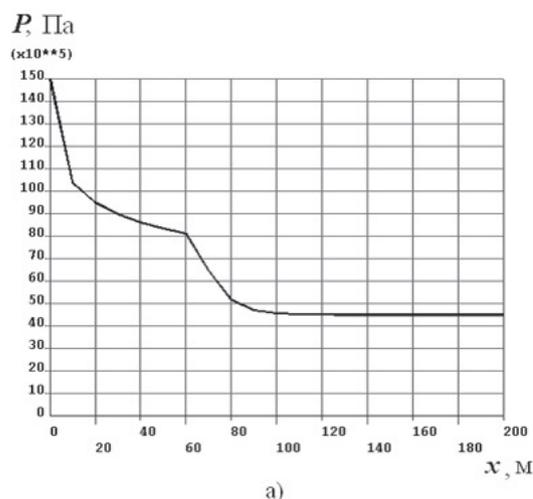


Рис 5. Графики распределения давления по горизонтальным осям: по оси  $x$  в угольном слое (а), по оси  $x$  в зоне флюидизации (б), по оси  $z$  в зоне флюидизации (в)

### Литература

1. Труфанов В. Н., Гамов М. И., Рылов В. Г., Майский Ю. Г., Труфанов А. В. Углеродная флюидизация ископаемых углей Восточного Донбасса. Ростов-н/Д: Изд-во РГУ, 2004. 272 с.
2. Сластунов С. В., Каркашадзе Г. Г., Коликов К. С. Аналитическая модель гидравлического расчленения угольного пласта // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. № 6. С. 31–37.
3. Наседкина А. А. Моделирование гидродинамического воздействия на многослойный угольный пласт с целью десорбции содержащегося в нем метана // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2004. Приложение. Мат. моделирование, вычислительная механика и геофизика: Материалы II Школы-семинара Краснодар, 2003. С. 133–134.
4. Наседкин А. В., Наседкина А. А., Труфанов В. Н. Численное и экспериментальное исследование гидродинамического воздействия на многослойный угольный пласт Краснодонского месторождения // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Матер. XIV Междунар. научной школы. Алушта. 2004. Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2004. С. 103–105.

---

Статья поступила 6 апреля 2006 г.

Ростовский государственный университет, г. Ростов-на-Дону

© Наседкина А. А., Труфанов В. Н., 2006