

Численное решение двумерной задачи о подземной газификации угля

Ю.Н. Захаров
Кемеровский Государственный Университет
П.В. Дементьев
e-mail: PDEMENTEV@yandex.ru

Е.Е. Зеленский
Кемеровский Государственный Университет
М.В. Родина

28.02.2011

Введение

Подземная газификация угля (ПГУ) – физико-химический процесс превращения угля в горючие газы с помощью свободного или связанного кислорода непосредственно в недрах земли. ПГУ – нетрадиционный способ разработки угольных месторождений, открывающий новые возможности в отработке угольных пластов со сложными горно-геологическими условиями залегания, совмещающий добычу, обогащение и переработку угля. ПГУ можно проводить даже в тех местах, где добыча угля является не рентабельной. Это приобретает особенно большое значение в связи с необходимостью постоянного увеличения масштабов использования угля – из-за увеличения труднодоступности нефти и газа, уменьшении роли газа в теплоэнергетике (из-за высокой ценности газа как химического сырья).

1. Описание процесса ПГУ

Первоначально производят бурение двух скважин (наклонных или вертикальных), затем выработки соединяются между собой горизонтальным каналом, называемым огневым штреком. Для создания горизонтального канала используются такие методы как прожиг, гидравлический разрыв, наклонно-горизонтальное бурение, шахтный метод и др. После розжига горение распространяется по угольной поверхности огневого штрека. Процесс газификации осуществляется нагнетанием дутья(воздуха) в одну скважину и отводом образующегося газа из другой. Сжатый воздух из компрессорного цеха по воздухопроводам направляется в газогенератор, где он реагирует при высокой температуре с углем, в результате образуется генераторный газ. Газ поступает на поверхность, где охлаждается, очищается и подается к потребителю(ТЭЦ) за счет давления, развиваемого дутьевыми машинами при нагнетании воздуха в газогенератор.

Горящая поверхность угольного пласта называется огневым забоем. Угольный пласт выгорает постепенно снизу вверх, при этом огневой забой перемещается по восстанию угольного пласта.

По мере выгазовывания пласта выгоревшее пространство заполняется обрушивающимися породами кровли и зольным остатком угля. Сечение огневого штрека остается практически одинаковым, а поверхность забоя – свободной для доступа дутья. Поток, омывая поверхность огневого забоя, газифицирует уголь с образованием горючего газа.

В процессе газификации угля существует две стадии: стадия термического разложения, при которой из угля выделяется влага и летучие парогазовые вещества и остается коксовый остаток; стадия газификации, при которой углерод коксового остатка с помощью свободного или связанного кислорода превращается в горючие газы и эти газы, взаимодействуя с кислородом и водяным паром.

2. Уравнения математической модели

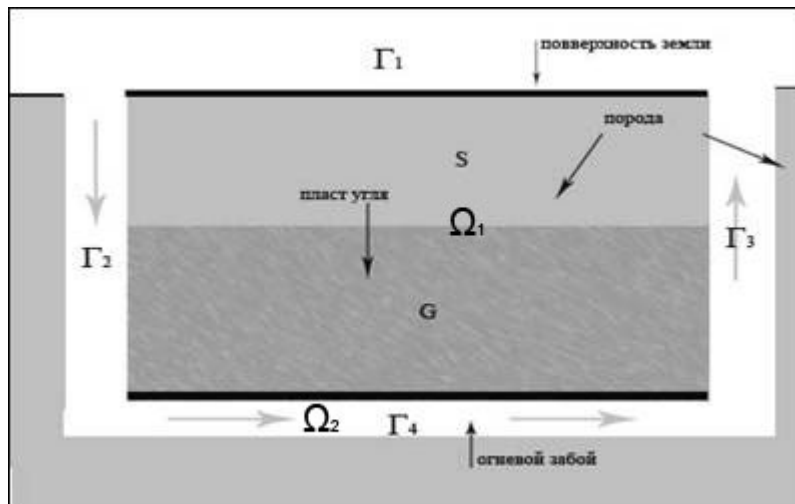


Рис. 1. Схема ПГУ.

Введем обозначение i – фазы пористой среды ($i = 1$ – сухой уголь, $i = 2$ – углевая влага, $i = 3$ – газовая фаза, $i = 4$ – кокс, $i = 5$ – зола), k – индекс газов ($k = 1$ – CH_4 , $k = 2$ – H_2 , $k = 3$ – CO , $k = 4$ – O_2 , $k = 5$ – CO_2 , $k = 6$ – H_2O , $k = 7$ – N_2), t – время, φ_i – массовая доля; ρ, p – плотность и давление газовой фазы; C_{pr} – удельная изобарная теплоемкость, q_k – тепловой эффект гомогенных реакций, U, V – скорость движения в порах, c_k – массовая концентрация.

Для проведения расчетов нужно на каждом временном шаге решить следующие дифференциальные уравнения.

Для расчета температуры используется уравнение теплопроводности с

начально-краевой задачей:

$$\begin{aligned}
& C \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} + \rho_3 C_{\rho_3} \left(U \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + V \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) = \\
& = \frac{\partial}{\partial x} (a_1(x, y, t) \frac{\partial}{\partial x} (T(x, y, t))) + \frac{\partial}{\partial y} (a_2(x, y, t) \frac{\partial}{\partial y} (T(x, y, t))) + \sum_{k=1}^6 q_k p_k + s \sum_{i=1}^4 q_{s_i} Q_i, \\
& T|_{t=0} = T_0(x, y) \\
& \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \alpha(T - T), (x, y) \in \Gamma_1 \\
& \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \alpha_1(T - T_{\text{вн}}), (x, y) \in \Gamma_2, \Gamma_3
\end{aligned} \tag{1}$$

где T – температура, C – эффективная удельная теплоемкость пористой среды, a_1, a_2 – эффективная удельная теплопроводность, α, α_1 – постоянные, задающие теплообмен между атмосферой и грунтом, \bar{n} – внешняя нормаль, $T_{\text{вн}}$ – постоянная температура топлива и грунта вдали от очага возгорания.

На границе Γ_4 действует условие сопряжение для двух соприкасающихся сред (условие равенства температур и закон сохранения энергии):

$$\begin{aligned}
& - \left(\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_4^{\Omega_1} = - \left(\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_4^{\Omega_2} + \left(\varphi_4 \sum_{l=1}^4 q_{s_l} R_l \right) \Big|_4, \\
& T|_4^{\Omega_1} = T|_4^{\Omega_2}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Также необходимо найти абсолютные значения массовых скоростей реакций R_i , P_k , массовые скорости образования компонентов газовой фазы W_k и самой газовой фазы P_r :

$$\begin{aligned}
R_i &= \frac{M_c}{M_4} k_{s_i} \rho c_4 e^{-\frac{E_{s_i}}{RT}}, i = 1, 2; \\
R_3 &= \frac{M_c}{M_5} k_{s_3} \rho c_5 e^{-\frac{E_{s_3}}{RT}}, \\
R_4 &= \frac{M_c}{M_5} k_{s_4} \rho c_6 e^{-\frac{E_{s_4}}{RT}},
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
P_i &= k_i \rho_i \varphi_i e^{-\frac{E_i}{RT}}, i = 1, 2; \\
P_3 &= k_3 \rho c_1 e^{-\frac{E_3}{RT}}, \\
P_4 &= k_4 \rho c_2 e^{-\frac{E_4}{RT}}, \\
P_i &= k_i \rho c_3 e^{-\frac{E_i}{RT}}, i = 5, 6;
\end{aligned} \tag{4}$$

Система уравнений для расчета массовых долей угля, коксы, породы и воды представлена ниже.

Уравнение сохранения массы:

$$\rho_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = -P_i, \varphi_i(0) = \varphi_i^0 \tag{5}$$

где $i = 1$ – сухой уголь, $i = 2$ – влага, $i = 5$ – зола

Уравнение сохранения массы кокса:

$$\rho_4 \frac{\partial(\varphi_4)}{\partial t} = \frac{\nu_2}{\nu_1} \frac{M_c}{M_y} P_1 - s \sum_{j=1}^4 R_j, \varphi_4(0) = \varphi_4^0 \quad (6)$$

Закон сохранения массы:

$$\varphi_3 = 1 - \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_4 + \varphi_5 \quad (7)$$

Уравнение неразрывности газовой фазы для расчета плотности газа в угольном пласте:

$$\frac{\partial \rho_3 \varphi_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 U \varphi_3}{\partial x} + \frac{\partial \rho_3 V \varphi_3}{\partial y} = P_r \quad (8)$$

где P_r – массовая скорость образования газовой фазы.

Уравнения диффузии компонент газовой фазы:

$$\rho_3 \varphi_3 \left(\frac{\partial c_k}{\partial t} + U \frac{\partial c_k}{\partial x} + V \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\rho_3 D_k \frac{\partial c_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_3 D_k \frac{\partial c_k}{\partial y}) + W_k, k = \overline{1, 6} \quad (9)$$

Для расчета давления используется уравнение состояния газа:

$$p = \frac{\rho_3 R T}{M}, \frac{1}{M} = \sum_{k=1}^7 \frac{c_k}{M_k} \quad (10)$$

где R – постоянная Больцмана, M_k – молярные массы газов.

Скорость движения газа в порах подчиняется закону Дарси:

$$U \varphi_3 = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, V \varphi_3 = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

Уравнение движения огневого штрека, заданное функцией $y = f(x)$, определяется по следующему уравнению:

$$\rho_4 \frac{\partial f}{\partial t} - \sqrt{1 + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2} \sum_{j=1}^4 R_j = 0 \quad (12)$$

В области действуют те же уравнения сохранения энергии, неразрывности газовой фазы и диффузии компонент газовой фазы, используется закон Дарси. Также в расчетах в огневом штреке (область Ω_2) используется уравнение Навье-Стокса :

$$\begin{aligned} p \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right), \\ p \left(\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

где μ – вязкость смеси газов.

Для проведения расчетов используются следующие методы численного решения дифференциальных уравнений: параболические уравнения диффузии компонент газовой фазы, уравнение сохранения энергии численно решаются с помощью продольно-поперечной прогонки (с учетом условия сопряжения). Для решения уравнений сохранения массы, уравнений закона Дарси используется метод Эйлера.

Для решения уравнения движения огневого штрека (12) используется явная разностная схема

$$f^{n+1}(x_i) = f^n(x_i) + \tau \frac{\sum_{j=1}^4 R_j}{\rho_4} \sqrt{1 + \left(\frac{f^n(x_{i+1}) - f^n(x_{i-1}))}{2 * h} \right)^2} \quad (14)$$

3. Некоторые результаты расчетов:

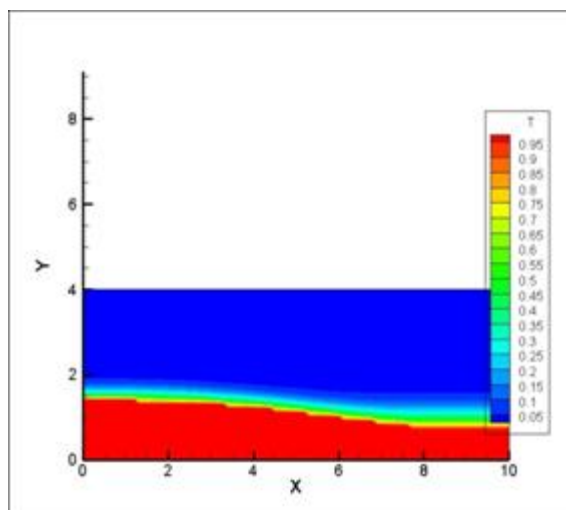


Рис. 2. Изменение температуры с передвижением огневого штрека в области Ω_1 .

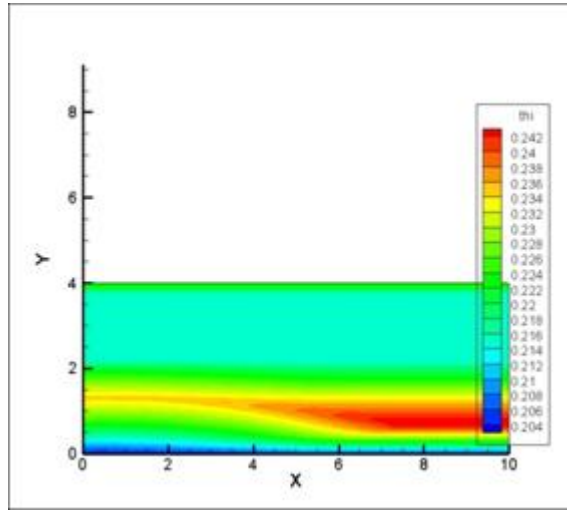


Рис. 3. Образование газа — φ_3 в области Ω_1 .

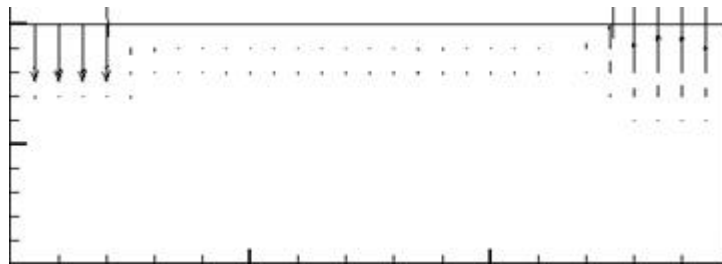


Рис. 4. Скорость движения газа в области Ω_2 при $t = 0.001$.

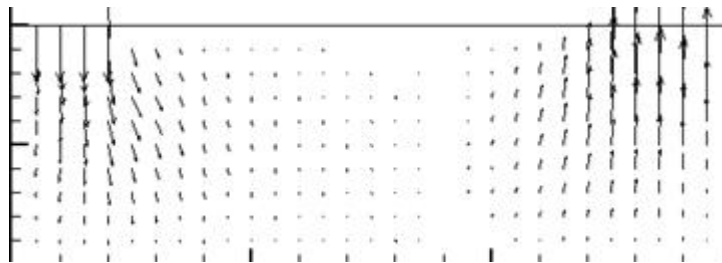


Рис. 5. Скорость движения газа в области Ω_2 при $t = 0.04$.

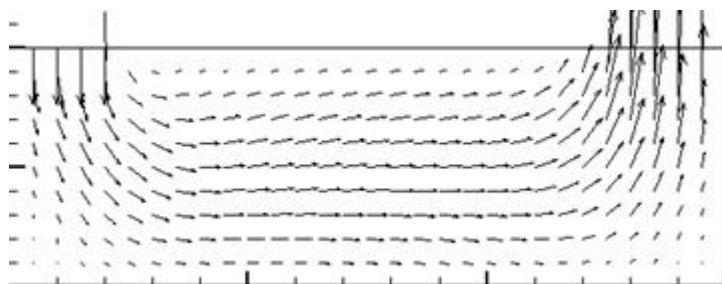


Рис. 6. Скорость движения газа в области Ω_2 при $t = 0.3$.