

УДК 517.958:536.2

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА НА КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЕГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Е. Е. Зеленский, А. А. Воротилов

INFLUENCE OF COAL POROUSNESS AND PERMEABILITY ON THE CRITICAL CONDITIONS OF ITS INFLAMMATION

E. E. Zelenskiy, A. A. Voroshilov

С помощью пакета прикладных программ Femlab численно исследована двумерная задача о воспламенении и горении макропористого углеродного топлива

The bidimensional problem of ignition and burning macroporous carbon fuel has been investigated numerically with the help of Femlab a package of applied programs.

Ключевые слова: подземная газификация угля, недеформируемая реагирующая пористая среда, горение, макропористое топливо.

Key words: underground coal gasification, undistorted reacting porous environment, burning, macro-porous fuel.

Одной из актуальных задач развития угледобывающей отрасли является глубокая переработка угля, и, в частности, его подземная газификация [1, 2]. Поскольку физическое моделирование этого процесса и натурный эксперимент требуют больших материальных затрат, то все большее значение приобретает метод математического моделирования [3].

В [4] на основе уравнений механики недеформируемой пористой реагирующей среды [5] численно решена одномерная сопряженная задача о зажигании угля высокотемпературным газовым очагом.

В данной работе исследовано влияние краевых эффектов (конечной толщины угольного пласта) на характеристики процесса. Найдено что воспламенение имеет место лишь при $H \geq H_*$, где H_* – критическая толщина пласта, и установлено влияние пористости и интенсивности газовыделения при реакции разложения угля на величину H_* . Полученные выводы могут быть использованы на практике при расчёте зажигания угля в начальном огневом штреке подземного газогенератора [1], когда процесс лимитируется реакцией разложения топлива.

Угольный пласт длиной L и толщиной H с начальной пористостью m_0 , проницаемостью k_0 , давлением газа в порах P_0 и температурой T_0 , окруженный слабопроницаемым грунтом (например глиной), нагревается с левого торца тепловым потоком, падающим по закону Ньютона

$$q_T = \alpha_1 (T_* - T|_{x=0}),$$

где $T_* = T_*(t)$, $T = T(t, x, y)$ – температуры нагревателя и топлива соответственно $\alpha_1 = \alpha_1(t)$ – коэффициент теплоотдачи между нагревателем и топливом. Ось Ox декартовой системы координат совпадает с нижней границей топлива и направлена вправо, ось Oy – по вертикали вверх, начало взято на левом торце. На остальных границах задаются условия III рода с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_2 = \alpha_2(t)$.

При нагреве в топливе происходит гомогенная экзотермическая реакция разложения, протекающая по схеме $\nu_1 A_1 = \nu_2 A_2 + \nu_3 A_3$, где A_1, A_2, A_3 – символы исходного топлива, конденсированного продукта реакции (кокса) и газообразных продуктов соответственно; ν_i – стехиометрические коэффициенты.

Массовая скорость реакции определяется законом Аррениуса [5]: $R_1 = \rho_1 k_1 \phi_1 e^{(-E/RT)}$, где ρ_1, ϕ_1 – плотность и объёмная доля топлива; k_1 – предэкспонент; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура пористой среды.

Газовую фазу будем считать смесью идеальных газов с близкими значениями молярных масс $M_i = M$.

Вследствие малости среднестатистического радиуса пор, принята однотемпературная модель пористой среды [5].

При определенных условиях происходит воспламенение угля, и фронт горения вместе с фронтом фильтрации движется по топливу слева направо. Необходимо найти H_* и её зависимость от основных критериев подобия задачи.

Математическая постановка задачи сводится к совместному решению безразмерных уравнений сохранения энергии пористой среды, неразрывности исходного вещества, конденсированного продукта реакции и газовой фазы в порах, уравнений движения и уравнения состояния.

$$C_{\text{эф}} \partial \theta / \partial \tau + \pi_1 \rho (u \partial \theta / \partial x + v \partial \theta / \partial y) = \partial / \partial x (\lambda_{\text{эф}} \partial \theta / \partial x) + \partial / \partial y (\lambda_{\text{эф}} \partial \theta / \partial y) + R_1$$

$$C_{\text{эф}} = \phi_1 + \pi_2 \pi_3 \phi_2 + \pi_3 \phi_3 \rho,$$

$$\lambda_{\text{эф}} = \phi_1 + \pi_4 \phi_2 + \pi_5 \phi_3, R_1 = \delta \phi_1 e^{\theta/(1+\beta\theta)} \quad (1)$$

$$\partial \phi_1 / \partial \tau = -\gamma_1 R_1, \quad (2)$$

$$\partial \phi_2 / \partial \tau = \gamma_2 R_1, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \partial / \partial \tau (\rho \phi_3) + \partial / \partial x (\rho \phi_3 u) + \\ + \partial / \partial y (\rho \phi_3 v) = \gamma_3 R_1, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho \phi_3 (\partial u / \partial \tau + u \partial u / \partial x + v \partial u / \partial y) = \\ = -\phi_3 (E_U \partial P / \partial x + u) - \gamma_3 R_1 u, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho \phi_3 (\partial v / \partial \tau + u \partial v / \partial x + v \partial v / \partial y) = \\ = -\phi_3 (E_U \partial P / \partial y + v) - \gamma_3 R_1 v, \end{aligned} \quad (6)$$

$$P = \rho (1 + \beta \theta), \quad (7)$$

где $\theta = E / RT_*^2 (T_* - T)$ – безразмерная температура;

ρ, P, v, u – безразмерные плотность, давление и компоненты вектора скорости газа в порах;

ϕ_2, ϕ_3 – объёмные доли кокса и газовой фазы пористой среды;

τ, x, y – безразмерные время и координаты; критерии подобия:

$$\pi_1 = C_{p3} / C_{p1}; \quad \pi_2 = C_{p2} / C_{p1};$$

$$\pi_3 = \rho_2 / \rho_1; \quad \pi_4 = \lambda_2 / \lambda_1; \quad \pi_5 = \lambda_3 / \lambda_1;$$

$$\beta = RT_* / E; \quad \gamma_1 = C_{p1} RT_*^2 / (qE);$$

$$\gamma_2 = \pi_3^{-1} v_2 M_2 \gamma_1 / (v_1 M_1); \quad \gamma_3 = v_3 M_3 \gamma_1 / (v_1 M_1);$$

$$E_u = P_* / (\rho_* v_*^2) - \text{число Эйлера};$$

$$\delta = t_{\text{мех}} / t_{\text{хим}}; \quad q - \text{тепловой эффект реакции};$$

$$t_{\text{мех}} = \rho_1 k / \mu - \text{характерное «механическое» время};$$

$$t_{\text{хим}} = \gamma_1 / k_0 e^{1/\beta} - \text{характерное «химическое» время};$$

M – молярная масса,

λ – коэффициент теплопроводности,

C_p – удельная изобарная теплоёмкость,

индексы 1, 2, 3 относятся к топливу, коксу и газовой фазе.

В качестве масштабов времени τ_* , длины $x_* = y_*$, скорости $u_* = v_*$, плотности ρ_* и давления P_* взяты:

$$t_* = t_{\text{мех}}; \quad x_* = \sqrt{\lambda_1 / (\rho_1 C_{p1})} t_*;$$

$$v_* = x_* / t_*; \quad \rho_* = \rho_1; \quad P_* = \rho_1 RT_* / M.$$

При записи (1) – (7) для упрощения постановки считалось, что молярные массы воздуха и газообразных продуктов отличаются незначительно. Это позволило опустить уравнения диффузии и упростить уравнение состояния (7). Кроме того, пренебрегалось влажностью и зольностью угля.

К (1) – (7) добавим граничные условия:

$$x = 0: -\lambda_{\phi} \partial \theta / \partial x = Bi_1 (\theta_* - \theta), \quad u = v = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} x = L: -\lambda_{\phi} \partial \theta / \partial x = Bi_2 (\theta + \theta_H), \quad u = v = 0, \\ \rho = \rho_0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} y = 0: -\lambda_{\phi} \partial \theta / \partial y = Bi_2 (\theta + \theta_H), \quad u = v = 0, \\ \rho = \rho_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} y = H: -\lambda_{\phi} \partial \theta / \partial y = Bi_2 (\theta + \theta_H), \\ u = v = 0, \quad \rho = \rho_0 \end{aligned} \quad (11)$$

где $Bi_1 = \alpha_1 x_* / \lambda_1$,

$Bi_2 = \alpha_2 x_* / \lambda_1$ – числа Био;

$$\theta_* = (T_* - T_0) E / RT_*^2.$$

Начальные условия запишутся следующим образом:

$$\tau = 0: \theta = -\theta_H, \quad \phi_1 = \phi_0, \quad \phi_2 = \phi_{20}, \quad \rho_3 = \rho_{30}. \quad (12)$$

Для решения (1) – (12) применялся метод конечных элементов, реализованный в пакете прикладных программ Femlab [6]. Тестирование программы осуществлялось путем сравнения решения задачи (1) – (12) при $v = u = \gamma_3 = 0$ и $\pi_1 = \pi_2 = \pi_3 = \pi_4 = \rho = 1$ с результатами расчетов по твердофазной модели [5].

Расчеты проводились для предельного случая $Bi_1 \rightarrow \infty, Bi_2 \rightarrow \infty$ (граничные условия I рода). В качестве постоянной температуры T_* была взята адиабатическая температура горения, т. е. $\theta_* = 0$. Для согласования граничных условий, температура на левом торце задавалась в виде параболы $\theta_*(\tau, x, y) = \theta_H [-1 + 4y / H (1 - y / H)]$ с максимумом $\theta_*(\tau, x, H / 2) = 0$ на оси симметрии $y = H / 2$.

При проведении расчетов полагалось $\pi_1 = 0.975, \pi_2 = 0.88, \pi_3 = 1.5, \pi_4 = 1.64, \pi_5 = 0.178, \beta = 0.1, \theta_H = 6, \delta = 2$, что соответствует осредненным по различным маркам угля значениям теплофизических параметров. Начальная пористость m_0 , проницаемость Eu и термокинетические параметры γ_i изменялись в интервалах $m_0 = 0.1 - 0.6, Eu = 1 - 100, \gamma_1 = 0.1 - 0.2, \gamma_3 = 0.0001 - 0.001, \gamma_2 = \gamma_1 - \gamma_3$.

В результате численного решения задачи было получено, что пространственно-временные распределения $\theta, \phi_i, \rho, u, P$ на оси симметрии $y = H / 2$ в качественном отношении схожи с соответствующими одномерными графиками [4], что отражено на рисунке 1. Сравнение температурных кривых (рис. 1а) и соответствующего одномерного решения [4] показывает, что в первом случае за счёт оттока тепла в поперечном направлении температура за фронтом реакции существенно ниже адиабатической температуры горения.

На рисунке 2 приведены профили θ, P, u, v в сечении $x = 40$ в зависимости от переменных τ и

у. Из рисунка следует, что максимумы температуры и давления возникают на оси симметрии $y = 30$, поэтому газ движется из центра области в обоих на-

правлениях оси y , имея нулевое значение скорости U при $y = 30$.

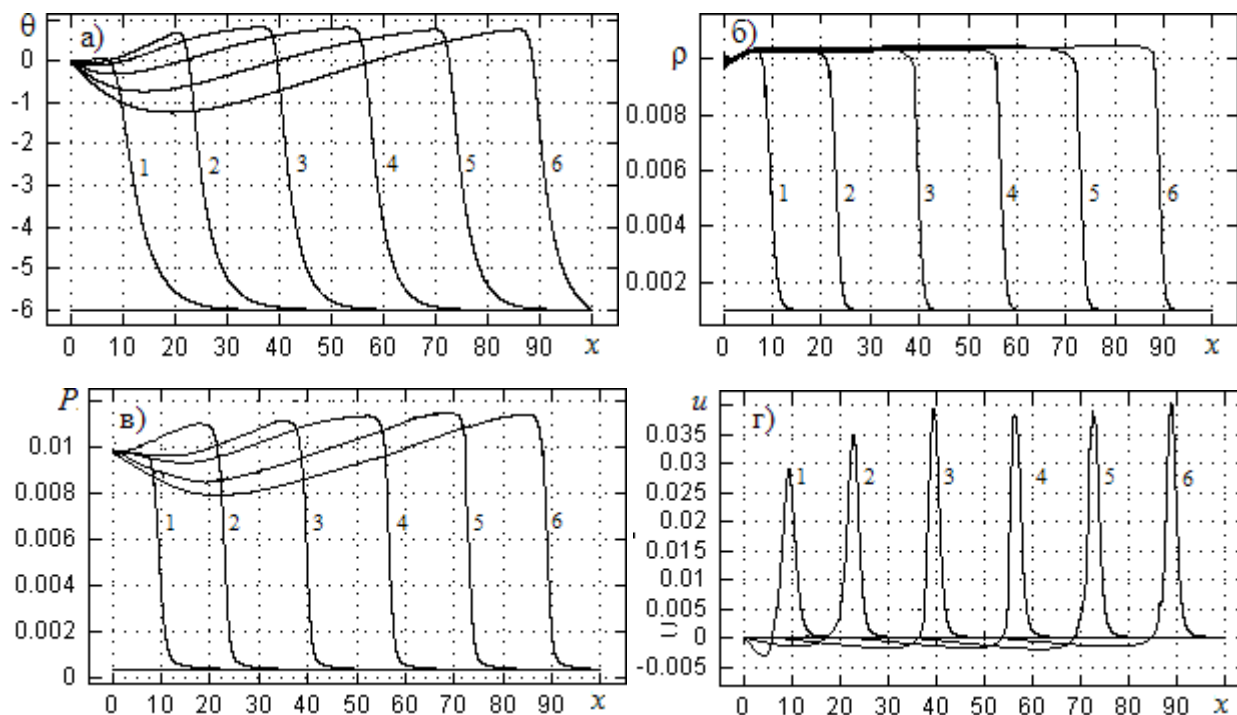


Рис. 1. Распределения температуры (а), плотности (б), давления (в), и x компоненты скорости газа (г) в сечении $y = 30$ в моменты времени 1 - $\tau = 50$, 2 - $\tau = 100$, 3 - $\tau = 150$, 4 - $\tau = 200$, 5 - $\tau = 250$, 6 - $\tau = 300$. $H = 60$, $L = 100$, $Eu = 10$, $m_0 = 0.3$, $\gamma_1 = 0.13$, $\gamma_2 = 0.129$, $\gamma_3 = 0.001$

Решение показало, что при одинаковых с однородным случаем условиях нагрева зажигание топлива происходит далеко не всегда: существует критическая толщина пласта H_* , такая, что при $H > H_*$ имеет место зажигание реагента, а при $H < H_*$ реагирующая система не воспламеняется, что согласуется с выводами счёта по твердофазной модели [5]. В результате расчетов было установлено, что при реальных значениях параметра интенсивности газовыделения $\gamma_3 < 0.001$ (в этом случае давление в порах топлива не превышает 30 бар, максимальная скорость движения газа 2.5 м/с) величина H_* и время зажигания слабо зависят от проницаемости, т. е. в диапазонах $Eu = 1-100$,

$m_0 = 0.1-0.6$ основное влияние на теплообмен оказывает процесс теплопроводности по скелету топлива и газу в порах. В то же время выявлено существенное влияние пористости m_0 на значение H_* , что показано на рисунке 3.

Последний результат является следствием роста эффективного коэффициента температуропроводности $a_{эф} = \lambda_{эф} / C_{эф}$ при увеличении начальной пористости топлива m_0 . При этом возрастает интенсивность отвода тепла из центральной прогретой области топлива во внешнюю холодную среду в направлении оси y , что ухудшает условия воспламенения топлива и увеличивает H_* .

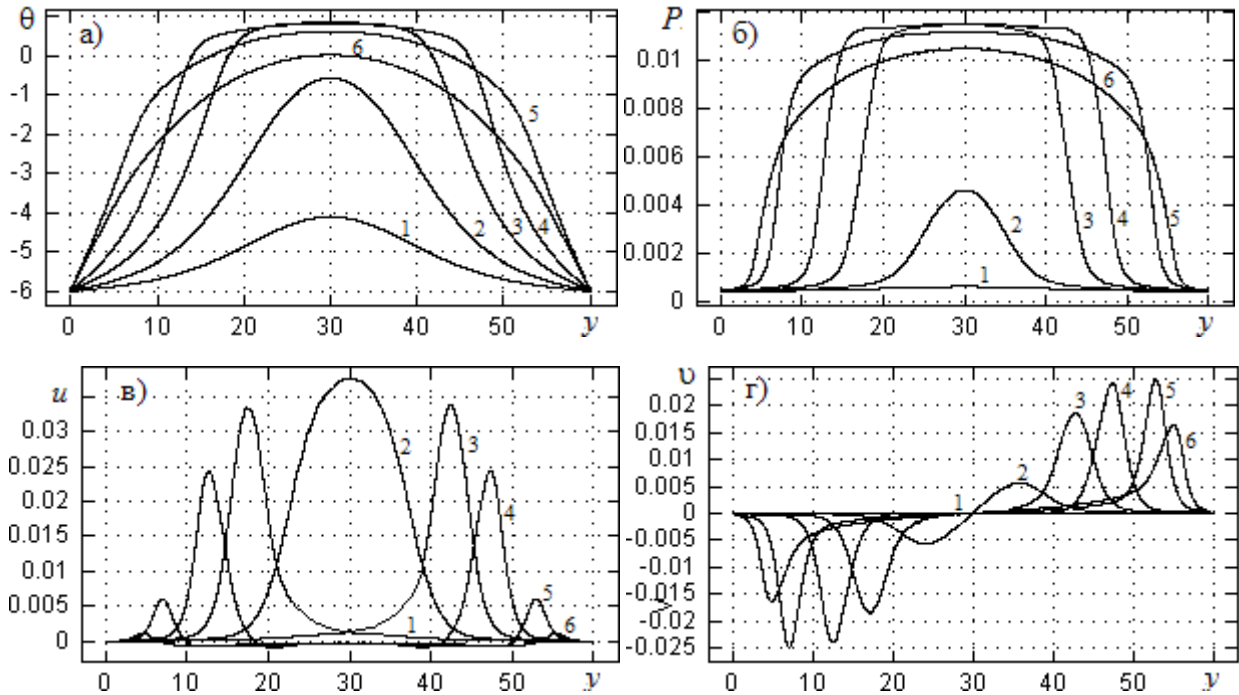


Рис. 2. Распределения температуры (а), давления (б), и компонент скорости газа (в, г) в поперечном сечении в моменты времени 1 - $\tau = 140$, 2 - $\tau = 150$, 3 - $\tau = 160$, 4 - $\tau = 170$, 5 - $\tau = 200$, 6 - $\tau = 300$.
 $x = 40$, $H = 60$, $L = 100$, $Eu = 10$, $m_0 = 0.3$, $\gamma_1 = 0.13$, $\gamma_2 = 0.129$, $\gamma_3 = 0.001$

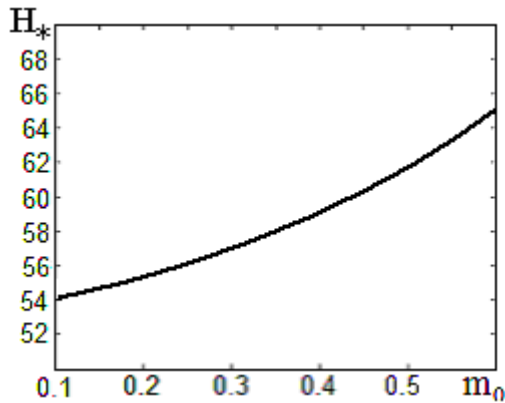


Рис. 3. Зависимость критической толщины пласта топлива от начальной пористости m_0

Литература

1. Крейнин, Е. В. Подземная газификация углей [Текст] / Е. В. Крейнин, М. К. Рева. – Кемерово: Кемеровское книжное издательство, 1966. – 85 с.
2. Крейнин, Е. В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырьё [Текст] / Е. В. Крейнин. – М.: ИРЦ Газпром, 2004. – 302 с.

3. Zakharov, Y. N. About One Model of Underground Coal Gasification [Текст] / Y. N. Zakharov, E. E. Zelensky, V. P. Potapov, E. L. Schastlivsev, M. A. Tolstykh // Mathematical and Informational Technologies (MIT-2009), Kopaonik, Serbia, Budva, Montenegro, Abstracts, p. 115-116.

4. Зеленский, Е. Е. Тепломассообмен при воспламенении и горении макропористого углеродного топлива [Текст] / Е. Е. Зеленский, А. А. Воротилов // Сборник трудов XXII Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях-ММТТ-22». – Псков: Издательство Псковского политехнического института, 2009. – Т. 3. – С. 97 – 100.

5. Алексеев, Б. В. Физическая газодинамика реагирующих сред [Текст] / Б. В. Алексеев, А. М. Гришин. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.

6. Femlab 2.3. Руководство пользователя (перевод с английского с редакционной правкой В. Е. Шмелёва). – Электронный ресурс. – Режим доступа: URL: <http://matlab.exponenta.ru>.

Рецензент – Н. А. Кучер, ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет».