

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОДЗЕМНОГО ГАЗИФИКАТОРА ПО МЕТОДУ ПОТОКА

Ю. Н. Захаров, Е. Е. Зеленский, М. С. Родина

MATHEMATICAL MODELLING OF AN UNDERGROUND GASIFIER WORK WITH THE FLOW METHOD

Y. N. Zakharov, E. E. Zelenskiy, M. S. Rodina

Подземная газификация угля (ПГУ) – физико-химический процесс превращения угля в горючие газы с помощью свободного или связанного кислорода непосредственно в недрах земли. В настоящей работе представлена математическая модель работы подземного газификатора. Приводятся численные результаты расчётов изменения состава газа внутри газификатора.

Underground gasification of coal is a physical and chemical process of transformation of coal into combustible gases by means of the free or connected oxygen directly in earth interiors. In the present paper the mathematical model of an underground gasifier work is provided. Numerical results of calculations of gas composition changes in an underground gasifier are given.

Ключевые слова: Газификация угля, течение сжимаемой жидкости, гидродинамика, уголь.

Keywords: coal gasification, current of a compressible liquid, hydrodynamics, coal.

Технологический процесс подземной газификации угля (ПГУ) выглядит следующим образом: в угольный пласт с поверхности бурятся две наклонно-вертикальные скважины, которые потом соединяются горизонтальным каналом (т. н. «огневой штрёк»). Затем производится розжиг огневого штрёка, после чего горение распространяется по всей угольной поверхности штрёка, который называется огневым забоем. Одновременно с этим производится подача воздушного или парокислородного дутья в одну скважину (дутьевая скважина) и отвод образующегося при горении угля газа из другой (газосборочная скважина). Угольный пласт постепенно выгорает снизу вверх, и огневой забой перемещается по направлению выгорания – вверх, а выгоревшее пространство заполняется обрушивающимися обломками кровли и зольными остатками угля. При этом за счёт выгорания угля объём огневого штрёка практически не изменяется. Выделяющийся в ходе реакций разложения и последующего окисления углерода кокса на огневом забое газы делятся на две части. Одна часть за счёт градиента давления фильтруется в область массива угля, а другая поступает в огневой штрёк, где за счёт конвекции и диффузии нагревает газовую смесь, инициируя в ней гомогенные реакции окисления (более подробно см. [1]).

В данной работе будет рассмотрен метод решения модели, описывающий течение и изменение состава неоднородного газа внутри огневого штрёка на начальной стадии работы подземного газификатора.

1. В работах [2, 3] приведена двухмерная модель ПГУ, которая описывает процессы, происходящие при ПГУ как в массиве угля, так и огневом штрёке.

В этом пункте мы приведём уравнения, описывающие процессы ПГУ только в огневом штрёке. На рис. 1 приведена двухмерная схема ПГУ. Далее мы будем считать, что граница Γ_1 («огневой забой») является неподвижной. Таким образом, изменение формы огневого штрёка Ω_2 не происходит. Помимо этого на границе Γ_1 задаётся состав газа, образующегося при горении угля.

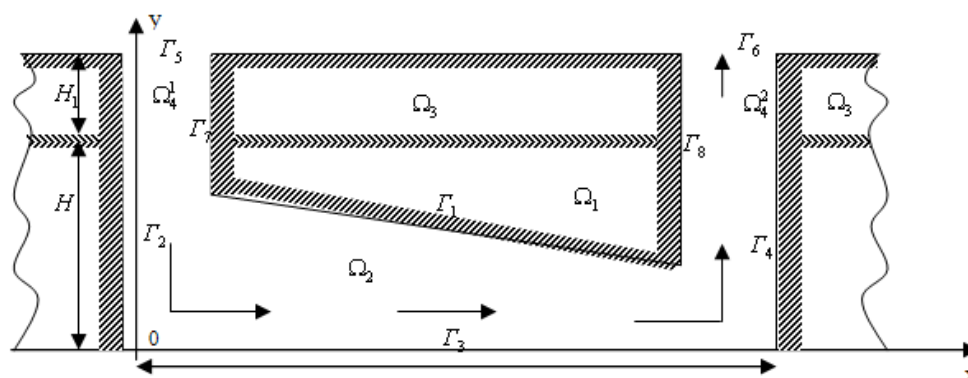


Рис. 1. Схема ПГ по методу потока

Здесь Ω_1 – угольный пласт, Ω_2 – огневой штрек, Ω_3 – порода над угольным пластом, Ω_4^1 и Ω_4^2 – дутьевая и газосборочная скважины. H – толщина (высота) угольного пласта, H_1 – глубина залегания угля, Γ_1 – огневой забой, Γ_2 и Γ_7 – стенки дутьевой скважины, Γ_4 и Γ_8 – стенки газосборочной скважины, Γ_3 – нижняя граница штрека, Γ_5 и Γ_6 – входное и выходное сечения скважин.

Вначале приведём основные обозначения, используемые при дальнейшем изложении:

$\rho(x, y, t)$ и $P(x, y, t)$ – плотность и давление газовой смеси, $T(x, y, t)$ – температура, $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – проекции вектора скорости на оси X и Y соответственно, R – универсальная газовая постоянная, $\sum_{i=3}^6 q_i \cdot p_i$ – тепловые эффекты химических реакций, D_k – эффективный коэффициент диффузии k -го газа, C_k – доля k -го газа в газовой фазе, где $k = 1 - CH_4$, $k = 2 - H_2$, $k = 3 - CO$, $k = 4 - O_2$, $k = 5 - CO_2$, $k = 6 - H_2O$, $k = 7 - N_2$, μ , λ и Cp – вязкость, теплопроводность и удельная теплоёмкость смеси газов:

$$\left(\mu = \sum_{k=1}^7 \mu_k C_k, \lambda = \sum_{k=1}^7 \lambda_k C_k, Cp = \sum_{k=1}^7 Cp_k C_k \right).$$

Процесс ПГУ в огневом штреке (область Ω_2) при неподвижном огневом забое (Γ_1) описывается следующими уравнениями, для которых поставлены соответствующие начально-краевые задачи:

1) уравнение неразрывности газовой смеси:

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho(x, y, t) U(x, y, t)) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho(x, y, t) V(x, y, t)) = 0; \quad (1)$$

$$\rho|_{\Gamma_1} = \rho_1(x, y, t), \rho|_{\Gamma_5} = \rho_5(x, y, t), \frac{\partial \rho|_{\Gamma_6}}{\partial y} = \beta |\rho_5 - \rho_{амм}|, \frac{\partial \rho|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_7, \Gamma_8}}{\partial n} = 0;$$

2) уравнение сохранения энергии:

$$\rho(x, y, t) \cdot Cp \cdot \left(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) + \sum_{i=3}^6 q_i \cdot p_i;$$

$$T|_{\Gamma_1} = T_1(x, y, t), T|_{\Gamma_5} = T_5(x, y, t),$$

$$\frac{\partial T|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8}}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

3) уравнения движения Навье-Стокса:

$$\rho(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\rho(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right);$$

$$\begin{aligned}
V|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_7, \Gamma_8} &= U|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8} = 0, \\
V|_{\Gamma_1} &= V_1(x, y, t), \\
V|_{\Gamma_5} &= V_5(x, y, t), \\
V|_{\Gamma_6} &= V_6(x, y, t);
\end{aligned}$$

4) уравнение диффузии компонент

$$\rho(x, y, t) \left(\frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho(x, y, t) \cdot D_k \cdot \frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho(x, y, t) \cdot D_k \cdot \frac{\partial C_k(x, y, t)}{\partial y} \right) + W_k, \right. \quad (4)$$

$$k = 1, \dots, 6, \quad \sum_{k=1}^7 C_k = 1;$$

$$\begin{aligned}
C_k|_{\Gamma_1} &= C_{k1}(x, y, t), \quad C_k|_{\Gamma_5} = C_{k5}(x, y, t), \\
\frac{\partial C_k|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_7, \Gamma_8}}{\partial n} &= 0; \\
P(x, y, t) &= \frac{\rho(x, y, t) \cdot R \cdot T(x, y, t)}{\mu}.
\end{aligned}$$

Здесь $\rho(x, y, t)$, $T(x, y, t)$ – рассчитанные ранее функции.

2. Далее будем считать, что процесс газификации находится в начальной стадии и огневой забой Γ_1 параллелен оси OX . В области Ω_2 введём прямоугольную равномерную сетку с шагами h_x , h_y по осям OX , OY и по времени с шагом τ . Для проведения численных расчётов задач (1) – (4) мы использовали следующие разностные схемы. Для уравнения неразрывности газовой смеси (1) использовалась схема Лакса-Вендроффа [4], для уравнения сохранения энергии (2) – схема стабилизирующей поправки [5]. Уравнения движения Навье-Стокса (3) и уравнения диффузии компонент (4) решаются схемой переменных направлений [5]. В силу ограничения объёма статьи мы не приводим подробное описание используемых разностных схем.

Результаты проведённых расчётов показаны на рисунках 2 – 6. Значения коэффициентов μ_k , λ_k , Cp_k для i -го газа приведены в работах [6] – [8], а термокинетических постоянных q_{3-6} , k_{3-6} , E_{3-6} , M_{3-6} , M_y , M_c приведены в работах [9] – [11].

На рисунках 2 – 5 приведена динамика изменения параметров течения для следующих моментов времени t :

$$\begin{aligned}
t_1 &= 0,001; \\
t_2 &= 0,01; \\
t_3 &= 0,05; \\
t_4 &= 0,2; \\
t_5 &= 0,5.
\end{aligned}$$

5) уравнение состояния газовой фазы

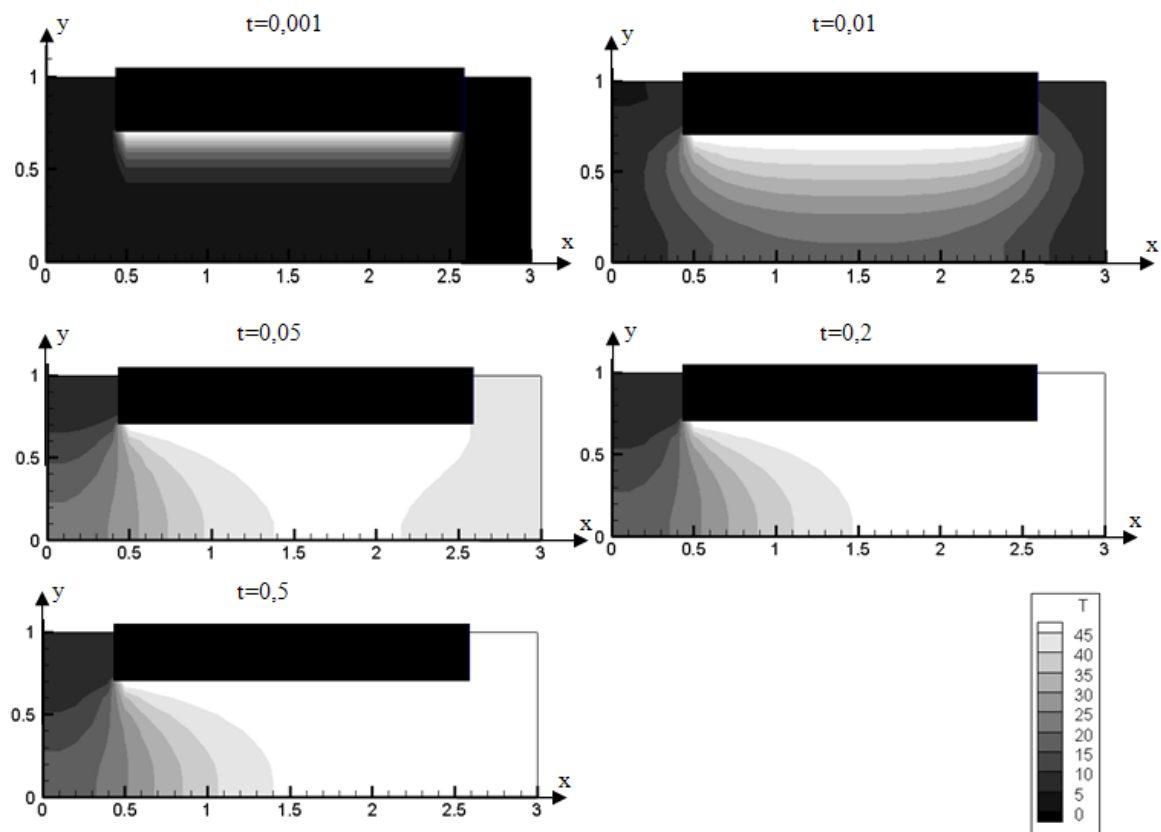


Рис. 2. Изменение поля температур $T(x, y, t)$ при постоянном равномерном выделении продуктов горения угля по границе Γ_1 (огневой забой)

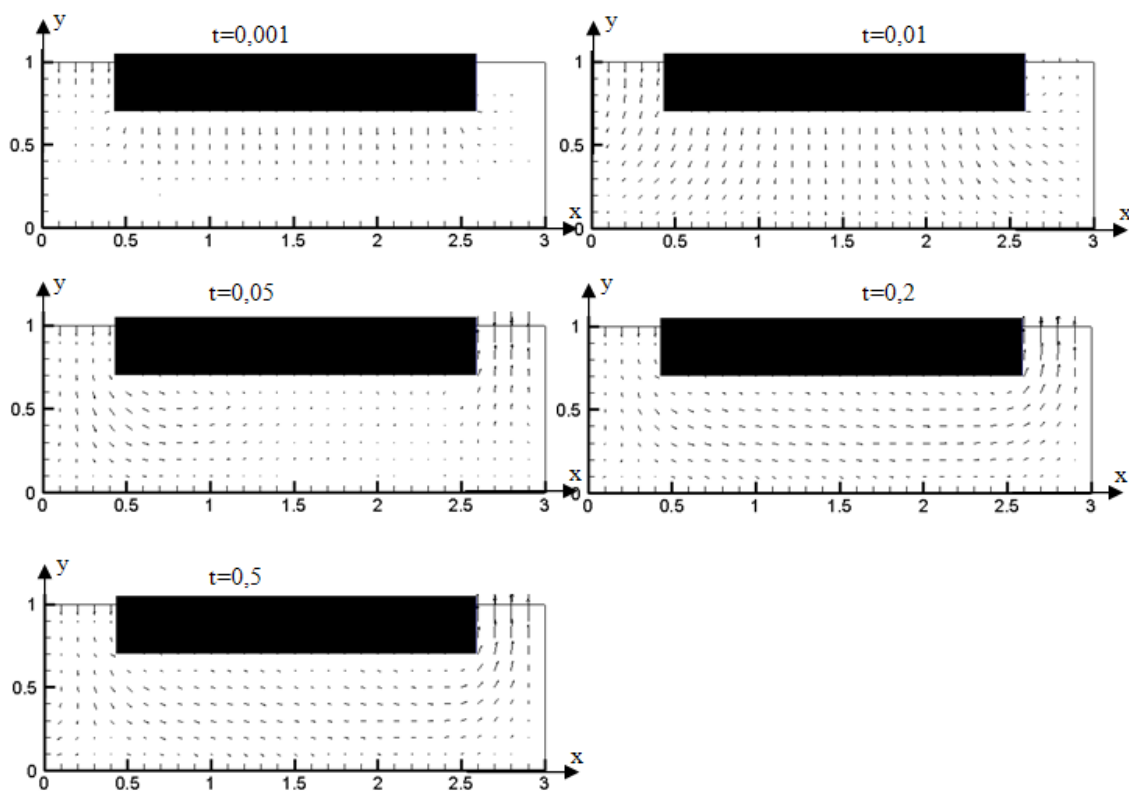


Рис. 3 Изменение поля скоростей $U_x(x, y, t), V_x(x, y, t)$

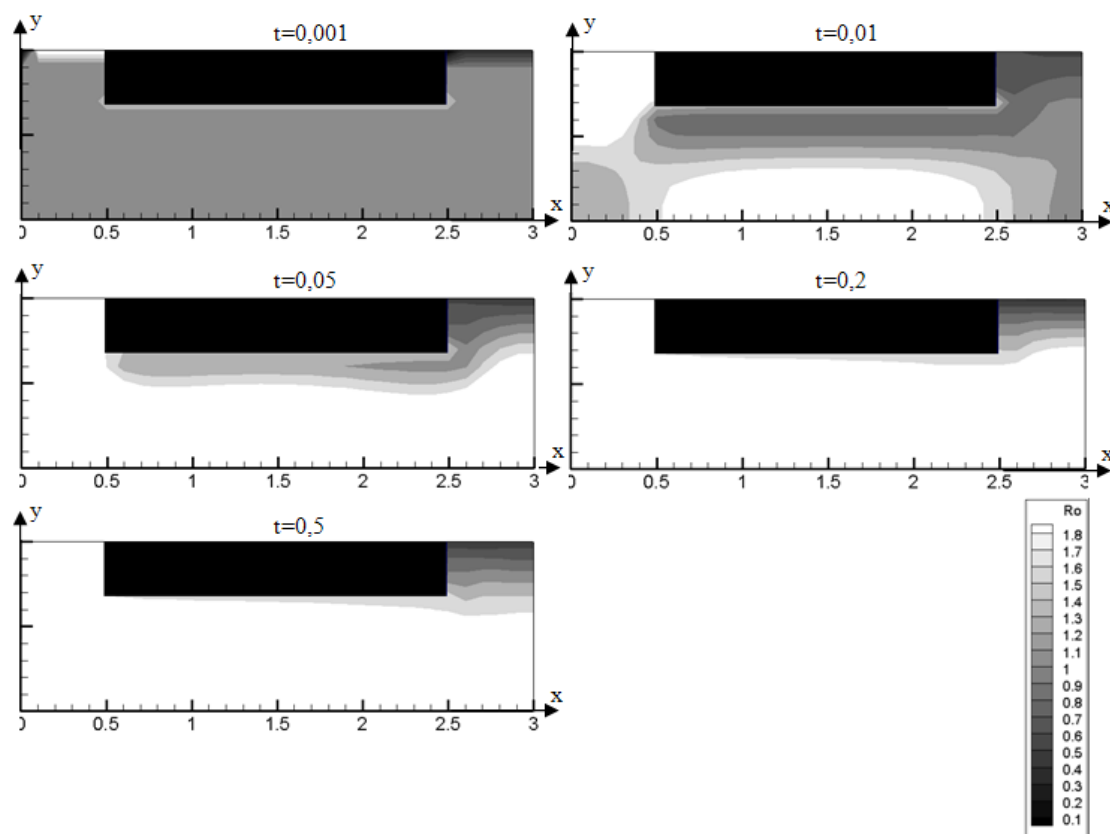


Рис. 4. Изменение поля плотности $\rho(x, y, t)$ газовой смеси

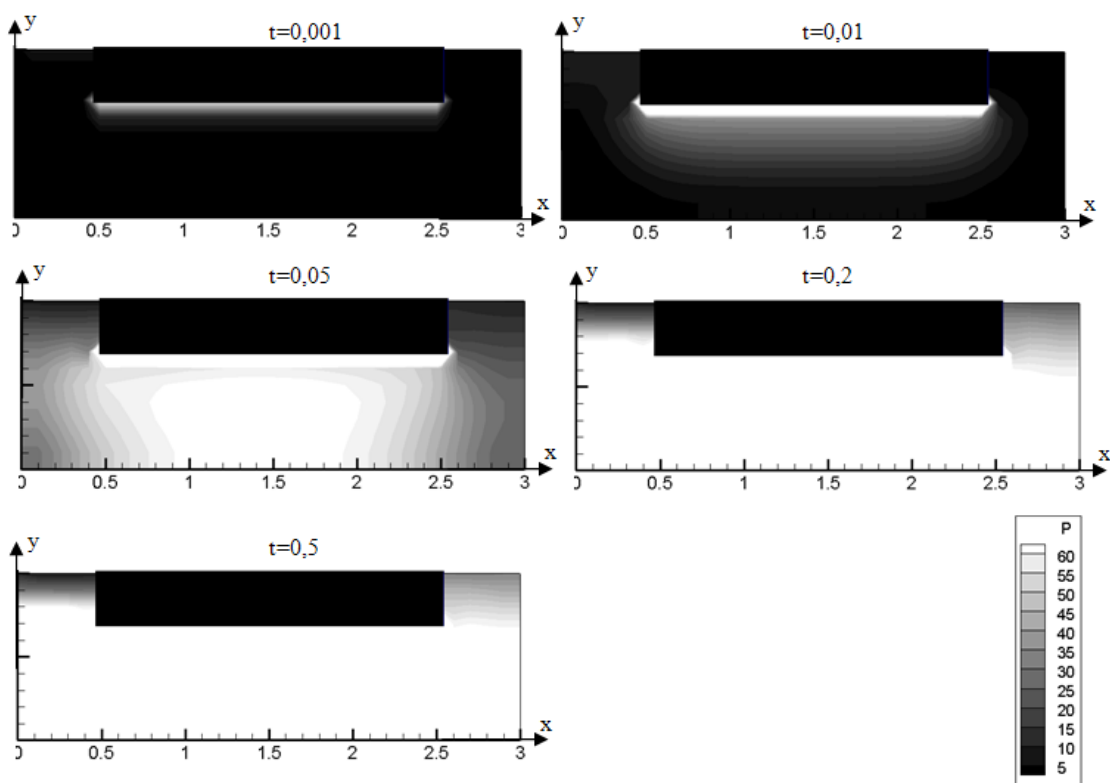


Рис. 5. Изменение давления $P(x, y, t)$ газовой смеси

В качестве начальных данных были взяты следующие долевые соотношения газового состава в огневом штреке (см. таблицу 1):

Таблица 1

	Начальный состав газа в ПГУ (%)	Состав дутья (%)	Состав газа, образующийся при горении каменного угля (%)
CH_4	0	0	2
H_2	0	0	11
CO	0	0	10
O_2	20	21	0
CO_2	0,5	0,05	11,5
N_2	78,5	78	65,5

На рис. 6 приведены графики изменения состава газа на границе газосборочной скважины Γ_6 .

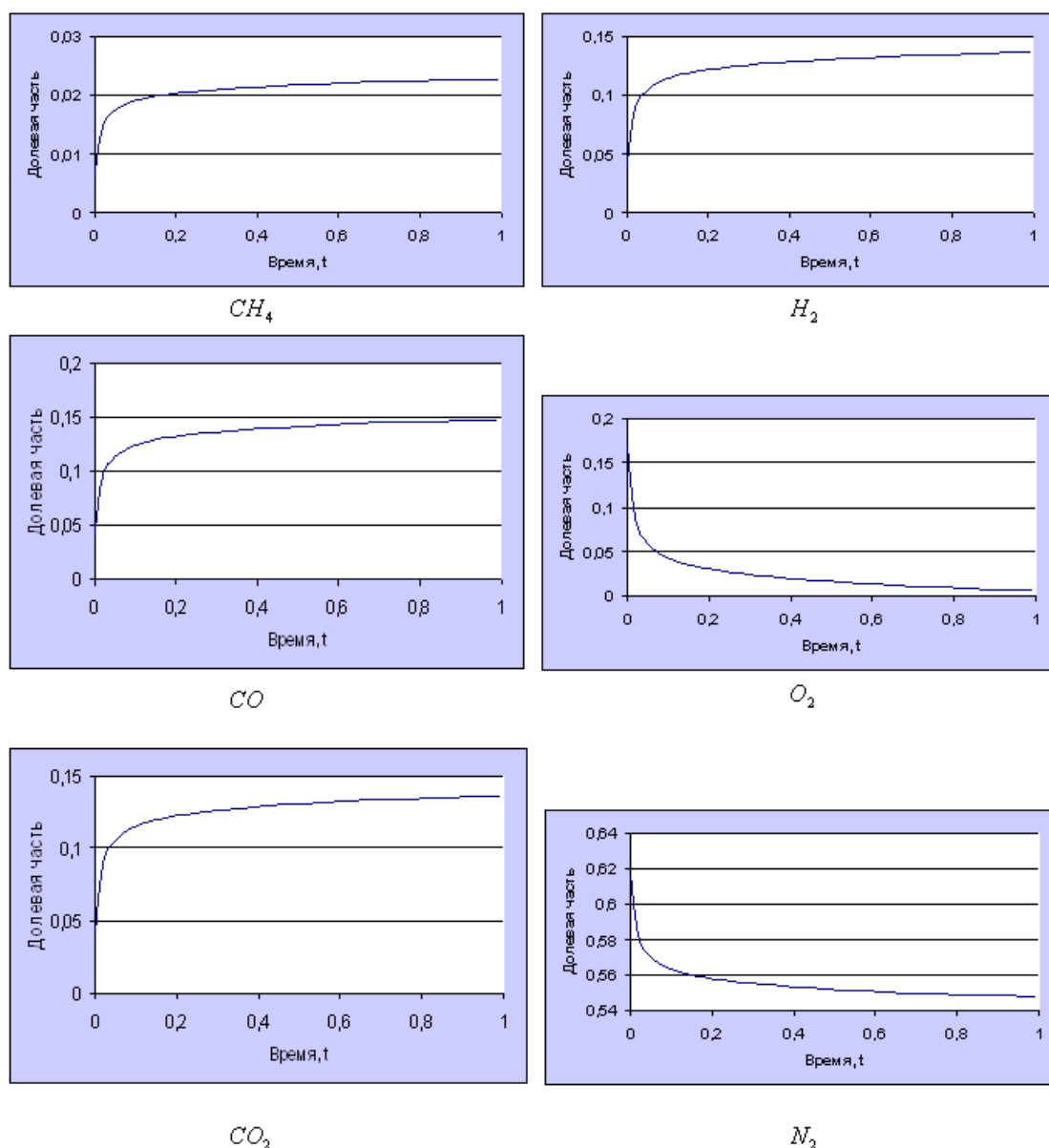


Рис. 6. Изменение компонентов состава газа на границе газосборочной скважины (Γ_6)

Далее во второй колонке таблицы 2 приведён установившийся состав газа на границе газосборочной скважины (Γ_6), полученный при решении задачи (1) – (4). В следующих двух колонках – расчетный и реальный состав газа, представленный в [1].

Таблица 2

	Расчетный ито- говый состав газа (%)	Состав газа по Крейнину (каменный уголь, процент кислорода в дутье = 21 %)	Реальный состав газа по Крейни- ну (каменный уголь, процент ки- слорода в дутье = 21 %)
CH_4	2,3	2,1	2,6
H_2	12,5	13,1	12,5
CO	12,1	22,2	11,9
O_2	0,4	0	0,2
CO_2	13,4	6,6	13,2
N_2	59	56	59,5
Неучитываемая примесь	0,3	-	0,1

Расхождение расчётного состава газа и реального газа при ПГУ на базе шахты Южно-Абинской имеют место только по кислороду (O_2), что связано с различием состава газа выделяемого при горении реального угля и использованного в расчётах.

Проведённые расчёты позволяют сделать вывод, что предложенная в работе модель работы подземного газификатора качественно правильно отражает реальный процесс ПГУ, проведённый на шахте Южно-Абинской в Кузбассе (см. [1]).

Литература

1. Крейнин, Е. В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырьё / Е. В. Крейнин. – М.: НРЦ Газпром, 2004. – 301 с.
2. Численное решение двумерной задачи о подземной газификации угля [Электронный ресурс] / Ю. Н. Захаров, П. В. Дементьев, Е. Е. Зеленский, М. В. Родина // Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика: Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Н. Н. Яненко, Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г., Новосибирск, ИВТ СО РАН, 2011, № гос. регистрации – 0321101160. – Режим доступа: <http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/38540/47069/zaxarovyn.pdf> (дата обращения: 06.11.2011).
3. About one model of in-situ coal gasification/ Y. N. Zakharov, M. Y. Zakharov, E. E. Zelensky, V. P. Potapov, E. L. Schaslivtcev // Proceedings of International Conference “Mathematical and Informational Technologies MIT-2009” (Kopaonik, Serbia, Budva, Montenegro, 27 August-5 September 2009). – Kosovska Mitrovica, 2009. – P. 447 – 452.
4. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 618 с.
5. Яненко, Н. Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н. Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 197 с.
6. Таблицы физических величин: справочник / под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения о веществах. Физические свойства важнейших веществ. Техника лабораторных работ. Интеллектуальная собственность. – СПб: Мир и Семья, 2006 – 1464 с.
8. Инженерный справочник: 2006-2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dpva.info>. (дата обращения: 10.01.2012).
9. Алексеев, Б. В. Физическая газодинамика реагирующих сред: учеб. пособие для мех.-мат. и физ. спец. вузов / Б. В. Алексеев, А. М. Гришин. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.
10. Гришин, А. М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А. М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 239 с.
11. Померанцев, В. В. Основы практической теории горения: учебное пособие для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов; под ред. В. В. Померанцева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 312 с.

Информация об авторах:

Захаров Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики КемГУ, зав. кафедрой вычислительной математики КемГУ, т. 8(384-2) 54-27-70, zyn@kemsu.ru.

Zakharov Yuriy Nikolaevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Computational Mathematics of KemsU, Head of the Department of Computational Mathematics of KemsU.

Зеленский Евгений Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вычислительной математики КемГУ, т. 8(384-2) 54-27-70, zyn@kemsu.ru.

Zelenskiy Evgeniy Evgenievich – Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Computational Mathematics of KemsU.

Родина Мария Сергеевна – аспирант, консультант Государственной службы по надзору и контролю в сфере образования Кемеровской области, т. 8(902)755-57-78, nika_romansu@rambler.ru

Rodina Maria Sergeevna – post-graduate student, adviser at the State service for supervision and control in education of Kemerovo region.