

УДК 628.543.1:622.765.54

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

Субботин Александр Николаевич,

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Энергетического института ФГАОУ
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: subbot@inbox.ru

Кулеш Роман Николаевич,

канд. техн. наук, ассистент кафедры парогенераторостроения
и парогенераторных установок Энергетического института ФГАОУ
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: ronikul@tpu.ru

Мазаник Анна Сергеевна,

аспирант кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок
Энергетического института ФГАОУ «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: mazanik@tpu.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания математической модели теплофизических процессов, происходящих при подземной газификации угольных пластов, как инструмента оценки возможности и условий их газификации.

Цель работы: разработка и апробирование математической модели применительно к подземной газификации угольных пластов как нетрадиционному способу их разработки.

Методы исследования: численное решение краевых задач с использованием итерационно-интерполяционного метода.

Результаты: сформулирована математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса при подземной газификации угля. Численные исследования позволяют определить состав образующихся газов в зависимости от температуры, давления продуктов газификации и состава вдуваемого нагретого газа. Получены зависимости выхода состава горячего газа от концентрации компонентов вдуваемого окислителя: сухой воздух, смесь, в разных пропорциях, кислорода, азота и водяного пара. В результате численных расчетов установлено, что при подземной газификации угля подаваемый в слой угля кислород или паровоздушная смесь практически полностью расходуется в области окисления продуктов пиролиза, в остальной части исследуемого объема угля содержание окислителя незначительно. Поэтому в слое кокса накапливается максимальная массовая концентрация горячего газа, который переносится движущимися газообразными продуктами из области окисления во внешнюю среду. Показано, что, меняя концентрацию кислорода и водяного пара в подаваемой в слой угля паровоздушной смеси, можно значительно изменить состав образующегося горячего газа, а долю негорючего газа (диоксида углерода) снизить. Концентрацию диоксида углерода можно еще более уменьшить, повысив температуру процесса газификации, которая в исследованиях принималась равной 800 К. Повышение давления в окислителе также приводит к увеличению концентрации горючих газов, но этот эффект менее существенный. Следовательно концентрация горячего газа в продуктах газификации зависит в основном от концентрации водяного пара, температуры газификации и концентрации кислорода в паровоздушной смеси, подаваемой в угольный пласт.

Ключевые слова:

Уголь, подземная газификация, продукты газификации, математическое моделирование.

Технология подземной газификации угля (ПГУ) – нетрадиционный способ разработки угольных месторождений, открывающий новые возможности в отработке угольных пластов со сложными горно-геологическими условиями залегания [1–5]. Все технологические операции по газификации угольного пласта осуществляются с земной поверхности, без применения подземного труда работающих, а разработка месторождения происходит экологически приемлемым способом [6].

В настоящее время практически во всех крупных угледобывающих странах мира резко возрос интерес к подземной газификации угля. Интенсивные работы исследовательского и практического характера проводятся в Китае [4], где в последние годы построено 10 промышленных станций подземной газифи-

кации угля, в Австралии, где в 2003 г. построено крупное предприятие данного профиля [5]. Проявляется активный интерес к этой технологии в России и таких странах, как Индия, КНДР и многих других. Но, несмотря на перспективность рассматриваемой технологии ПГУ, известны немногочисленные примеры её практической реализации. Это обусловлено в первую очередь отсутствием теории процессов тепломассопереноса в угле при его газификации под землей. Выбор основных технологических режимов реализации ПГУ невозможен путем только экспериментальных исследований рассматриваемого процесса. Необходимо создание теории процесса ПГУ на базе математических моделей, учитывающих комплекс основных процессов тепломассопереноса, протекающих при подземной газификации.

Физическая постановка задачи

Возможны различные практические схемы реализации технологий подземной газификации углей. Рассмотрим наиболее простую и достаточно типичную. Предполагаем, что в угольном пласте глубиной H пробурена скважина и введена труба, а внутри этой трубы находится вторая труба, меньшего диаметра. По внутренней трубе (рис. 1) к нижнему основанию угольного пласта ($z < h$) подается подогретый до температуры T_0 сухой или влажный воздух. По истечении некоторого времени прилегающая область угольного пласта прогреется до такой температуры, что в нем начнутся химические процессы. Через отверстия на боковой поверхности наружной трубы ($z > h$) образовавшиеся газы проникают во внешнюю трубу и выводятся из угольного пласта на поверхность.

Исследуем изменение состава образующегося при газификации газа в зависимости от условий и свойств вдуваемой паровоздушной смеси.

При прогреве, пиролизе и газификации типичных углей в зависимости от температуры процесса может протекать достаточно большое количество различных реакций [7, 8]. В предлагаемой постановке принималось, что рассматриваемый процесс газификации сопровождается реакциями:

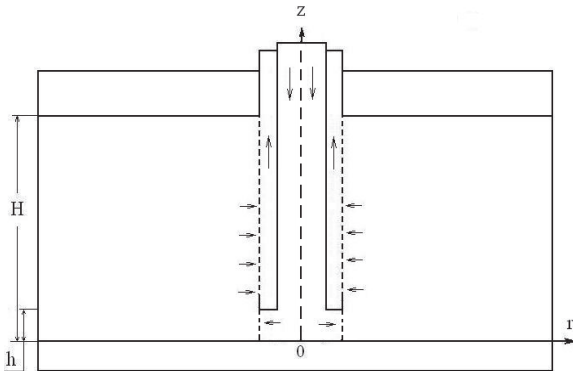
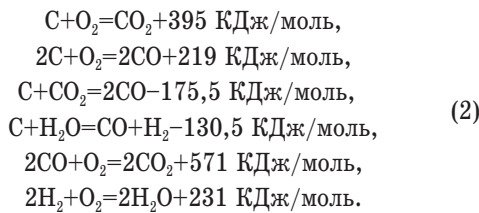
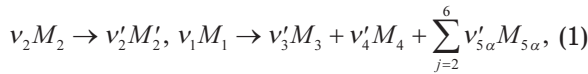


Рис. 1. Схема подачи паровоздушной смеси и отвода образующегося газа при ПГУ

Fig. 1. Diagram of vapor-air mixture supply and removal of gas generated at underground coal gasification (UCG)

Совокупность этих реакций будет определять состав образующегося газа, как в области газификации, так и на выходе из скважины. Уравнение (1) описывает процесс испарения свободной воды ($\nu_2 M_2$) и превращения ее в пар ($\nu_2' M_2'$), второе — процесс пиролиза твердого топлива.

Математическая модель подземной газификации угля

При математическом моделировании ПГУ принимается, что в угольном пласте отсутствуют неоднородности, а условия тепло- и массообмена вдоль верхней и нижней поверхности пласта не изменяются, поэтому задача решалась в цилиндрической системе координат. Начало координат помещалось на ось трубы (рис. 1), ось r направлялась вдоль нижней границы угольного пласта, а ось z — от области подачи паровоздушной смеси в угольный пласт к его верхней границе. С учетом записанных выше предположений и реакций (1), (2) система уравнений [9, 10], моделирующая рассматриваемые процессы, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} &= -R_p, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_s, \\ \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} &= \gamma_c R_p - R_{sc}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \gamma_s R_p, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varphi_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_s \varphi_s u) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_s \varphi_s v) &= \\ = \gamma_g R_p + R_s + R_{sc}, \quad \sum_{j=1}^5 \varphi_j &= 1, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varphi_s c_\alpha) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_s \varphi_s u c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_s \varphi_s v c_\alpha) &= \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_s \varphi_s D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_s \varphi_s D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) + \\ + R_{s\alpha} + R_{5s\alpha}, \quad \alpha = 1, \dots, 6, \quad \sum_{\alpha=1}^7 c_\alpha &= 1, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^5 \rho_j \varphi_j c_{pj} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_s \varphi_s c_{ps} \left(u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_p R_p - \\ - q_{s2} R_{s2} + q_{co} R_{co} + q_H R_H + q_{sc} \bar{R}_{sc}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad v = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_s g \right), \quad p = \frac{\rho_s R T}{M}. \quad (7)$$

Система дифференциальных уравнений (3)–(7) решалась при краевых условиях

$$\begin{aligned} t = 0: \quad \varphi_j &= \varphi_{jH}, \quad j = \overline{1, 4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1, 6}, \\ \rho_s &= \rho_{sH}, \quad T|_{z \leq h} = T_0, \quad T|_{z > h} = T_H, \quad T|_{r=R_0} = T_H; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} r = R_0, \quad z > h: \quad \frac{\partial^2 c_\alpha}{\partial r^2} &= 0, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0; \\ r = R_0, \quad z \leq h: \quad c_\alpha &= c_{\alpha 0}, \\ \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} &= \alpha_0 (T - T_0), \quad p = p_0; \\ r = L: \quad c_\alpha &= c_{\alpha H}, \quad T = T_H, \quad p = p_H; \end{aligned} \quad (9)$$

$$z = 0: \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_s g, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1 (T - T_1),$$

$$z = H: \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_s g, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2 (T - T_2). \quad (10)$$

Здесь уравнения (3) описывают законы сохранения массы исходного конденсированного вещества (угля), влаги, кокса и золы соответственно; (4) – уравнение сохранения массы газовой фазы; (5) – уравнения сохранения массы отдельных компонентов газовой фазы ($\alpha=1$ – кислорода, $\alpha=2$ – оксида углерода, $\alpha=3$ – диоксида углерода, $\alpha=4$ – водорода, $\alpha=5$ – метана, $\alpha=6$ – водяного пара); последнее уравнение в (5) – алгебраическое соотношение необходимое для замыкания системы уравнений (5); (6) – уравнение сохранения энергии; (7) – уравнение движения в форме Дарси в проекциях на цилиндрические оси координат r, z и уравнение состояния.

При решении краевой задачи (3)–(10) были введены следующие обозначения: E_p, k_p – энергия активации и предэкспоненциальный множитель гомогенной реакции разложения угля, кДж/моль, 1/с; T – температура в угольном пласте, К; ρ, φ_j ($j=1, \dots, 5$) – истинные плотности и объемные доли угля, воды, кокса, шлака и газовой фазы соответственно, кг/м³, м³/м³; R_p, R_s, R_{sc} – массовые скорости разложения угля, испарения влаги и окисления кокса, кг/(м³·с), кг/(м²·с), кг/(м²·с);

$$R_{sc} = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} + R_{s4},$$

$$R_{s1} = (M_3/M_{s1}) s \rho_s \varphi_3 c_1 k_{s1} \varphi_3 \exp(-E_{s1}/RT),$$

$$R_{s2} = \frac{2M_3}{M_{s1}} s \sqrt{\rho_s \varphi_5 c_1} k_{s2} \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_{s2}}{RT}\right),$$

$$R_s = \rho_2 \varphi_2 \frac{k_s}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_s}{RT}\right),$$

$$R_p = k_p \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right),$$

$$R_{s3} = \frac{M_3}{M_{s3}} s \rho_s \varphi_5 c_3 k_{s3} \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_{s3}}{RT}\right),$$

$R_{s4} = (M_3/M_{s6}) s \rho_s \varphi_5 c_6 k_{s4} \varphi_3 \exp(-E_{s4}/RT)$; $R_s, R_{s1}, R_{s2}, R_{s3}, R_{s4}, k_s, k_{s1}, k_{s2}, k_{s3}, k_{s4}$ – энергия активации и предэкспоненциальный множитель гетерогенных реакций испарения влаги и окисления кокса, кДж/моль, м/с; s – удельная поверхность пор, 1/м; R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); T – температура среды, К; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7$ – массовые концентрации кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водорода, метана, паров воды и азота; $\gamma_c = v'_3 M_3 / v_1 M_1$, $\gamma_s = v'_4 M_4 / v_1 M_1$, $\gamma_g = \sum_{\alpha=2}^4 v'_{5\alpha} M_{5\alpha} / v_1 M_1$ – массовые доли кокса, шлака (золы) и газовой фазы, образующиеся при пиролизе угля; $M_3, M_{s1}, M_{s2}, M_{s3}, M_{s4}, M_{s5}, M_{s6}, M_{s7}$ – атомарная масса углерода и молекулярные массы кислорода, оксида углерода, диоксида углерода, водо-

рода, метана, паров воды и азота, кг/моль; $v_1, v'_3, v'_4, v'_{5\alpha}$ – стехиометрические коэффициенты; $\gamma_{CO} = v'_{52} M_{52} / v_1 M_1$, $\gamma_{H_2} = v'_{54} M_{54} / v_1 M_1$, $\gamma_{CH_4} = v'_{55} M_{55} / v_1 M_1$, $\gamma_{H_2O} = v'_{56} M_{56} / v_1 M_1$ – массовые доли оксида углерода, водорода, метана и водяного пара, образующиеся при пиролизе угля; u, v – компоненты скорости фильтрации газообразных продуктов в направлении цилиндрических осей координат r и z , м/с; D_α – эффективный коэффициент диффузии α – компоненты газовой фазы, м²/с; $R_{s1} = -(M_{s1}/2M_{52})R_{CO} - (M_{s1}/2M_{54})R_{H_2}$ – массовая скорость исчезновения кислорода за счет реакции окисления оксида углерода и водорода, кг/(м³·с); R_{CO}, R_{H_2} – массовые скорости окисления оксида углерода и водорода, кг/(м³·с), M – молекулярная масса многоком-

нентной смеси, $M = 1 / \sum_{\alpha=1}^7 \frac{c_\alpha}{M_{5\alpha}}$, кг/моль;

$R_{CO} = T^{-2.25} k_{CO} (c_1 M / M_{s1})^{0.25} (c_2 M / M_{s2}) \exp(-E_{H_2}/RT)$, $R_{H_2} = k_{H_2} y_{H_2}^{1.5} y_{O_2} \exp(-E_{H_2}/RT)$, $E_{CO}, E_{H_2}, k_{CO}, k_{H_2}$ – энергия активации и предэкспоненциальный множитель реакции окисления оксида углерода и водорода, кДж/моль, 1/с; R_{s51} – массовая скорость исчезновения кислорода вследствие протекания гетерогенных реакций окисления кокса; $R_{s51} = -(M_{s1}/M_3)R_{s1} - (M_{s1}/2M_3)R_{s2}$, кг/(м²·с); R_{s2}, R_{s52} – скорость изменения массы оксида углерода, вследствие протекания гомогенных и гетерогенных реакций, кг/(м³·с); $R_{s2} = \gamma_{CO} R_p - R_{CO} + (M_{52}/M_{55})R_{CP}$, $R_{s52} = (M_{52}/M_3)R_{s2} + (2M_{52}/M_3)R_{s3} + (M_{52}/M_3)R$; R_{s3}, R_{s53} – скорость изменения массы диоксида углерода за счет гомогенных и гетерогенных реакций, протекающих в угольном пласте, кг/(м²·с);

$$R_{s3} = \gamma_{CO_2} R_p + (M_{53}/M_{52})R_{CO},$$

$$R_{s53} = (M_{53}/M_3)R_{s1} - (2M_{52}/M_3)R_{s2};$$

R_{s4}, R_{s54} – скорость изменения массы водорода при протекании гомогенных и гетерогенных реакций, кг/(м³·с); $R_{s4} = \gamma_{H_2} R_p - R_{H_2}$, R_{s55} – скорость изменения массы метана вследствие пиролиза угля, кг/(м³·с); $R_{s5} = \gamma_{CH_4} R_p - R_{CH_4}$, $R_{s55} = 0$; R_{s6}, R_{s56} – скорость изменения массы паров воды вследствие протекания гомогенных и гетерогенных реакций, кг/(м²·с); $R_{s56} = (M_{56}/M_3)R_{s4}$, $R_{s56} = \gamma_{H_2O} R_p + (M_{56}/M_{54})R_{H_2}$; c_{pj} ($j=1, \dots, 5$) – удельные теплоемкости угля, воды, кокса, золы и газовой фазы соответственно, Дж/(кг·К); $\lambda = \lambda_s + \lambda_R$ – эффективная теплопроводность угля, Вт/(м·К); $\lambda_R = 16\sigma T^3/s$ – лучистая тепло-

проводность, Вт/(м·К); $\lambda_s = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \varphi_j$ – теплопроводность многофазной среды, Вт/(м·К);

$c_{p5} = \sum_{\alpha=1}^7 c_{p5\alpha} c_\alpha$, $\lambda_5 = \sum_{\alpha=1}^7 \lambda_{5\alpha} c_\alpha$ – удельная теплоемкость и теплопроводность газовой фазы в порах, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); $q_p, q_{s2}, q_{CO}, q_{H_2}, q_{CH_4}$ – тепловые эффекты реакций пиролиза, испарения влаги, окисления оксида углерода, водорода и метана, Дж/кг; k – коэффициент проницаемости, Дарси, $k = k_s \varphi_5^3 / (1 - \varphi_5)^2 k_*$ – эмпирическая константа, Дар-

си, ($1 \text{ Дарси} = 1,02 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$), φ_3 – пористость угля; μ – коэффициент динамической вязкости, Н·с/м²; p – давление газообразных продуктов в порах, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; h и L – толщина и радиус исследуемого угольного пласта, м; T_H, p_H, ρ_H, c_{aH} – температура, давление, плотность и массовая концентрация α -компоненты газовой фазы в начальный момент времени в угольном пласте; T_0 – температура вдуваемой паровоздушной смеси, К; T_1, T_2 – температуры внешней среды на верхней и нижней границе угольного пласта, К; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие теплообмен угольного пласта с верхней и нижней поверхностью, Вт/(м²·К); α_0 – коэффициент теплоотдачи, характеризующий конвективный теплообмен паровоздушной смеси с угольным пластом, Вт/(м²·К). Индексы: 0 – параметры источника зажигания; H – начальное значение параметра; $S, 5$ – конденсированная и газовая фаза.

Анализ результатов численных исследований

При численном решении краевой задачи (3)–(10) использовался метод решения и разностная схема [11]. Вычислялись все характеристики газифицируемого топлива: распределения температуры, объемных долей влаги, конденсированных и газообразных продуктов пиролиза, массовых концентраций газообразных компонентов, давления, поля скорости фильтрации. Теплофизические параметры были взяты из [12, 13], а кинетические константы для численных расчетов и состав продуктов пиролиза – из работ [14–20].

При проведении численных расчетов перепад давления на входе $\Delta P = P_0 - P_H$ задавался равным 10^3 Па, влагосодержание угольного пласта $W = 5\%$, параметры вдуваемой в угольный пласт паровоздушной смеси: температура $T_0 = 800$ К, массовая концентрация кислорода и водяного пара варьировалась. Получены температурные поля при подаче паровоздушной смеси в нижнюю часть угольного пласта, из которых следует, что в угольном пласте образуется прогретая область и в ней начинают протекать процессы газификации угля.

На рис. 2. приведено векторное поле скорости фильтрации продуктов газификации, на котором все векторы скорости нормированы на модуль скорости в той же точке (приведены к одному размеру). Если учитывать реальную длину векторов, то не удастся изобразить картину течения в векторном виде, т. к. скорость в области газификации и вне ее различается на несколько порядков. Поэтому рисунок показывает лишь направление движения газообразных продуктов в угольном пласте.

Анализ рис. 2 приводит к выводу, что газообразные продукты, находящиеся у нижнего основания, движутся вдоль угольного пласта, а остальные, перемещаясь по частично или полностью прококсованной области, разворачиваются вдоль границы пиролиза, попадают во внешнюю трубу и выводятся по ней наружу.

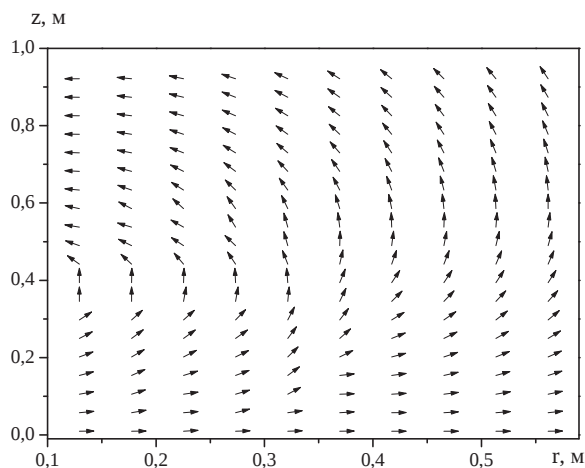


Рис. 2. Векторное поле скорости фильтрации продуктов газификации в угольном пласте у нижнего основания скважины

Fig. 2. Vector field of speed of filtering gasification product in coal bed at well lower base

Такая картина движения создается соответствующим полем давления, изображенным на рис. 3. Здесь от нуля до точки $z = 0,3$ м боковая поверхность трубы перфорированная и через отверстия вдувается паровоздушная смесь (задано $\Delta P = 10^3$ Па). Боковая поверхность трубы при $0,3 \text{ м} < z < 0,45 \text{ м}$ непроницаемая, поэтому газ движется на этом участке трубы вдоль стенки (рис. 2). Точка $z = 0,55$ м совпадает с границей полного окисления кокса, а точка $z = 0,7$ м – с границей окончания пиролиза угля в рассматриваемый момент времени ($t = 14\,156$ с).

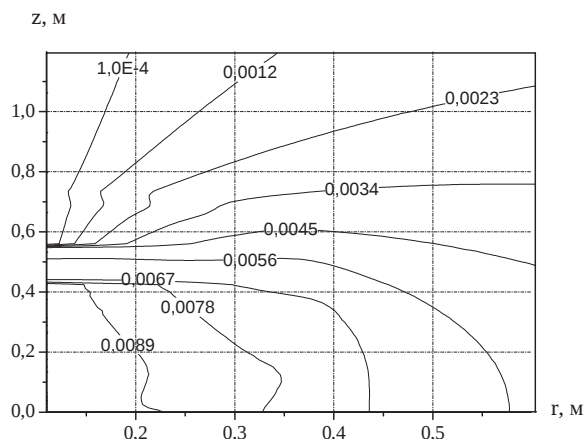


Рис. 3. Распределение безразмерного перепада давления в области газификации угольного пласта

Fig. 3. Distribution of pressure non-dimensional fall in coal bed gasification area

Следует отметить, что при ПГУ подаваемый в слой угля кислород практически полностью расходуется в области окисления продуктов пиролиза, в остальной части исследуемого объема угля содержание кислорода незначительно. Оксид углерода, образующийся при окислении кокса и пиролизе

угля, переносится движущимися газообразными продуктами из области окисления в слой кокса и затем во внешнюю трубу скважины. Поэтому в коксе накапливается максимальная массовая концентрация оксида углерода (рис. 4).

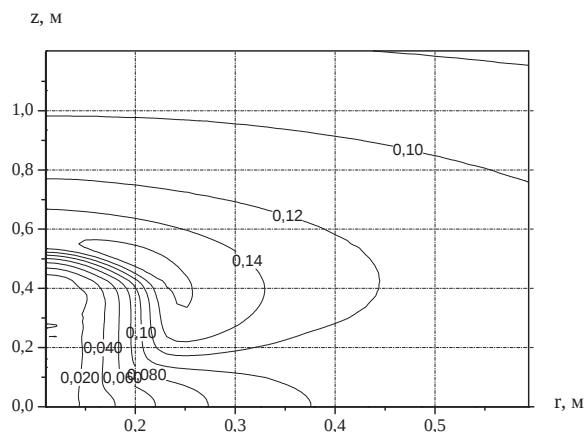


Рис. 4. Распределение массовой концентрации оксида углерода

Fig. 4. Distribution of carbon oxide weight concentration

В приведенной на рис. 4. зависимости массовая концентрация оксида углерода в газе, поступающем из скважины, равна 0,12–0,14. Это в три раза больше массовой концентрации оксида углерода, образующегося при пиролизе угля в инертной среде.

Массовая концентрация диоксида углерода представлена на рис. 5, из которого следует, что при рассматриваемых параметрах газификации угля остается достаточно мало диоксида углерода (концентрация CO_2 при пиролизе угля в инертной среде в три раза больше). Концентрацию диоксида углерода, можно еще уменьшить, повысив температуру процесса газификации.

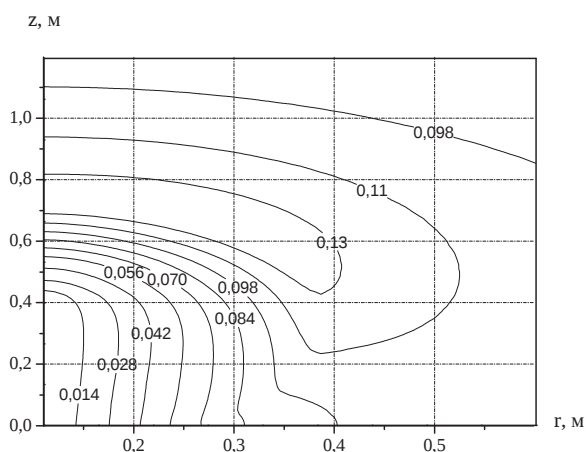


Рис. 5. Распределение массовой концентрации диоксида углерода

Fig. 5. Distribution of carbon dioxide weight concentration

Из анализа полученных полей массовых концентраций водорода и метана следует, что концентрации этих компонентов очень малы. При пиролизе угля в инертной среде массовая концентрация водорода в двадцать раз, а метана – в двадцать

пять раз выше этих значений. Такое сильное уменьшение концентрации водорода и метана можно объяснить их окислением с образованием водяного пара, а для метана еще и оксида углерода. Этот вывод подтверждается значительным увеличением массовой концентрации водяного пара в угольном пласте (рис. 6).

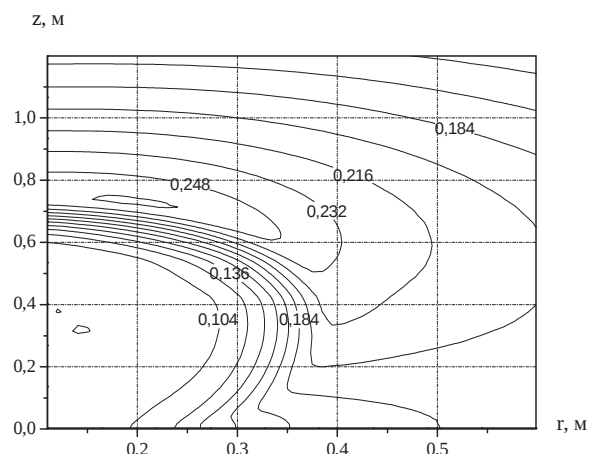


Рис. 6. Распределение массовой концентрации водяного пара

Fig. 6. Distribution of vapor weight concentration

В паровоздушной смеси, подаваемой в угольный пласт, массовая концентрация водяного пара равна 0,1. Внутри пласта она увеличивается более чем в два раза, частично за счет испарения влаги угольного пласта (задавалось начальное влагосодержание угольного пласта равное 5 %) и частично вследствие того, что идет реакция окисления водорода (2).

Следует отметить, что концентрация горючего газа в продуктах газификации зависит от концентрации водяного пара, температуры газификации и концентрации кислорода в паровоздушной смеси, подаваемой в угольный пласт. Так, если увеличить перепад давления, полагая его равным $2 \cdot 10^3$ Па, то скорость подачи паровоздушной смеси в угольный пласт увеличивается и это изменяет соотношение концентраций газообразных компонентов на выходе.

В частности концентрация кислорода при данном перепаде давления несколько увеличилась по сравнению с предыдущим вариантом. В конечном счете это привело к увеличению концентрации оксида углерода в отводимом из области газификации газе.

Профили массовой концентрации оксида углерода представлены на рис. 7, из которого следует, что во внешнюю трубу поступает горячая смесь с массовой концентрацией оксида углерода 0,14–0,18 (в предыдущем расчете она была равна 0,12–0,14). Концентрации остальных компонентов остались практически без изменения, при этом перепада давления и скорость фильтрации увеличились в два раза. Таким образом, увеличение перепада давления в 2 раза привело к увеличению концентрации оксида углерода и объема образующейся горючей смеси.

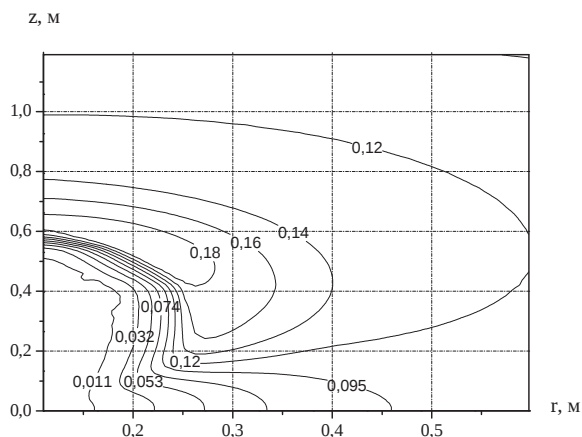


Рис. 7. Распределение массовой концентрации оксида углерода ($C_{10}=0,1$, $\Delta P=2 \cdot 10^3$ Па)

Fig. 7. Distribution of carbon oxide weight concentration ($C_{10}=0,1$, $\Delta P=2 \cdot 10^3$ Pa)

Кроме рассмотренных выше были проведены расчеты с увеличенной концентрацией кислорода в паровоздушной смеси, закачиваемой в угольный пласт. Массовая концентрация кислорода в смеси полагалась равной 0,15, а не 0,1, как в предыдущих расчетах. В результате этого в угольном пласте повысилась концентрация кислорода, что привело к увеличению концентрации оксида углерода в продуктах газификации (рис. 8).

На рис. 8 приведено распределение по объему массовой концентрации оксида углерода при увеличении на 50 % начальной концентрации кислорода в паровоздушной смеси, закачиваемой в угольный пласт.

Сравнивая рис. 8 и 4, приходим к выводу, что увеличение начальной концентрации кислорода на 50 % привело к увеличению концентрации оксида углерода в образующейся горючей смеси примерно на 50 %. Массовые концентрации остальных компонент остались практически без изменения.

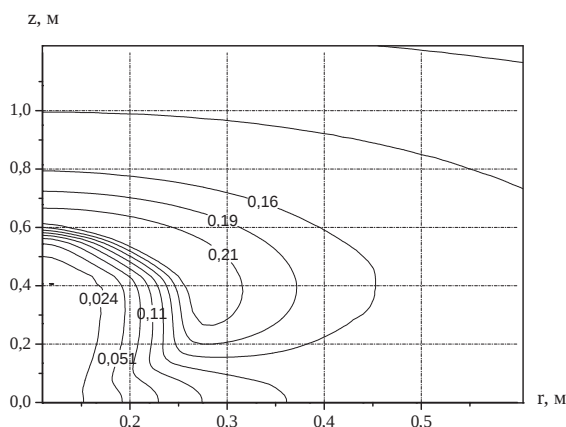


Рис. 8. Распределение массовой концентрации оксида углерода ($C_{10}=0,15$, $\Delta P=10^3$ Па)

Fig. 8. Distribution of carbon oxide weight concentration ($C_{10}=0,15$, $\Delta P=10^3$ Pa)

Дальнейшее увеличение концентрации кислорода в паровоздушной смеси, подаваемой в угольный пласт, приводит к смене режима – угольный пласт загорается (образуется область горения).

Температура в этой области повышается до 1300 К, даже при подаче в угольный пласт (после зажигания) относительно холодной паровоздушной смеси ($T_0=400$ К). Повышение температуры в угольном пласте приводит к увеличению концентрации горючих газов. На рис. 9 показаны профили массовой концентрации оксида углерода. Как следует из анализа этого рисунка, концентрация СО на выходе из скважины стала равной 0,2...0,3, а в области максимальной температуры 0,45.

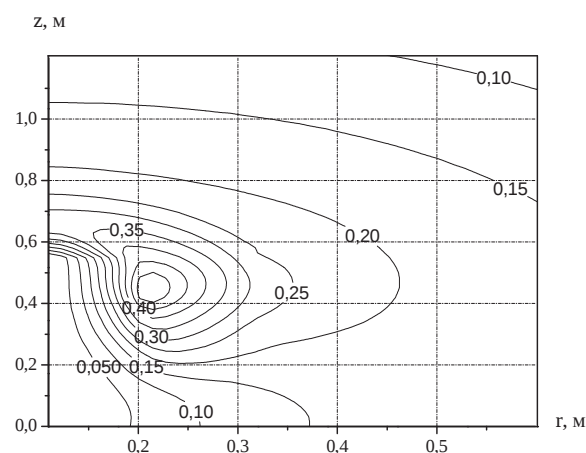


Рис. 9. Распределение массовой концентрации оксида углерода

Fig. 9. Distribution of carbon oxide weight concentration

Необходимо отметить, что концентрация водорода в процентном соотношении тоже значительно возросла. В предыдущих расчетах она была равна 0,2...0,27 %, в данном расчете увеличилась до 0,6...0,8 %, а в области максимальной температуры до 1,8 %. Концентрация метана при этом не изменилась, осталась в области газификации на прежнем уровне 1,1 %.

Результаты проведенного численного анализа дают основание сделать следующие выводы:

1. Рассмотренная математическая модель процессов тепломассопереноса и физико-химических превращений может быть использована при исследовании подземной газификации углей.
2. Состав окислителя оказывает существенное влияние на конечный выход основного продукта ПГУ.
3. Большие градиенты всех основных искомых функций, перемещение в пространстве зоны основных реакций и размеры объекта исследования существенно осложняют процесс численного решения задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубан А.Д. Подземная газификация угля – новый этап технологического и инвестиционного развития // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – № 2. – С. 288–300.
2. Зоря А.Ю., Крейнин Е.В. Может ли подземная газификация угольных пластов стать промышленной технологией? // Уголь. – 2009. – № 2. – С. 50–53.
3. Зоря А.Ю., Крейнин Е.В. Условия превращения подземной газификации угля в стабильную и высокопроизводительную промышленную технологию // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – № 4. – С. 298–299.
4. Кондырев Б.И., Белов А.В. Опыт подземной газификации угля в китайской народной республике // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – № 10. – С. 286–289.
5. Кондырев Б.И., Белов А.В., Маннанголов Д.Ш. Развитие технологии подземной газификации угля. Перспективы освоения угольных месторождений Дальнего Востока // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – № 1. – С. 297–300.
6. Крейнин Е.В. Подземная газификация угля как экологически чистая технология его добычи и использования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 4. – С. 256–262.
7. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
8. Камнева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых. – М.: Химия, 1990. – 288 с.
9. Кузнецов Г.В., Субботин А.Н. Тепломассоперенос в условиях подземной газификации угля // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 9. – С. 422–426.
10. Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 159–165.
11. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения / А.М. Гришин, В.И. Зинченко, К.Н. Ефимов, А.Н. Субботин, А.С. Якимов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – 319 с.
12. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренина, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
13. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1967. – 182 с.
14. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
15. Гагарин С.Г., Головин Г.С., Польшалиев А.М. Вещественный состав и реакционная способность фракций угля различной плотности // Химия твердого топлива. – 2006. – № 1. – С. 12–39.
16. Пиролиз бурых углей Бриневского месторождения республики Беларусь / И.И. Лаштван, П.Л. Фамешин, В.М. Дударчик, В.Н. Кожурин, Е.В. Ануфриева // Химия твердого топлива. – 2009. – № 3. – С. 20–25.
17. Расчет пиролиза растительных материалов в высоком слое / А.В. Голубкович, В.Г. Систер, И.А. Порев, А.Г. Чижиков // Промышленная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 53–55.
18. Кинетика термической деструкции компонентов угольной шихты / Ю.В. Коновалова, В.Н. Трифанов, А.М. Гюльмалиев, С.Г. Гагарин, И.А. Султангузин // Химия твердого топлива. – 2004. – № 4. – С. 3–16.
19. Федосеев С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 326 с.
20. Камнева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых. – М.: Химия, 1990. – 288 с.

Поступила 16.06.2014 г.

UDC 628.543.1:622.765.54

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER AT UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Aleksandr S. Subbotin,

Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: subbot@inbox.ru

Roman N. Kulesh,

Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue,
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: ronikul@tpu.ru

Anna S. Mazanik,

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: mazanik@tpu.ru

Relevance of the work is caused by the need of developing a mathematical model of thermal processes occurring at underground coal seams gasification as a tool to assess the possibilities and conditions of gasification.

The main aim of the study is to develop and to test a mathematical model applied to the underground gasification of coal beds as unconventional way of their development.

The methods used in the study: numerical solution of boundary value problems using iterative-interpolation method.

Results. The authors have stated mathematical model describing heat and mass transfer in underground coal gasification. Numerical studies allow us to determine the composition of the resulting gas, depending on the temperature, pressure and composition of gasification products of blown hot gas. The authors obtained the dependences of the combustible gas component output on concentration of injected oxidant: dry air, mixture of the oxygen, nitrogen and water vapor in different proportions. As a result of numerical calculations it was found out that at underground coal gasification the oxygen or vapor-air mixture fed to a coal bed almost completely consumed in the region of pyrolysis products oxidation; the rest part of coal volume contains slight amount of oxidant. Therefore, in a coke layer the maximum mass concentration of combustible gas accumulates. The gas is transferred by moving gaseous oxidation products from oxidation area to the environment. It was shown that when changing oxygen and steam concentration in the vapor-air mixture fed to the coal bed it is possible to change significantly the composition of the resulting combustible gas and to reduce non-combustible gas fraction (carbon dioxide). Carbon dioxide concentration can be reduced increasing gasification temperature which is 800 K in the study. Pressure increase in oxidizer results in growth of combustible gas concentration, but this effect is less significant hence. Therefore the combustible gas concentration in gasification products depends largely on water vapor concentration, the gasification temperature and oxygen concentration in vapor-air mixture fed into the coal bed.

Key words:

Coal, underground gasification, gasification products, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Ruban A.D. Podzemnaya gazifikatsiya uglya – novyy etap tekhnologicheskogo i investitsionnogo razvitiya [Underground coal gasification is a new stage of technological and investment-driven development]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2007, no. 2, pp. 288–300.
2. Zorya A.Yu., Kreyenin E.V. Mozhno li podzemnaya gazifikatsiya ugolnykh plastov stat promyshlennoy tekhnologiyey? [Is it possible for underground gasification of coal beds to become an industrial technique?]. *Ugol*, 2009, no. 2, pp. 50–53.
3. Zorya A.Yu., Kreyenin E.V. Usloviya prevrashcheniya podzemnoy gazifikatsii uglya v stabilnuyu i vysokoproizvoditelnuyu promyshlennuyu tekhnologiyu [Conditions for transforming underground coal gasification into a stable and high-performance industrial technique]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2009, no. 4, pp. 298–299.
4. Kondyrev B.I., Belov A.V. Opyt podzemnoy gazifikatsii uglya v kitayskoy narodnoy respublike [Experience of underground coal gasification in the People's Republic of China]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2005, no. 10, pp. 286–289.
5. Kondyrev B.I., Belov A.V., Mannangolov D.Sh. Razvitie tekhnologii podzemnoy gazifikatsii uglya. Perspektivy osvoeniya ugolnykh mestorozhdeniy Dalnego Vostoka [Development of underground coal gasification technique. Prospects of coal deposit development in the Far East]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2007, no. 1, pp. 297–300.
6. Kreyenin E.V. Podzemnaya gazifikatsiya uglya kak ekologicheskii chistaya tekhnologiya ego dobychi i ispolzovaniya [Underground coal gasification as environmentally appropriate technology of its extraction and use]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*, 2008, no. 4, pp. 256–262.
7. Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Akhmedov D.B. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 312 p.
8. Kamneva A.I., Platonov V.V. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii goryuchikh iskopaemykh* [Theoretical bases of chemical technique of fossil fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 288 p.
9. Kuznetsov G.V., Subbotin A.N. Teplomassopereenos v usloviyakh podzemnoy gazifikatsii uglya [Heat and mass transfer in underground coal gasification]. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2010, no. 9, pp. 422–426.
10. Subbotin A.N. O nekotorykh osobennostyakh rasprostraneniya podzemnogo pozhara [On some features of underground fire propagation]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2003, vol. 76, no. 5, pp. 159–165.
11. Grishin A.M., Zinchenko V.I., Efimov K.N., Subbotin A.N., Yakimov A.S. *Iteratsionno-interpolyatsionnyy metod i ego prilozheniya* [Iterated-interpolation method and its applications]. Tomsk, TGU Press, 2004. 319 p.
12. *Teplotekhnicheskyy spravochnik* [Heat engineering reference book]. Ed. by V.N. Yurenev, N.D. Lebedev. Moscow, Energiya Publ., 1976. Vol. 2, 896 p.
13. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Quick reference book of physical and mathematical variables]. Ed. by K.P. Mishhenko, A.A. Ravdel. Leningrad, Khimiya, 1967. 182 p.
14. Shchetinkov E.S. *Fizika goreniya gazov* [Physics of gaseous combustion]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 739 p.
15. Gagarin S.G., Golovin G.S., Polmaliev A.M. Veshchestvennyy sostav i reaktivnaya sposobnost fraktsiy uglya razlichnoy plotnosti [Material composition and reactivity of coal fractions with different density]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2006, no. 1, pp. 12–39.
16. Lashtvan I.I., Fameshin P.L., Dudarchik V.M., Kozhurin V.N., Anufrieva E.V. Piroliz burykh ugley Brinevskogo mestorozhdeniya respubliki Belarus [Pyrolysis of coals of Brinevskoe deposit in Belarus]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2009, no. 3, pp. 20–25.
17. Golubkovich A.V., Sister V.G., Porev I.A., Chizhikov A.G. Raschet piroliza rastitelnykh materialov v vysokom sloe [Estimation of pyrolysis of plant materials in a high level]. *Promyshlennaya energetika*, 2010, no. 1, pp. 53–55.
18. Konovalova Yu.V., Trifanov V.N., Gyulmaliev A.M., Gagarin S.G., Sultanguzin I.A. Kinetika termicheskoy destrukttsii komponentov ugolnoy shikhty [Kinetics of thermal destruction of coal charge components]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2004, no. 4, pp. 3–16.
19. Fedoseev S.D., Chernyshev A.B. *Polukoksovanie i gazifikatsiya tverdogo topliva* [Distillation and gasification of solid fuel]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1960. 326 p.
20. Kamneva A.I., Platonov V.V. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii goryuchikh iskopaemykh* [Theoretical bases of chemical technology of anthracites]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 288 p.

Received: 16 June 2014.