

*Ю.В. Луценко, к.т.н., доцент, зам. нач. кафедры, НУГЗУ,  
А.Я. Шаршанов, к. ф.-м. н., доцент, НУГЗУ,  
Е.А. Яровой, преподаватель, НУГЗУ*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ  
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ  
ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ  
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ ПОДЗЕМНОЙ  
ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**  
(представлено д-ром техн. наук Кривцовой В.И.)

Представлены результаты исследований по разработке математической модели процессов тепломассопереноса при подземной газификации угля.

**Ключевые слова:** предел распространения пламени, горючий газ, подземная газификация, уголь.

**Постановка проблемы.** Технология подземной газификации угля (ПГУ) – нетрадиционный способ разработки угольных месторождений, открывающий новые возможности в отработке угольных пластов со сложными горно-геологическими условиями залегания. Все технологические операции по газификации угольного пласта осуществляются с земной поверхности, без применения подземного труда работающих, а разработка месторождения происходит экологически приемлемым способом. 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, Австралии. Проявляется активный интерес к этой технологии в России и таких странах, как Индия, КНДР, Южная Корея 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 и при получении многокомпонентных горючих газов. 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, образования горючих газов с заданными характеристиками взрывопожаробезопасности при подземной газификации.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Как свидетельствует анализ научно-технической литературы [1-3], рядом авторов

предпринимались попытки разработать математические модели образования горючих газов при газификации твердых топлив. Однако вследствие влияния на процесс газообразования значительного количества технологичных и природных факторов известные математические модели несовершенны и их уточнение требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Постановка задачи и ее решение.** Задачей данного исследования является разработка математической модели, описывающей процессы тепломассопереноса при подземной газификации угля. При математическом моделировании рассмотрен угольный пласт глубиной  $H$ , в котором пробурена скважина и введена двойная труба. По внутренней трубе к нижнему основанию угольного пласта ( $z < h$ ) подается, подогретый до температуры  $T_0$  сухой или влажный воздух. По истечении некоторого времени угольный пласт прогревается до температуры начала пиролиза. Через отверстия на боковой поверхности наружной трубы ( $z > h$ ), образовавшиеся газы проникают в наружную трубу и выводятся из угольного пласта на поверхность (рис. 1).

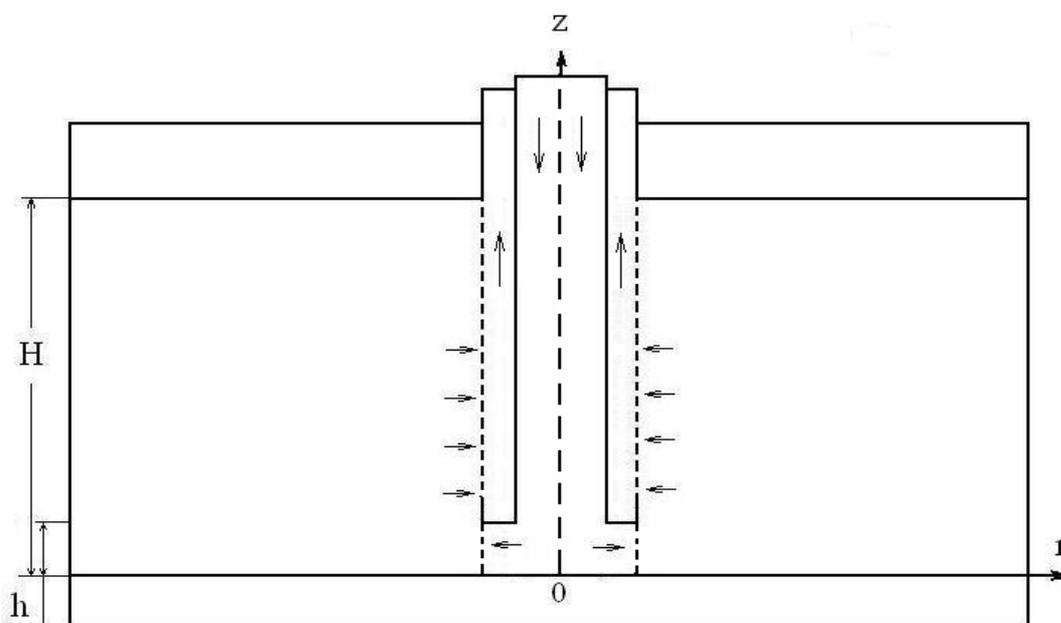
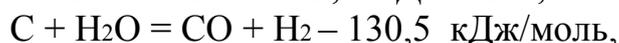
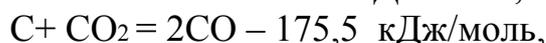
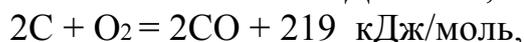
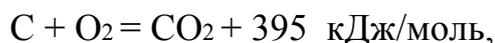
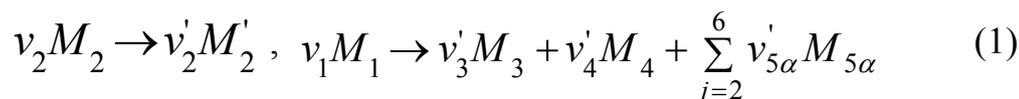
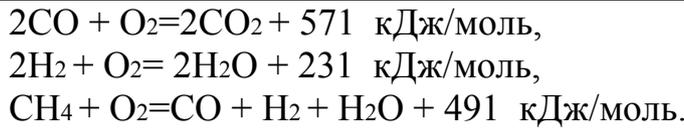


Рис. 1 – Схема подачи воздуха и отвода образующегося газа при ПГУ

В предлагаемой постановке принималось, что рассматриваемый процесс газификации сопровождается реакциями:





Первое выражение (1) описывает процесс испарения воды, второе – процесс пиролиза твердого топлива. Твердое топливо (уголь) разлагается на конденсированные  $v'_3 M_3$  (кокс),  $v'_4 M_4$  (шлак) и газообразные  $v'_{5\alpha} M_{5\alpha}$  продукты пиролиза.

При математическом моделировании ПГУ принимается, что в угольном пласте отсутствуют неоднородности, а условия тепло – и массообмена вдоль верхней и нижней поверхности пласта не изменяются. Задача решена в цилиндрической системе координат. Система координат выбиралась так, как показано на рис. 1. С учетом процессов испарения влаги, разложения угля (1), гетерогенных и гомогенных реакций система уравнений, моделирующая процесс ПГУ, будет иметь вид (2)–(7).

$$\begin{aligned} \rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} &= -R_p, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \\ \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} &= \alpha_c R_p - R_{3s}, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_s R_t \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 u) + \\ \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 V) &= \alpha_g R_p + R_{2s} + R_{2s} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5 C_j) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 u C_j) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 V C_j) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\bar{r} \rho_5 \varphi_5 D_j \frac{\partial C_j}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 D_j \frac{\partial C_j}{\partial z}) + R_{5j} + R_{5js} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^5 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_5 \varphi_5 C_{ps} (u \frac{\partial T}{\partial r} + V \frac{\partial T}{\partial z}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\bar{r} \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \\ \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + q_p \rho_1 R_p - q_{2s} \rho_2 R_{2s} + q_{3s} \rho_3 R_{3s} + q_{CO} R_{CO} \\ + q_{H_2} R_{H_2} + q_{CH_4} R_{CH_4} \end{aligned} \quad (5)$$

$$u = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad v = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial z} - \rho_5 g \right) \quad (6)$$

$$p = \frac{\rho_5 RT}{M}, \quad M = \frac{1}{\sum_{j=1}^7 \frac{c_j}{M_{5j}}}, \quad \sum_{j=1}^7 c_j = 1, \quad \sum_{i=1}^5 \varphi_i = 1 \quad (7)$$

Система уравнений (2)–(7) решалась при краевых условиях

$$t=0: \quad \varphi_j = \varphi_{jH}, \quad j = \overline{1,4}, \quad j = \overline{1,4}, \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad \alpha = \overline{1,6}, \quad (8)$$

$$\rho_5 = \rho_{5H}, \quad T|_{z \leq h} = T_0, \quad T|_{z > h} = T_H, \quad T|_{r > R_0} = T_H;$$

$$r = R_0, z > h: \quad \frac{\partial^2 c_\alpha}{\partial r^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0;$$

$$r = R_0, z \leq h: \quad c_\alpha = c_{\alpha 0}, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_0), \quad p = p_0;$$

$$r = L: \quad c_\alpha = c_{\alpha H}, \quad T = T_H; \quad p = p_H; \quad (9)$$

$$z = 0: \quad \frac{\partial p}{\partial z} = \rho_5 g, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_1(T - T_1);$$

$$z = H: \quad \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho_5 g, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \quad \lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2(T - T_2). \quad (10)$$

На рис.2 приведены профили массовой концентрации оксида углерода при подаче паровоздушной смеси с разной массовой концентрацией кислорода (рис. 2а,  $c_{10}=0,1$ ; рис.2б,  $c_{10}=0,15$ ).

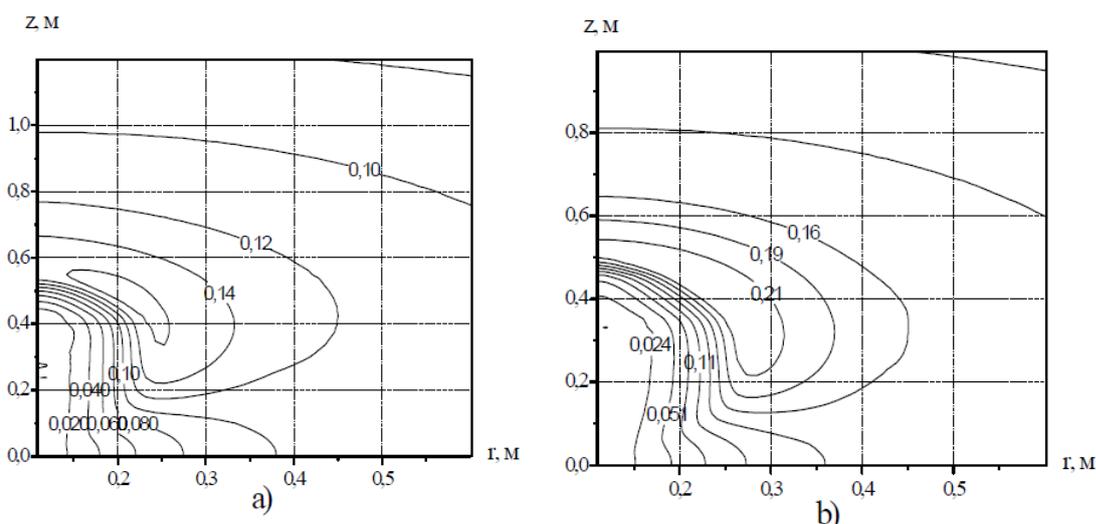


Рис. 2 – Распределение массовой концентрации оксида углерода в угольном пласте при ПГУ

Таким образом, увеличение на 50% концентрации кислорода привело к увеличению на 50% концентрации горючего газа – оксида углерода в продуктах газификации. Были проведены расчеты с увеличенным в два раза перепадом давления в зоне зажигания, которые показали, что в результате этого на выходе увеличивается концентрация горючего газа на 23%.

**Выводы.** Сформулирована математическая модель, описывающая процессы тепломассопереноса при подземной газификации угля. Результаты проведенного теоретического анализа дают основание утверждать, что, задавая температуру и состав паровоздушной смеси, подаваемой в угольный пласт, можно регулировать состав газов, область воспламенения многокомпонентных горючих газов, поля температуры, давления и скорости фильтрации газообразных продуктов в области газификации угольного пласта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Субботин А.Н. Моделирование высокотемпературных процессов тепломассопереноса при физико-химических превращениях в пористых коксующихся материалах // Пожарная безопасность. – 2008. – № 3. – С. 67–73.

2. Е.В.Крейнин, Е.И.Шифрин Математическая модель процессов горения и газификации угля в канале подземного газогенератора//ФГВ. 1993, №5 С. 21-28.

3. Шаршанов А.Я., Луценко Ю.В., Олейник В.В., Шульга И.В. Математическая модель процесса газификации углей в газогенераторах // УглеХимический журнал. 2001, № 3-4 С. 33-40.

nuczu.edu.ua

Ю.В. Луценко, А.Я. Шаршанов, Є.А. Яровий

**Математична модель процесів тепломасопереносу і фізико-хімічних перетворень при отриманні багатоконпонентних горючих газів підземної газифікації твердого палива**

Представлені результати досліджень по розробці математичної моделі процесів тепломасопереносу при підземної газифікації вугілля

**Ключові слова:** межа поширення полум'я, горючий газ, підземна газифікація вугілля, вугілля.

U.V. Lutsenko, A.Y. Sharshanov, E.A. Yarovoy

**Mathematical model of heat and mass transfer and physico-chemical transformations on receipt multicomponent gasses underground gasification of solid fuels**

The results of research on the development of mathematical models of heat and mass transfer during underground coal gasification

**Keywords:** limit of distribution of flame, combustible gas, underground gasification, coal.