

*Луценко Ю.В., канд. техн. наук, доцент, нач. каф. ПЧСНП, УЦЗУ,
Яровой Е.А., преподаватель, УЦЗУ*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И ОБЛАСТИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ГАЗОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ

Приведена интегральная математическая модель образования горючих газов при подземной газификации угля (ПГУ), позволяющая оценивать состав и степень пожаровзрывоопасности получаемых газов.

Актуальность проблемы. Как показывает опыт ряда стран (США, Германия, Япония, Финляндия и др.) одним из наиболее эффективных путей выхода из энергетического кризиса может быть развитие технологии газификации твердых горючих материалов (уголь, торф, горючие сланцы, древесные отходы и т.д.) и получение заменителей природного газа, нефтепродуктов и химического сырья на основе генераторных газов. По оценкам специалистов в настоящее время запасы угля в Украине, пригодного для подземной газификации, составляют 24 млрд. тонн.

В ведущих проектных и научно-исследовательских институтах Украины (ГИПРОКОКС, УХИН, ГИАП и др.) изучаются вопросы, связанные с разработкой новых и внедрением известных технологий подземной газификации низкосортных углей, однако свойства получаемых горючих газов с точки зрения пожаровзрывоопасности при их производстве и применении изучены недостаточно.

Анализ последних исследований и публикаций. Основным процессом подземной газификации угля - образование горючих газов. Изучение этого процесса в научно-технической литературе преимущественно ограничивается перечнем возможных химических реакций [1,2]. Вместе с тем известны методы расчета состава газа при газификации угля в наземных газогенераторах, например методики Доброхотова, Грум-Гржимайло [3] или более современная методика [4].

Для описания процесса газообразования при ПГУ они мало пригодны в связи с тем, что базируются на практических данных и заданном распределении отдельных элементов топлива между составными частями генератора газа или предполагают известными термодинамические условия газообразования. При ПГУ последние отличаются существенной неоднородностью и главным образом неопределенностью, пути преодоления которой в настоящее время неизвестны.

Постановка задачи и ее решение. Задачей исследования является разработка математической модели процесса ПГУ, позволяющей прогнозировать компонентный состав и пожаровзрывоопасность образующихся газов. На основе анализа данных о работе подземных газогенераторов закрытых станций «Подземгаз», обобщения

многочисленных исследований в области газообразования при газификации угля и его сжигании предложена новая гипотеза, которая заключается в следующем. Поступающее в канал газификации дутье трансформируется в совокупность рабочих, дожигающих и балластных потоков. К первым относятся потоки дутья, кислород которых выгорает в гетерогенной реакции с углеродом, образуя диоксид углерода, ко вторым - те из них, кислород которых расходуется на гомогенные реакции горения преимущественно водорода (в случае «недостатка» водяного пара) или оксида углерода (в случае «избытка» водяного пара), а также и продуктов пиролиза, когда имеет место дополнительное дожигание (при различных переходных процессах), к третьим – непрореагировавшее дутье, доля которого велика при подземном сжигании угля по технологии «Углегаз».

Выделяющаяся при выгорании кислорода рабочих и дожигающих потоков дутья, а также поступающая с ними из массива тепловая энергия частично расходуется на разложение водяного пара и пиролиз угля, которые обогащают исходный поток горючими компонентами, в последующем частично выгорающими. Модели, соответствующие известной и новой гипотезам газообразования при ПГУ, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Модели газообразования

№	Реакция процесса	Тепловой эффект реакции (усл. обозн.)	Математическое выражение мольных долей реакции (на 1 моль выгоревшего кислорода дутья)	
			известная гипотеза	новая гипотеза
1	$C + O_2 = CO_2$	q_1	1	α_1
2	$C + CO_2 = 2 CO$	q_2	$\alpha_0 d$	-
3	$C + H_2O = CO + H_2$	q_3	k_η	$\eta_1 \{k\alpha_1 + (1-\alpha_1)[k_1 d + k_2(1-d)]\}$
4	$2CO + O_2 = 2CO_2$	q_4	-	$(1-\alpha_1)(1-d)$
5	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	q_5	-	$(1-\alpha_1) d$
6	$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$	q_6	$\alpha_0 \delta(1-d)$	-
7	$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	q_7	$\alpha_0 (1-d)$	-
8	$O_2 = O_2$	0	$(1-\delta)$	$1/\beta - 1$
9	-	0	-	λ/β
10	Сорбция - десорбция CO_2	-	-	$\pm n^{c-d}$
11	Дегазация пласта от CH_4	-	-	$n^{cb}_{CH_4}$
12	Пиролиз угля	-	$\{n_x\}$	$\{n_x\}$

Примечание. $k = 0,5 q_1 / q_3$; $k_1 = q_5/q_3$; $k_2 = q_4/q_3$; $d=0$ при избытке водяного пара, $d=1$ при его недостатке; $0 \leq \delta \leq 1$, δ - случайная величина, $\lambda = C_{N_2}^D / C_{O_2}^D$, где $C_{N_2}^D$, $C_{O_2}^D$ - концентрация азота и кислорода в дутье, %; β - доля выгоревшего кислорода дутья; n^{c-d} , $n_{CH_4}^{cb}$, n_x - вклад сорбции-десорбции CO_2 , дегазации пласта и пиролиза по x-компонентам (CH_4 , O_2 , H_2 ... сотов

Вклад газообразных продуктов пиролиза в формировании газового потока определяется по методике Доброхотова, при этом исходят из предположения о существовании динамического равновесия между пиролизом угля и выгазовыванием углерода в реакциях с кислородом и водяным паром.

Полученные математические выражения имеют следующий вид:

$$n_{CH_4}^{\Pi} = \frac{\alpha_{CH_4} H^r [(1 + k\eta)(1 - \alpha) + \alpha\eta(k_1 d + k_2)]}{C^r / 3 - H^r (\alpha_{CH_4} + \alpha_{C_n H_m}) - 0,25 O^r (\alpha_{CO} + 0,5 \alpha_{CO_2})}, \quad (1)$$

$$n_{H_2}^{\Pi} = \left[2H^r (1 - \alpha_{CH_4} - \alpha_{C_n H_m}) - 0,25 (\alpha_{H_2O} O^r + 0,5 \alpha_{H_2S} S^r) \right] \frac{n_{CH_4}}{\alpha_{CH_4} H^r}, \quad (2)$$

$$n_{C_n H_m} = \alpha_{C_n H_m} n_{CH_4} \alpha_{CH_4}, \quad (3)$$

$$n_{CO_2}^{\Pi} = \alpha_{CO_2} O^r n_{CH_4} / (8 \alpha_{CH_4} H^r), \quad (4)$$

$$n_{CO}^{\Pi} = \alpha_{CO} O^r n_{CH_4} / (4 \alpha_{CH_4} H^r), \quad (5)$$

$$n_C^{\Pi} = \alpha_{O_2} O^r n_{CH_4} / (8 \alpha_{CH_4} H^r), \quad (6)$$

$$n_{N_2}^{\Pi} = N^r n_{CH_4} / (7 \alpha_{CH_4} H^r), \quad (7)$$

где $\alpha_{CH_4}, \alpha_{C_n H_m}$ - доля водорода угля, вошедшего соответственно в состав пиролизных метана и прочих газообразных углеводородов;

$\alpha_{CO}, \alpha_{CO_2}, \alpha_{H_2O}, \alpha_{O_2}$ - доля кислорода угля, израсходованного на образование оксида и диоксида углерода, воды и молекулярного кислорода соответственно;

α_{H_2S} - доля содержащейся в угле серы, перешедшей в сероводород;

H^r, C^r, O^r, S^r, N^r - содержание основных компонентов элементного состава угля на рабочую массу, %.

При медленном нагревании угля преобладающая часть содержащегося в нем кислорода связывается водородом и переходит в воду [3], поэтому вкладом пиролизных оксида и диоксида углерода, а также молекулярного кислорода можно пренебречь. Кроме того, расчеты показали, что концентрация пиролизного азота более чем на два порядка ниже концентрации атмосферного азота в газе ПГУ, поэтому его также можно не учитывать.

Приведенная выше совокупность уравнений достаточна для перехода к математическим выражениям, описывающим состав газа ПГУ. Формулы для расчета имеют следующий вид (%):

$$C_{H_2} = \frac{100}{Y} [\alpha_0 \eta_1 (k_1 d + k_2) + k \eta_1 (1 - \alpha_0) - 2\alpha_0 d + n_{H_2}^{\Pi}] \quad (8)$$

$$C_{CO} = \frac{100}{Y} [\alpha_0 \eta_1 (k_1 d + k_2) + k \eta_1 (1 - \alpha_0) - 2\alpha_0 (1 - d)], \quad (9)$$

$$C_{CO_2} = \frac{100}{Y} (1 + \alpha_0 - 2\alpha_0 + n^{CO_2}), \quad (10)$$

$$C_{N_2} = \frac{100}{Y} (C_{N_2}^{\partial} / (\beta_1 C_{O_2}^{\partial}) + n_{N_2}^{\Pi}), \quad (11)$$

$$C_{O_2} = \frac{100}{Y} \left(\frac{1}{\beta_1} - 1 \right), \quad (12)$$

$$C_{CH_4} = \frac{100}{Y} (n_{CH_4}^{\Pi} + n_{CH_4}^{CG}), \quad (13)$$

$$C_{H_2S} = \frac{100}{Y} n_{H_2S}, \quad C_{C_nH_m} = \frac{100}{Y} n_{C_nH_m}, \quad (14)$$

$$Y = 100 / (\beta_1 C_{O_2}^{\partial}) - \alpha(1 + 2d) + 2k \eta_1 (1 - \alpha_1) + 2\alpha_1 \eta_1 (k_1 d + k_2) + n_{CH_4}^{CG} + n^{CO_2} + n_{CH_4}^{\Pi} + n_{H_2}^{\Pi} + n_{C_nH_m} + n_{N_2} + n_{H_2S}, \quad (15)$$

где β_1 - доля дутьевого потока, кислород которого выгорел в подземном газогенераторе. При ПГУ $\beta \approx 1$, при подземном сжигании угля по технологии "Углегаз" сильно отличается от 1; Y - выход газа ПГУ на единицу объема кислорода дутья.

Для определения области воспламенения генераторных газов целесообразно применить следующие выражения [5]:

$$\varphi_n = 100 / (1 + v_{\partial}), \quad (16)$$

где v_{∂} — число молей воздуха, приходящееся на 1 моль исходной смеси, определяют по формуле

$$v_{\partial} = \sum_{k=1}^n \varphi_k / \varphi_{нк} - 0,01 \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k + \sum_{j=1}^m \varphi_j \cdot C_j \right), \quad (17)$$

где $\varphi_{нк}$ — нижний предел распространения пламени k -го горючего

компонента, % об.;

φ_j — концентрация j -го негорючего компонента, % об.;

C_j — коэффициент j -го негорючего компонента;

m — число негорючих компонентов смеси.

$$\varphi_{\text{в}} = \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k + \sum_{j=1}^m \varphi_j \right) / \left(\sum_{k=1}^n \frac{\varphi_k}{\varphi_{\text{в}k}} + \sum_{j=1}^m \frac{\varphi_j}{\varphi_{\text{в}j}} \right) \quad (18)$$

где $\varphi_{\text{в}k}$ — верхний предел распространения пламени для бинарной смеси k -го горючего компонента с воздухом, % об.;

$\varphi'_{\text{в}j}$ — верхний условный предел распространения пламени j -го негорючего компонента

$$\varphi_{\text{см}}^0 = \frac{100\varphi_{\text{пр}}^0 \left(1 + \frac{\varphi_{\text{нг}}^0}{100 - \varphi_{\text{нг}}^0} \right)}{100 + \frac{\varphi_{\text{пр}}^0}{100 - \varphi_{\text{нг}}^0}}, \quad (19)$$

где $\varphi_{\text{см}}^0$ - пересчитанные концентрационные пределы с учетом наличия негорючих примесей;

$\varphi_{\text{пр}}^0$ - расчетные концентрационные пределы без учета примеси негорючих газов;

$\varphi_{\text{нг}}^0$ - суммарная концентрация всех негорючих газов и паров.

Выводы. Как видно из приведенных формул, для расчета состава сухого газа ПГУ при известном составе дутья и угля достаточно отыскать α_0 , η и d , чтобы найти содержание каждого компонента. Было обнаружено, что α_0 определяется как абсолютное значение расчетной величины. Знак (плюс или минус) этой расчетной величины однозначно свидетельствует о значении d (ноль или единица). Следовательно, достаточно знать концентрации двух любых компонентов сухого газа, чтобы, решая два уравнения с двумя неизвестными, рассчитать полный состав газа а также область его воспламенения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скафа П.Р. Подземная газификация углей. М.: Госгортехиздат, 1960, 320 с.
2. Хоффман Е. Энерготехническое использование угля (Пер. с англ.). М.: Энергоатомиздат, 1983. 328с.
3. Бесков С.Д. Технологические расчеты. М.: Высш.шк., 1966, 250с.
4. Федосеев С.Д.// Химия твердого топлива. 1987, №5. С.91-105.
5. ГОСТ 12.1.044-89 Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов