

воздухом. Такую водовоздушную пену разрушали фронтально потоком горячих продуктов сгорания, полученных от газовой горелки, регистрируя скорость разрушения пены в зависимости от ее кратности. Полученная зависимость оказалась аналогичной зависимости  $S(K)$  (рис. 4): она немонотонна, причем минимум в зависимости скорости разрушения пены наблюдался при той же кратности, что и при горении пены.

Эти эксперименты убеждают в том, что закономерности горения пены определяются не химическими реакциями, а процессом теплового разрушения пены.

Скорость теплового разрушения пены должна определяться не только прочностными характеристиками пены, такими, как толщина пленок, но и тепловым потоком в пену от сгоревшего газа, зависящим от теплопотерь. При разрушении пены большая часть содержащейся в ней жидкости диспергируется. Поток горячего газа, разрушающего пену, может эффективно охлаждаться каплями диспергированной жидкости. Согласно [2], средний размер капель, получающихся при разрушении пены, растет с повышением кратности. В некотором диапазоне  $K$  это может привести к уменьшению удельной поверхности аэрозоля, образующегося при разрушении пены и как следствие, к уменьшению охлаждения продуктов сгорания и увеличению скорости горения. Проверка этой гипотезы требует дальнейших исследований горения пен, в частности, исследований диспергирования пен в процессе горения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамзон А. А. Поверхностно-активные вещества.— Л.: Химия, 1981.
2. Burgoyne J. H., Steel A. J. Flammability of methane-air mixtures in water-base foams // Fire Research Abstracts and Reviews.— 1962.— 4, N 1.— P. 2.
3. Цап В. Н., Шароварников А. Ф., Корольченко А. Я. и др. Влияние структуры пен на горючесть газа-наполнителя // Коллоидный журнал.— 1982.— № 2.— С. 384.
4. Замашников В. В., Бабкин В. С., Тихомолов Е. М. и др. Экспериментальные исследования горения водогорючих пен // ФГВ.— 1988.— 24, № 4.— С. 35.
5. Замашников В. В., Какуткина Н. А., Плещов А. А. и др. Закономерности горения водогорючих пен при повышенных давлениях // Проблемы горения и взрыва: Материалы 9 Всесоюз. симп. по горению и взрыву, 1989.— С. 62.
6. Segev G., Hasson A., Siman M. et al. Detonation waves through foam // Abstracts of 22th Symp. (Int.) on Combust.— 1988.— P. 56.
7. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения.— М.: Химия, 1975.
8. Замашников В. В., Какуткина Н. А. Структурные изменения в пене под действием звука // Коллоидный журнал.— 1992.— 54, № 2.— С. 64.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 10/VI 1992

УДК 622.278

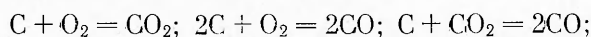
*Е. В. Крейнин, Е. И. Шифрин*

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В КАНАЛЕ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

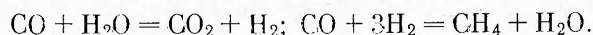
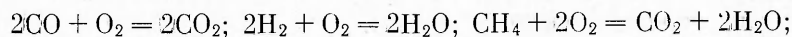
Рассматриваются горение и газификация угля в канале подземного газогенератора на той стадии, когда процесс можно приближенно считать установившимся. Размеры канала (площадь сечения, доли поверхности, занимаемые углем и породами) предполагаются известными и определяются процессами обрушения горного массива. Также известным предполагается водопиток в канал газификации. Задача заключается в том, чтобы по составу дутья, его расходу, температуре и давлению на входе в канал определить изменение этих характеристик вдоль канала, в том числе на выходе из него. Разработана математическая модель рассматриваемого процесса. Составлена программа для ЭВМ, реализующая разработанную модель. Проведены расчеты, иллюстрирующие соответствие модели исследуемому процессу.

© Е. В. Крейнин, Е. И. Шифрин, 1993.

Математически процесс газификации описывается системой уравнений, включающих в себя уравнения сохранения вещества и энергии в газовой фазе, сохранения энергии в угольной стенке, движения для газового потока, состояния для идеального газа, а также уравнения химических реакций и их кинетические характеристики. Детальный перечень химических реакций, рассматриваемых при исследовании процессов подземной газификации углей, имеет следующий вид: реакции, происходящие на угольной стенке:



и реакции, происходящие в газовой фазе:



В модели учитывается семь различных компонентов газовой смеси  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ . Поток газа вдоль канала предполагается турбулентным. Считается также, что в сечении, перпендикулярном оси канала, газ достаточно хорошо перемешан: в ядре потока концентрации компонентов газовой смеси, температура, скорость потока и давление постоянны.

Обозначим переменную вдоль оси канала через  $x$  (м), площадь сечения  $S$  (м<sup>2</sup>), длину контура, занимаемого углем  $l_y$  (м), и длину контура, занимаемого горными породами  $l_n$  (м). Уравнения сохранения вещества в предположении стационарности процесса имеют вид

$$\frac{d(v(x) c_i(x))}{dx} = \sum_j R_{ij} + \sum_m R'_{im} l_y/S + k_i l_y/S \quad (i = 1, \dots, 7). \quad (4)$$

Здесь  $v(x)$  — скорость потока вдоль оси канала (м/с);  $c_i(x)$  — концентрация  $i$ -го компонента газа в сечении  $x$  (кмоль/м<sup>3</sup>);  $R_{ij}$  — скорость образования (поглощения)  $i$ -го вещества в  $j$ -й реакции в газовой фазе (кмоль/(м<sup>3</sup>·с));  $R'_{im}$  — скорость образования (поглощения)  $i$ -го вещества в  $m$ -й реакции на поверхности угольной стенки (кмоль/(м<sup>2</sup>·с));  $k_i$  — поток  $i$ -го газа пиролиза через угольную стенку или приток водяного пара в случае, когда индекс  $i$  соответствует  $H_2O$  (кмоль/(м<sup>2</sup>·с)).

Уравнение состояния идеального газа имеет вид

$$p(x) = \left( \sum_{i=1}^7 c_i(x) \right) RT_g(x), \quad (2)$$

где  $p(x)$  — давление в сечении  $x$  (кПа);  $R$  — универсальная газовая постоянная (8,3144 кДж/(кмоль·К));  $T_g(x)$  — температура газа в ядре потока в сечении  $x$  (К).

Связь скорости потока с давлением описывается уравнениями Навье — Стокса. Согласно сделанным предположениям, пренебрегая трением между газовым потоком и стенками канала, получим

$$v(x) \sum_{i=1}^7 M_i \frac{d(c_i v)}{dx} = -1000 \frac{dp}{dx}, \quad (3)$$

$M_i$  — молекулярный вес  $i$ -го вещества.

Уравнение энергетического баланса в канале газификации имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d \left( \sum_{i=1}^7 c_i v C_{pi} T_g \right)}{dx} = & \sum_j q_j R_j + \alpha (T_y - T_g) l_y/S + \alpha (T_s - T_g) l_n/S + \\ & + \sum_{i,m} R'_{im} C_{pi} T_y l_y/S + \sum_{i=1}^7 k_i C_{pi} T_y l_y/S + rad_g. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $C_{pi}$  — молярная теплоемкость  $i$ -го газа (кДж/(кмоль · К));  $q_j$  — тепловой эффект  $j$ -й реакции в газовой фазе (кДж/кмоль);  $R_j$  — скорость  $j$ -й реакции в газовой фазе (кмоль/(м<sup>3</sup> · с));  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена между газом и углем и газом и горными породами (кДж/(м<sup>2</sup> · К · с));  $T_y$ ,  $T_s$  — температуры угля и инертной поверхности канала соответственно (К);  $\text{rad}_g$  — количество лучистой энергии, получаемой (отдаваемой) от стенок канала.

К выражениям (1) — (4) следует добавить уравнение теплового баланса в угле. Учитывая, что горение происходит в тонком слое угля, можно пренебречь кондуктивной передачей тепла в плоскости, касательной к поверхности угля. В результате уравнение энергетического баланса становится алгебраическим:

$$\sum_m q'_m R'_m = \alpha (T_y - T_g) + \sum_{i,m} R'_m C_{pi} T_y + \text{rad}_y + W_*, \quad (5)$$

где  $q'_m$  — тепловой эффект  $m$ -й реакции на угольной стенке (кДж/кмоль);  $R'_m$  — скорость  $m$ -й реакции на угольной стенке (кмоль/(м<sup>2</sup> · с));  $\text{rad}_y$  учитывает лучистый теплообмен;  $W_*$  — член, учитывающий кондуктивную передачу тепла в направлении, перпендикулярном поверхности канала. Значение  $W_*$  определяется из решения автомодельной задачи.

В силу принятого условия стационарности, уравнение теплового баланса в породном массиве не рассматривается. В приведенных ниже расчетах приближенно принято  $T_s(x) - T_g(x)$ .

Естественными граничными условиями для (1) — (5) являются параметры дутья, подаваемого на вход в канал (в точке  $x = 0$ ), т. е. значения  $p(0)$ ,  $v(0)$ ,  $T_g(0)$ ,  $c_i(0)$  ( $i = 1, \dots, 7$ ). Выражения для теплоемкостей  $C_{pi}$  брались из [1] с учетом их зависимостей от температуры. Величины тепловых эффектов реакций при температуре 298 К взяты из [2]. Зависимости тепловых эффектов реакций от температуры учитывались в соответствии с [1]

$$q(T) = q(T_0) + \sum' v_i \int_{T_0}^T C_{pi} dT - \sum'' v_i \int_{T_0}^T C_{pi} dT,$$

где  $v_i$  — стехиометрические коэффициенты реакции;  $q(T)$  — тепловой эффект реакции при температуре  $T$ ;  $T_0$  — температура, при которой тепловой эффект реакции задан (в нашем случае  $T_0 = 298$  К);  $\Sigma'$  — суммирование по участвующим в реакции веществам;  $\Sigma''$  — суммирование по веществам, получающимся в результате реакции.

Коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  рассчитывался в каждом сечении по формуле, отвечающей турбулентному течению в трубе:

$$\alpha = \lambda 0,022 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} / d_{eff},$$

$\lambda$  — теплопроводность газовой смеси;  $d_{eff}$  — эффективный диаметр сечения канала ( $d_{eff} = 4S / (l_y + l_n)$ );  $\text{Re}$  — число Рейнольдса;  $\text{Pr}$  — число Прандтля.

Теплопроводности составляющих газовой смеси брались зависящими от температуры в соответствии с [3]. Теплопроводность смеси вычислялась по формуле [4]

$$\lambda = \left( \sum_{i=1}^7 y_i \lambda_i M_i^{1/3} \right) / \left( \sum_{i=1}^7 y_i M_i^{1/3} \right),$$

$\lambda_i$  — теплопроводность компонент газа (кВт/(м · К));  $y_i$  — объемная доля  $i$ -го газа в смеси.

Вычисления  $\text{Re} = v d_{eff} \cdot \rho / \mu$  и  $\text{Pr} = \left( \sum_{i=1}^7 C_{pi} z_i \right) \mu / (\rho \lambda)$  включают в себя расчеты величин плотности газа  $\rho = \sum_{i=1}^7 c_i M_i$  (кг/м<sup>3</sup>) и динамической вязкости газа  $\mu$  (Па · с). Вязкости компонентов газовой смеси вычисля-

лись по формуле Сезерленда

$$\mu_i(T) = \mu_i(T_*) \left( \frac{T_* + Z_i}{T + Z_i} \right) \left( \frac{T}{T_*} \right)^{3/2},$$

где  $\mu_i(T_*)$ ,  $\mu_i(T)$  — динамические вязкости газа при температурах  $T_*$  и  $T$  соответственно;  $Z_i$  — константы Сезерленда. Значения  $Z_i$  и  $\mu_i(T_*)$  при  $T_* = 573$  К взяты из [5]. Вязкость смеси газов вычислялась по формуле [6]

$$\mu = \left( \sum_{i=1}^7 y_i \mu_i M_i^{0,5} \right) / \left( \sum_{i=1}^7 y_i M_i^{0,5} \right).$$

Потоки лучистой энергии подсчитывались в соответствии с известными законами обмена лучистой энергией между потоком газа и стенками канала [7]

$$\text{rad}_g = (\epsilon_w + 1) \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} (\epsilon_g(T_y) (T_y/100)^4 - \epsilon_g(T_g) (T_g/100)^4) l_y/S,$$

$\epsilon_w$  — степень черноты стенки;  $\epsilon_g(T)$  — степень черноты газа при температуре  $T$ .

Излучательная способность газа приближенно представлялась в виде  $\epsilon_g(T) = \epsilon_{\text{CO}_2}(T) + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}(T)$ , где  $\epsilon_{\text{CO}_2}(T)$  — излучательная способность  $\text{CO}_2$ , содержащегося в газе, а  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}(T)$  — излучательная способность  $\text{H}_2\text{O}$ . Значения  $\epsilon_{\text{CO}_2}(T)$  и  $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}(T)$  подсчитывались по формулам, аппроксимирующим представленные в графической форме данные [8].

Аналогично для  $\text{rad}_y$  взято выражение

$$\text{rad}_y = (\epsilon_w + 1) \cdot 2,85 \cdot 10^{-3} (\epsilon_g(T_y) (T_y/100)^4 - \epsilon_g(T_g) (T_g/100)^4) + kE,$$

где  $E$  — количество лучистой энергии, выделяемой из угольной стенки и не поглощенной газом;  $k$  — некоторый коэффициент, указывающий долю этой энергии, уходящей на прогрев инертной поверхности канала. В приведенных ниже расчетах принято

$$k = \begin{cases} l_n/(l_n + l_y) & \text{при } T_y > T_g, \\ 0 & \text{при } T_y < T_g. \end{cases}$$

Как отмечалось выше, величина  $W_*$  кондуктивно передаваемого тепла в направлении, перпендикулярном поверхности канала, определялась из решения автомоделной задачи о продвижении угольной стенки. Уравнение теплопроводности в угольной стенке в простейших предположениях имеет вид

$$\lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho_y C_y \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

где  $\lambda_y$ ,  $\rho_y$ ,  $C_y$  — теплопроводность, плотность и теплоемкость угля; для простоты величины  $\lambda_y$ ,  $\rho_y$ ,  $C_y$  предполагаются постоянными. Из условия автомоделности имеем

$$T(t, x) = T(x - ut), \quad (7)$$

$u$  — скорость продвижения угольной стенки. С учетом (7) уравнение (6) приобретает вид

$$\lambda_y T''(s) = -\rho_y C_y u T'(s). \quad (8)$$

Из (8) следует

$$T(s) = C_1 + C_2 \exp(-\rho_y C_y u \cdot s / \lambda_y). \quad (9)$$

Воспользовавшись условием, что на бесконечности температура угля становится равной температуре пород на данной глубине  $T_n$ , получим  $T(\infty) = C_1 = T_n$ . Поскольку на поверхности ( $s = 0$ )  $T = T_y$ , из (9) следует  $C_2 = T_y - T_n$ . Таким образом,

$$T(s) = T_n + (T_y - T_n) \exp(-\rho_y C_y u \cdot s / \lambda_y), \quad (10)$$

откуда получаем

$$W_* = -\lambda_y dT(0)/ds = \rho_y C_y u (T_y - T_n).$$

Скорость продвижения угольной стенки рассчитывается в каждой точке по скорости потребления углерода на стенке в результате химических реакций  $u = \left( \sum_j R'_{cj} \right) \cdot 12 / (\rho_y d_c)$ ,  $R'_{cj}$  — скорость потребления углерода в  $j$ -й реакции на угольной стенке (кмоль/(м<sup>2</sup>·с));  $d_c$  — доля углерода в сухом угле. В приведенных ниже расчетах взято  $d_c = 0,82$ .

Величина  $C_y$  подсчитывалась по формуле [9]

$$C_y = \begin{cases} 0,91116 + 0,001417 T_y & \text{при } T_y < 598 \text{ К,} \\ 2,14618 - 0,0006483 T_y & \text{при } T_y > 598 \text{ К.} \end{cases}$$

Скорости газофазных реакций взяты из литературы. Для реакции  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ , согласно [10],

$$-\frac{d[\text{CO}]}{dt} = 1,04 \cdot 10^{12} y_{\text{CO}} y_{\text{O}_2}^{0,25} y_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} T_g^{-2,5} \exp(-16105/T_g) \\ \text{при } y_{\text{O}_2} > 0,05,$$

$$-\frac{d[\text{CO}]}{dt} = 9,84 \cdot 10^{12} y_{\text{CO}} y_{\text{O}_2} y_{\text{H}_2\text{O}}^{0,5} T_g^{-2,5} \exp(-16105/T_g) \\ \text{при } y_{\text{O}_2} < 0,05.$$

Здесь и ниже квадратные скобки обозначают молярную концентрацию соответствующих веществ (кмоль/м<sup>3</sup>),  $y$  с индексами, как и выше, соответствует объемной доле указанного вещества в газовой смеси.

При реакции  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ , согласно [11], принято

$$-\frac{d[\text{H}_2]}{dt} = 1,08 \cdot 10^{13} [\text{O}_2] [\text{H}_2] \exp(-15098/T_g).$$

Для скорости реакции  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$  использованы следующие выражения: при температурах  $T_g > 1200$  К, согласно [10], принято

$$-\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = 7 \cdot 10^9 p T_g^{-1} y_{\text{CH}_4}^{-0,5} y_{\text{O}_2}^{1,5} \exp(-30196/T_g),$$

при  $T_g < 1200$  К [12]

$$-\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = 0,407 \cdot 10^{13} p^{-1} [\text{CH}_4] [\text{O}_2] \exp(-15700/T_g).$$

Скорость реакции  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$  взята из [13]

$$-\frac{d[\text{CO}]}{dt} = 575 R T_g ([\text{CO}] - [\text{CO}]_{eq}) (0,5 - p \cdot 10^{-4} / 253) \exp(-13971/T_g).$$

Скорость реакции  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$  также взята из [13]

$$-\frac{d[\text{CH}_4]}{dt} = 312 [\text{CH}_4] \exp(-15098/T_g).$$

Скорости гетерогенных реакций записаны в виде, принятом в работе [14]. При реагировании  $i$ -го вещества с углеродом

$$R'_m = \frac{dG_i}{dt} = A_m(T_y) (c_i - c_{i,eq}),$$

где  $dG_i/dt$  — количество  $i$ -го газа, потребляемого на угольной стенке площадью 1 м<sup>2</sup> в  $m$ -й реакции;  $c_{i,eq}$  — равновесная для данной реакции концентрация  $i$ -го газа (кмоль/м<sup>3</sup>);  $A_m(T_y)$  — приведенная константа скорости реакции (м/с).

Величина  $A_m(T_y)$  вычисляется по формуле [15]:

$$\frac{1}{A_m(T_y)} = \frac{1}{\beta_i} + \frac{1}{w_m},$$

$\beta_i$  — коэффициент массоотдачи для  $i$ -го газа;  $w_m$  — константа скорости химической реакции.

Величины  $\beta_i$  подсчитывались по формуле  $\beta_i = \text{Sh } D_i / d_{eff}$ ,  $\text{Sh}$  — число Шервуда;  $D_i$  — коэффициент молекулярной диффузии  $i$ -го газа. Число Шервуда вычислялось по формуле [16], соответствующей турбулентному потоку газа в трубе  $\text{Sh} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Sc}^{1/3}$ . Здесь  $\text{Sc} = \mu / (\rho D_i)$  — число Шмидта.

Коэффициенты молекулярной диффузии для  $i$ -го вещества  $D_i$  подсчитывались по формуле [6]

$$D_i = (1 - y_i) / \left( \sum_{j \neq i} y_j / D_{ij} \right).$$

$D_{ij}$  — коэффициенты молекулярной диффузии для бинарной смеси. Согласно [6],

$$D_{ij} = \frac{10^{-5} T^{1,75} [1/M_i + 1/M_j]^{1/2}}{\rho [(V_i)^{1/3} + (V_j)^{1/3}]^2},$$

$V_i$  — диффузионные объемы. Их значения для рассматриваемых здесь газов приведены в [6].

Для скоростей гетерогенных реакций в соответствии с [17] приняты значения, отвечающие реакциям газов с каменным углем: 1)  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ , 2)  $2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$ , 3)  $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ , 4)  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$ . Согласно [17], имеем  $w_m(T_y) = k_m \exp(-E_m/RT_y)$ ,  $\lg k_m = 0,2 \cdot 10^{-4} E_m + 2$ ,  $E_1 = 125000$  кДж/кмоль,  $E_2/E_1 = 1,1$ ,  $E_3/E_1 = 2,2$ ,  $E_4/E_1 = 1,6$ .

Реакция  $\text{CO} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$  опущена, т. е. в принятых предположениях она осуществляется в два этапа: сперва  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$  и затем конверсия окиси углерода водяным паром. Для реакции  $\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$  принято, что при средних давлениях константа скорости, согласно [13], в  $\sim 1500$  раз ниже константы скорости реакции  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$ . Выражения для равновесных концентраций газов в различных реакциях брались из [1, 18].

Поскольку в сухом угле имеются полости и трещины, реакционная поверхность в гетерогенных реакциях отличается от заданной угольной поверхности. Это учтено в модели введением коэффициента увеличения площади. В расчетах этот коэффициент варьировался от 1 до 30. Для приведенных ниже результатов принят коэффициент, равный 23.

Представленные в статье уравнения отвечают случаю канала постоянного сечения, однако разработанная программа позволяет рассчитывать каналы переменного сечения с различными соотношениями инертной и угольной поверхностей вдоль канала. Такой канал разбивается на последовательность каналов с постоянными сечениями, а при переходе от одного к другому необходимо только пересчитать скорость газового потока.

В предлагаемой модели процесс пиролиза не рассматривается подробно, а просто принято, что количество газа пиролиза составляет некоторую долю от количества прореагировавшего с газом угля, т. е. определяется скоростью продвижения угольной стенки.

Численная процедура решения уравнений (1) — (5) с указанными граничными условиями реализована следующим образом. Сначала из граничных условий и уравнения (5) определяется температура угля на входе в канал  $T_y(0)$ . Затем, используя это значение и выражения (1) — (4), делается шаг вдоль канала и определяются значения  $p$ ,  $v$ ,  $T_g$ ,  $c_i$  в следующем сечении. После этого указанная процедура повторяется. Поскольку газофазные реакции после прогрева газа протекают быстро, в (1) возникают сильные источники, что делает систему уравнений жесткой. В связи с этим для решения применена одна из разновидностей неявных схем.

Для иллюстрации работы модели на рис. 1—3 представлены результаты расчетов в случае, когда сечение канала — равнобедренный прямоугольный треугольник площадью 1 м<sup>2</sup>. Катеты предполагаются

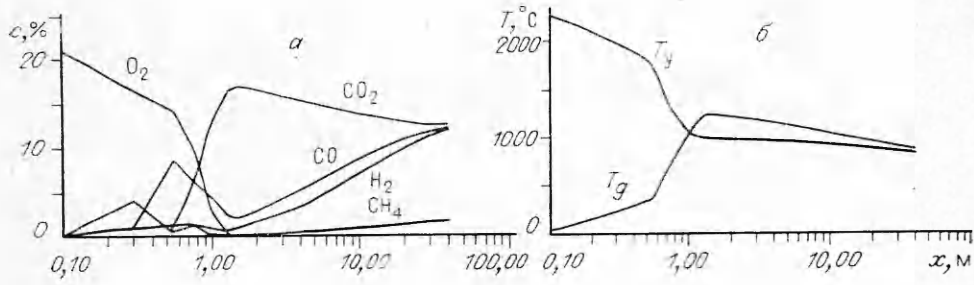


Рис. 1.

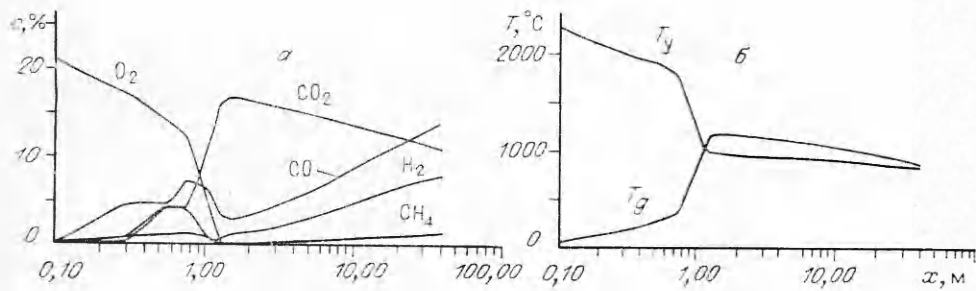


Рис. 2.

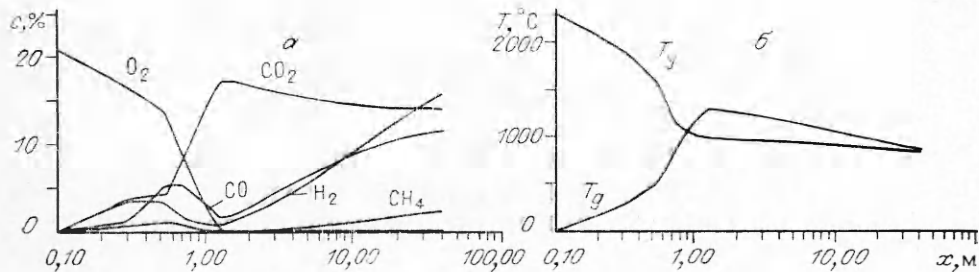


Рис. 3.

угольными стенками, а гипотенуза — инертной. Расчеты проведены для воздушного дутья с расходом воздуха  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Рис. 1—3 соответствуют различным притокам пара 0,5, 1 и  $1,5 \text{ м}^3$  воды на тонну прореагировавшего с газами угля соответственно (а — изменение состава газа, б — изменение температуры). Давление на входе в канал принято  $200 \text{ кПа}$ . Для удобства на графиках по оси  $x$  вдоль канала задана логарифмическая шкала. Из графиков видно, что увеличение притока пара приводит к росту доли водорода и снижению доли окиси углерода в получаемом газе. Непомогающее изменение  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  в кислородной зоне связано с тем, что вначале газ в канале недостаточно прогрет. После прогрева газа эти вещества реагируют с оставшимся кислородом, вследствие чего их концентрации быстро снижаются.

Представленные здесь результаты, а также другие многочисленные проведенные расчеты хорошо соответствуют имеющимся представлениям о процессах ПГУ, что указывает на возможность успешного использования разработанной модели для анализа и прогнозирования этих процессов в условиях действующих и проектируемых газогенераторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бесков С. Д. Технохимические расчеты.— М.: Высш. шк., 1966.— 520 с.
2. Дикерсон Р., Грей Г., Хейт Дж. Основные законы химии.— М.: Мир, 1982.— Т. 2.— 620 с.
3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.— М.: Наука, 1972.— 720 с.

4. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета.— М.; Л.: Химия, 1966.— 536 с.
5. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных.— М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.— 247 с.
6. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей (определение и корреляция).— Л.: Химия, 1971.— 704 с.
7. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача.— М.: Высш. шк., 1980.— 467 с.
8. Юдаев Б. Н. Техническая динамика. Теплопередача.— М.: Высш. шк., 1988.— 480 с.
9. Johnson J. L. Kinetics of coal gasification.— N. Y.: John Wiley & Sons, 1979.
10. Щегинков Е. С. Физика горения газов.— М.: Наука, 1965.— 740 с.
11. Peters N. Premixed burning in diffusion flames — the flame zone model of Libby and Economos // Int. J. Heat Mass Transfer.— 1979.— 22, N 5.— P. 691—703.
12. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива.— М.: Энергия, 1977.— 248 с.
13. Gavind R., Shah J. Modeling and simulation of an entrained flow coal gasifier // AIChE J.— 1984.— 30, N 1.— P. 79—92.
14. Dinsmoor V., Galland J. M., Edgar T. F. The modeling of cavity formation during underground coal gasification // J. Petroleum Technology, 1978, May.— P. 695—704.
15. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.— 491 с.
16. Беннет К. О., Майерс Дж. Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен.— М.: Недра, 1966.— 726 с.
17. Основы практической теории горения/Под ред. В. В. Померанцева.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.— 310 с.
18. Лавров Н. В. Физико-химические основы горения и газификации топлива.— М.: Metallurgizdat, 1957.— 288 с.

г. Люберцы

Поступила в редакцию 7/VII 1992

СДК 536.46

О. Ю. Первалов, В. Т. Кузнецов, И. Г. Дик

### О ПЕРЕХОДЕ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ НЕИДЕАЛЬНЫЙ КОНТАКТ ДВУХ ГАЗИФИЦИРУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Приводятся результаты моделирования (в рамках феноменологической теории нестационарного горения) перехода фронта горения через зазор, разделяющий различающиеся топлива. Построены границы, разделяющие области с различными последствиями перехода горения через контакт.

Изучение перехода послышного горения с одного топлива на другое представляет интерес для многих практических целей. Топлива, составляющие огневую цепь, могут различаться как своими теплофизическими, так и термическими характеристиками. Ниже исследуется новый фактор — возможное термическое сопротивление между воспламенителем (В) и поджигаемым образцом (П). Такое термическое сопротивление может представлять собой воздушный зазор, возникающий в процессе сборки огневой цепи или во время горения из-за растрескивания вследствие термических напряжений.

Постановка теоретической задачи во многом заимствована из [1]. Пусть конденсированное вещество В (характеристики которого помечаются индексом 1), способное к горению с поверхности, находится в контакте на плоскости  $x = 0$  с другим конденсированным веществом П, занимающим полупространство. Длина воспламенителя  $x_s$  должна составлять достаточное количество тепловых масштабов горения  $\kappa_1/u_1$ , где  $\kappa_1$  — коэффициент температуропроводности воспламенителя;  $u_1$  — линейная скорость его горения. Предполагается одномерность процесса, постоянство теплофизических характеристик компонентов составного образца.

В рамках феноменологического подхода [2, 3] задача о нестационарном горении системы сводится к исследованию уравнения теплопро-