

УДК 662.6, 669.162.2, 536.46

## **ЗАЖИГАНИЕ, ГОРЕНИЕ И САМОПРОИЗВОЛЬНОЕ ПОГАСАНИЕ ЧАСТИЦ КОКСА В АЗОТНО-КИСЛОРОДНЫХ СМЕСЯХ**

*В. В. Калинин, А. С. Черненко<sup>1</sup>, В. С. Волошин, Р. Д. Куземко<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова*

<sup>2</sup> *Приазовский государственный технический университет*

*Проведений аналітичний аналіз умов запалювання дрібних коксових часток в нагрітій азотно-кисневій суміші. При різних концентраціях вугільного пилу показана роль гомогенної реакції окислення чадного газу в процесі запалювання і горіння пиловугільного факелу. Так при малих концентраціях пилу ця реакція сприяє повнішому вигоранню часток, при високих – до швидкого вигорання кисню і початку відновлення вуглецю часток. Варіювання масової концентрації пилу дозволяє впливати на зміст продуктів реакції і повноту згорання пилу*

*Проведен аналитический анализ условий зажигания мелких коксовых частиц в нагретой азотно-кислородной смеси. При различных концентрациях угольной пыли показана роль гомогенной реакции окисления угарного газа в процессе зажигания и горения пылеугольного факела. Так при малых концентрациях пыли эта реакция способствует более полному выгоранию частиц, при высоких – к быстрому выгоранию кислорода и началу восстановления углерода частиц. Варьирование массовой концентрации пыли позволяет влиять на содержание продуктов реакции и полноту сгорания пыли*

*The analytical analysis of terms of lighting of shallow coke particles is conducted in the heated nitric-oxygen mixture. The role of reaction oxidation carbon monoxide in pulverized coal ignition and combustion at different coal dust concentrations. At low dust concentrations, this reaction promotes to a more complete particles burning out, at high concentrations – fast oxygen burning out and the beginning of the carbon particles renewals. Varying the mass concentration of dust allows to influence on reaction products share and the combustion completeness of dust*

*Пылеугольное топливо (ПУТ) перед подачей и последующего его сгорания в фурменном очаге получают путем размола до мелкодисперсного состояния ( $r_{90} < 70$  мкм). Его подогревают вместе с*

несущим инертным газом [1] и непосредственно перед фурмой оно смешивается с подогретым воздухом, обогащенный кислородом [2, 3].

В этом случае необходимо знать условия возникновения устойчивого горения мелкой угольной пыли в заданных условиях. Вынужденным воспламенением (зажиганием) является процесс перехода частицы кокса на высокотемпературный режим теплообмена и кинетики окисления в результате превышения начальной температуры частицы выше критического значения [4]. То есть для осуществления горения частицы необходимо знать температуру зажигания. Так в работе [5] показано, что в азотно-кислородных смесях комнатной температуры за счет присутствия теплообмена излучением зажигание возможно лишь в определенном диапазоне размеров частиц. Верхний предел по размеру обуславливается лучистыми теплопотерями, нижний – молекулярно-конвективным теплообменом с окружающим газом. Для мелких частиц пыли с уменьшением диаметра частицы температура зажигания возрастает. Область зажигания по размерам зависит не только от концентрации кислорода в среде и температуры газовой смеси, но и от термокинетических свойств частицы. В условиях взвеси пыли в холодной азотно-кислородной смеси гетерогенное зажигание частиц определяется и концентрацией пыли.

**Целью** данной работы является анализ условий устойчивости стационарной температуры частиц кокса для определения условий их зажигания, а также исследование характеристик высокотемпературного теплообмена и горения монодисперсной совокупности угольных частиц при различных массовых концентрациях частиц  $C_m$ . Важным заданием является исследование роли окисления угарного газа в смеси в условиях зажигания совокупности частиц в азотно-кислородных смесях.

### **Постановка задачи**

Математическое моделирование горения угольной пыли в условиях взвеси пылеугольного факела является достаточно сложной задачей [6-8]. Математическая модель применима лишь при наличии корректных и точных исходных данных. Необходимо знать закон разложения и горения частицы угля, законы химической кинетики в газе и на поверхности твердой фазы. Но и при наличии таких данных об элементарных процессах сама математическая задача расчета сложных турбулентных потоков [8], теплообмена и химических реакций остается достаточно трудной.

Представим, что смесь предварительно нагретых угольной пыли и воздуха, обогащенного кислородом, вдувается с некоторой скоростью в газовое пространство. Начальная температура газовой смеси меньше

температуры частиц. Скорость потока и давление приняты неизменными по длине факела.

При относительно низких температурах при окислении пористой частицы кокса угля протекают параллельные экзотермические гетерогенные реакции с кислородом воздуха [9]:



При повышении температуры выше 1800 К подключается эндотермическая гетерогенная химическая реакция с газообразной двуокисью углерода  $CO_2$



Изменение температуры пористой углеродной частицы  $T$  (средней по объему) определяется тепловыделением в результате протекания гетерогенных химических реакций, теплообменом частицы с газом и стенками реакционной установки:

$$\frac{c_c \rho_c d}{6} \omega \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = q_{eff}; \quad T(t=0) = T_b; \quad (1)$$

$$q_{eff} = q_{ch} - q_h = q_{ch} - q_g - q_w,$$

где  $c_c$  – удельная теплоемкость частицы, Дж/(кг·К);

$\rho_c$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$T_b$  – начальная температура частицы, К;

$q_{eff}$  – эффективная плотность тепловыделения, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_h$  – плотность суммарных теплопотерь, Вт/м<sup>2</sup>;

$\omega$  – скорость частицы, м/с.

Плотность химического тепловыделения  $q_{ch}$  в результате поверхностного и внутреннего реагирования определяется тепловыми эффектами и скоростями химических реакций на поверхности и в объеме частицы [10]:

$$q_{ch} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{gs} Y_{O_2s} - Q_3 k_3 \rho_{gs} Y_{CO_2s} - \\ - Q_3 k_3 \left( \frac{k_{v3}}{k_3} \rho_{gs} Y_{CO_2s} + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} a_{v3} \rho_{gs} Y_{O_2s} \right),$$

где  $Q_1, Q_2$  – тепловые эффекты химических реакций (I) и (II), рассчитанные на единицу массы кислорода Дж/кг $O_2$ ;

$Q_3$  – тепловой эффект химической реакции (III), рассчитанный на единицу массы углекислого газа, Дж/кг $CO_2$ .

Первое слагаемое описывает общее химическое тепловыделение на единицу внешней поверхности в реакциях (I) и (II), второе – химическое теплопоглощение в реакции (III) на внешней поверхности частицы, третье – общее химическое теплопоглощение внутри пор частицы в реакции восстановления  $CO_2$  согласно реакции (III), который появляется в результате диффузии извне и реакции (I).

Плотность теплообмена излучением частицы с окружающими смесь телами (стенками сосуда) стенками  $q_w$  описывается законами Кирхгофа и Стефана-Больцмана:

$$q_w = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4);$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент черноты частицы;

$T$  – температура поверхности частицы;

$T_w$  – температура окружающих тел, К.

Теплообмен газа с нагретой поверхностью частицы  $q_g$  происходит за счет теплопроводности, конвекции и стефановского течения, которое учитывается приведенной пленкой. Стефановское течение увеличивает теплоотдачу частицы за счет появления дополнительных масс газов и определяется скоростью химического превращения углерода. Плотность теплового потока на поверхности частицы определим согласно [10]

$$q_g = \alpha (T - T_g) + U_{s0} \rho_{gs} c_g T_*;$$

$$\alpha = \frac{\lambda_g Nu}{d}, \quad \lambda_g = \lambda_{g0} \left( \frac{T_*}{T_0} \right)^n, \quad T_* = \frac{T + T_g}{2}, \quad Nu = 2 + 0.16 Re^{2/3}.$$

Тут  $T_g$  – температура газа на границе приведенной пленки (в газовой смеси), К;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена частицы с газом, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К);

$Nu$  – число Нуссельта,  $Re$  – число Рейнольдса по частице;

$U_s$  – скорость стефановского течения вблизи поверхности частицы, м/с.

Стефановское течение уменьшает массоперенос кислорода к поверхности частицы, но способствует массопереносу углекислого и угарного газа от поверхности частицы [11]. Соответствующие концентрации определяются согласно выражениям [10]:

кислорода  $O_2$

$$Y_{O_2,s} = \frac{\beta}{\beta + (k_1 + k_2 + k_v + U_{s0})} Y_{O_2},$$

углекислого газа  $CO_2$

$$Y_{CO_2,s} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \left( \frac{k_1 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) - a_{v3} k_3}{\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3}} \right) Y_{O_2,s} + \frac{\beta}{(\beta + U_{s0} + k_3 + k_{v3})} Y_{CO_2}.$$

Скорость стефановского течения вблизи поверхности углеродной частицы приближенно равняется

$$U_{s0} = \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} \left( (k_1 + 2k_2) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) + k_3 a_{v3} \right) \left( \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Y_{O_2} + \frac{\mu_c}{\mu_{CO_2}} (k_3 + k_{v3}) \left( \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} \frac{k_1 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) - k_3 a_{v3}}{\beta + k_3 + k_{v3}} \left( \frac{\beta}{\beta + k_1 + k_2 + k_v} \right) Y_{O_2} + \left( \frac{\beta}{\beta + k_3 + k_{v3}} \right) Y_{CO_2} \right);$$

$$\beta = \frac{D_g Nu}{d} = \frac{\alpha}{\rho_g c_g}, \quad D_g = D_{g0} \left( \frac{T_*}{T_0} \right)^{n+1} \frac{P_0}{P}, \quad c_g = c_{g0} + \Omega (T_* - T_0), \quad \rho_g = \rho_{g0} \frac{T_0}{T_*}.$$

Тут  $\beta$  – коефіцієнт масообмена частини, м/с;

$Y_{O_2}$ ,  $Y_{CO_2}$  – относительные массовые концентрации кислорода и углекислого газа в газовой смеси на отдалении от частицы (на границе приведенной пленки);

$c_g$ ,  $\rho_g$  – средние удельная теплоемкость и плотность газа внутри приведенной пленки;

$\mu_C$ ,  $\mu_{O_2}$ ,  $\mu_{CO_2}$  – молярная масса углерода, кислорода и углекислого газа.

Уменьшение диаметра частицы обусловлено химическими реакциями (I), (II) и (III) на ее внешней поверхности [10]:

$$-\frac{1}{2}\rho\omega\frac{\partial d}{\partial x} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}}(k_1 + 2k_2)\rho_{gs}Y_{O_2,s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}}k_3\rho_{gs}Y_{CO_2,s}, \quad d(t=0) = d_b; \quad (2)$$

Уменьшение плотности частицы со временем за счет реакций внутри пор частицы происходит согласно закону [10]:

$$-\frac{1}{6}d\omega\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\mu_C}{\mu_{O_2}}(k_1 + 2k_2)\frac{k_v}{(k_1 + k_2)}\rho_{gs}Y_{O_2,s} + \frac{\mu_C}{\mu_{CO_2}}k_3\rho_{gs}\left(\frac{k_{v3}}{k_3}Y_{CO_2,s} + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}}a_{v3}Y_{O_2,s}\right), \quad \rho(t=0) = \rho_b. \quad (3)$$

Константы внутреннего реагирования  $k_v$ ,  $k_{v3}$  и  $a_{v3}$  определяются как

$$k_v = \frac{2D_v}{d}(Se_v cth Se_v - 1), \quad k_{v3} = \frac{2D_v}{d}(Se_{v3} cth Se_{v3} - 1);$$

$$a_{v3} = \frac{k_1 d^2 F_v}{4D_v} \frac{1}{(Se_{v3}^2 - Se_v^2)} \left( \frac{k_v}{(k_1 + k_2)} - \frac{k_{v3}}{k_3} \right);$$

$$Se_v = \sqrt{\frac{F_v d^2 (k_1 + k_2)}{4D_v}}, \quad Se_{v3} = \sqrt{\frac{F_v d^2 k_3}{4D_v}};$$

Коэффициент внутренней диффузии и удельная поверхность пор определяется через пористость частицы [9]:

$$D_v = \chi^2 \cdot D_{g0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{n+1} \frac{P_0}{P}, \quad \chi = 1 - \frac{\rho}{\rho_{real}},$$

$$\frac{F_v}{F_{v0}} = \frac{\chi(1-\chi)}{\chi_b(1-\chi_b)} = \left( \frac{1-\rho/\rho_{real}}{1-\rho_b/\rho_{real}} \right) \cdot \frac{\rho}{\rho_b},$$

где  $D_{g0}$  – коэффициент диффузии кислорода в воздухе при температуре  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с;

$\chi$  – пористость частицы;

$F_{v0}$  и  $\chi_0$  – начальная удельная поверхность пор и пористость;

$\rho_{real}$  – плотность сплошного вещества частицы.

В условиях окисления совокупности частиц происходит изменение температуры газовой смеси, которая окружает отдельные частицы, и концентраций газообразных компонентов (кислорода, угарного и углекислого газов) в ней. Этому способствует не только диффузионные процессы между смесью и частицами, но и протекание гомогенной химической реакции:



Кинетические константы гомогенной реакции принимаются  $E_4 = 96.3$  кДж/моль и  $k_{04} = 7.05 \cdot 10^6$  1/с. Тепловой эффект данной реакции 571 кДж/моль или  $Q_4 = 10.2$  МДж/кгСО [9]. Реакция идет по первому порядку по активному компоненту – угарному газу при избытке кислорода. При малых концентрациях кислорода константа реакции должна линейно зависеть и от концентрации кислорода. Поэтому принималось, что:

$$k_{04} = \begin{cases} k_{04}, & Y_{O_2} \geq 5\% \\ k_{04} \frac{Y_{O_2}}{0.05}, & Y_{O_2} < 5\% \end{cases}.$$

В среднем на каждую частицу в условиях совокупности приходится определенный объем газовой смеси. При малых концентрациях частиц граница приведенной пленки лежит в пределах этого объема, при больших

– за ней. При этом считается, что концентрации компонент в газовой смеси равны соответствующим значениям на границе приведенной пленки.

При высоких скоростях движения смеси газ и угольной пыли конвективным теплообменом и массообменном через внешние границы факела можно пренебречь. Изменение с координатой температуры газа и концентраций кислорода, угарного и углекислого газов в смеси определяются следующими зависимостями [12, 13]:

для температуры газа:

$$c_g \rho_g \omega \frac{\partial T_g}{\partial x} = C_N S_c q_g + Q_4 k_4 \rho_g Y_{CO} - \frac{2}{r_f} \varepsilon_{CO_2} \sigma (T_g^4 - T_w^4), \quad (4)$$

для концентрации кислорода  $O_2$ :

$$-\rho_g \omega \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial x} = C_N S_c j_{O_2s} + \frac{\mu_{O_2}}{2\mu_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO}, \quad (5)$$

для концентрации угарного газа  $CO$ :

$$\rho_g \omega \frac{\partial Y_{CO}}{\partial x} = C_N S_c j_{CO_2s} - k_4 \rho_g Y_{CO} \quad (6)$$

для концентрации углекислого газа  $CO_2$ :

$$\rho_g \omega \frac{\partial Y_{CO_2}}{\partial x} = C_N S_c j_{CO_2s} + \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{CO}} k_4 \rho_g Y_{CO}, \quad (7)$$

где плотности массовых потоков к единице поверхности частицы равны

$$j_{O_2s} = (k_1 + k_2) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{gs} Y_{O_2s},$$

$$j_{CO_2s} = \frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{O_2}} k_1 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{gs} Y_{O_2s} - k_3 \rho_{gs} Y_{N_2s},$$

$$j_{CO_s} = \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{O_2}} k_2 \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) \rho_{gs} Y_{O_2s} + \frac{2\mu_{CO}}{\mu_{NO_2}} k_3 \rho_{gs} Y_{NO_2s},$$

$$T_g(x=0) = T_{g0}, \quad Y_{O_2}(x=0) = Y_{O_2,0}, \quad Y_{CO_2}(x=0) = Y_{CO_2,0}, \quad Y_{CO}(x=0) = Y_{CO,0},$$

где  $S_c$  – боковая поверхность частицы, м<sup>2</sup>.

Третье слагаемое в (4) учитывает тепловое излучение CO<sub>2</sub>, находящееся в газовой смеси. Коэффициент черноты  $\varepsilon_{CO_2} = 0.3$  был взят максимальным, который практически не зависит от температуры [14]. Для учета теплового излучения использована одномерная схема [15]. Здесь  $r_f = 0.05$  м – радиус осесимметричного факела.

Характеристиками совокупности частиц является численная  $C_N$ , массовая  $C_m$  и относительная массовая  $B$  концентрация частиц в ней. В случае монодисперсной совокупности частиц

$$C_N = \frac{N}{V_g}, \quad C_m = \frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \cdot \rho \cdot C_N,$$

$$B = \frac{\frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \rho N}{\frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \rho N + \left( V_g - \frac{1}{6} \pi \cdot d^3 N \right) \rho_g} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_g}{\rho} \left( \frac{6}{\pi \cdot d^3 C_N} - 1 \right)}.$$

Реакционная способность совокупности частиц зависит от коэффициента избытка кислорода в газовой смеси:

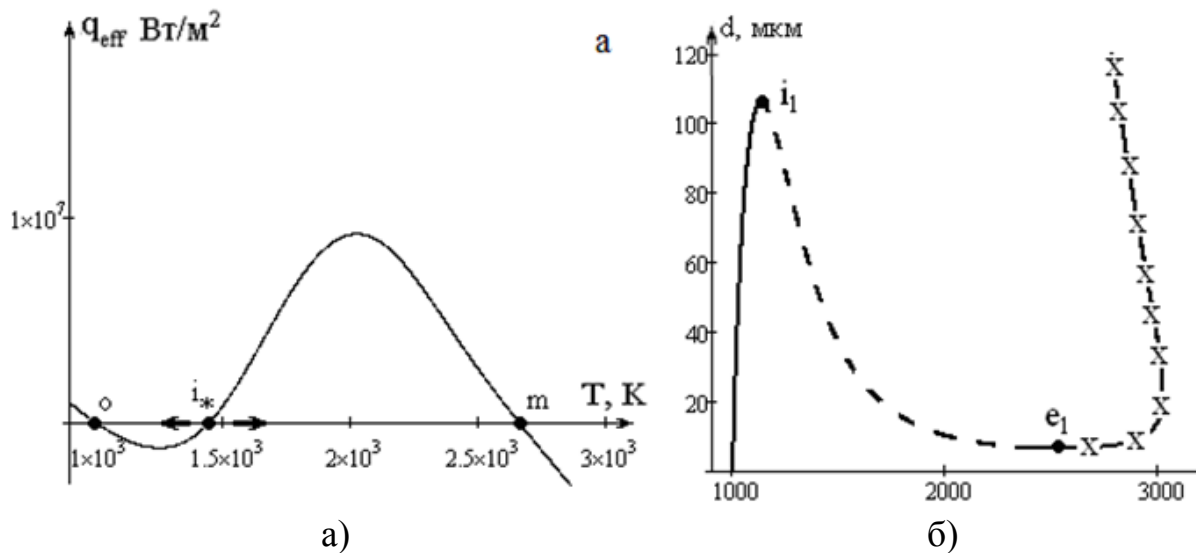
$$\eta = \frac{m_{prakt}}{m_{teor}} = \frac{\rho_g Y_{O_2\infty} \cdot \left( V_g - \frac{1}{6} \pi d^3 N \right)}{\frac{\mu_{O_2}}{\mu_C} \cdot \frac{1}{6} \pi d^3 \rho N} = \frac{\rho_g Y_{O_2\infty} \cdot \left( 1 - \frac{1}{6} \pi d^3 C_N \right)}{\frac{\mu_{O_2}}{\mu_C} \cdot \frac{1}{6} \pi d^3 \rho C_N}.$$

Приведенные уравнения (1) – (7) в рамках предложенной модели описывают нестационарный высокотемпературный тепломассообмен и кинетику химического превращения в монодисперсной совокупности пористых частиц с учетом стефановского течения.

### Условие зажигания углеродных частиц

Расчеты проводили на примере кокса антрацита марки АШ. Частицы движутся вместе с азотно-кислородной смесью ( $Y_{O_2\infty} = 0.50$ ) температуры 1000 К ( $T_w = T_g = 1000$  К). Скорость потока и частиц 100 м/с. Давление 0.3 МПа. Принятые параметры:  $Q_1 = 12.34 \cdot 10^6$ ,  $Q_2 = 6.84 \cdot 10^6$  Дж/кгO<sub>2</sub>,  $Q_3 = 4.00 \cdot 10^6$  Дж/кгO<sub>2</sub>;  $k_{01} = 6.5 \cdot 10^4$ ,  $k_{02} = 13 \cdot 10^4$  м/с;  $k_{03} = 1.56 \cdot 10^8$  м/с,  $E_1 = 140030$ ,  $E_2 = 154000$ ,  $E_3 = 308000$ ;  $F_v = 2 \cdot 10^5$  м<sup>-1</sup>,  $D_v = 7.5 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с. Постоянные:  $\rho_{g0} = 0.277$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{g0} = 8.19 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $c_{g0} = 1185$  Дж/(кг·К),  $D_{g0} = 3.2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с определялись при  $T_0 = 1273$  К.

Проведем анализ на устойчивость стационарных состояний по температуре. Для этого рассмотрим температурные зависимости плотности эффективного тепловыделения  $q_{eff}$  (рис. 1а) для случая нагретого воздуха.



**Рис. 1 а)** Температурные зависимости эффективного тепловыделения для пористой углеродной частицы диаметром 50 мкм, находящейся в азотно-кислородной смеси. **б)** Зависимость диаметра частицы от стационарной температуры углеродной частицы. Условные обозначения:

— низкотемпературные режимы; — — — критические условия зажигания, — x — x — высокотемпературные режимы.

Температура смеси  $T_g = T_w = 1000$  К, доля кислорода  $Y_{O_2\infty} = 0.50$ .

Давление 0.3 МПа. Скорость потока 100 м/с.

В определенных интервалах концентраций кислорода и температур смеси (гистерезисная область) [5] существует три стационарных состояния по температуре.

Точки **o** и **m** (рис. 1а) соответствуют низко- и высокотемпературным устойчивым стационарным состояниям: при любых малых изменениях

температуры частицы вблизи этой точки она стремится к своему стационарному значению. Они отвечают условиям:

$$q_{eff} = 0, \quad \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} < 0.$$

Среднее значение температуры (точка  $i_*$ ) определяет влияние начальной температуры на критические условия вынужденного воспламенения (зажигания) и характеризует температуру зажигания  $T_{b^*}$  [5]:

$$q_{eff} = 0, \quad \frac{\partial q_{eff}}{\partial T} > 0.$$

При температурах частицы, ниже этой величины  $T_b < T_{b^*}$ , температура частицы уменьшается до тех пор, пока не наступит низкотемпературный стационарный режим окисления. При начальных температурах частицы выше критического значения  $T_b > T_{b^*}$  происходит зажигание и температура частицы повышается к температуре квазистойчивого горения [4, 5].

При рассмотрении протекания на поверхности углеродной частицы только двух химических реакций (I)-(II) и предположении, что внутреннее число Семенова  $Se_v \gg 1$  (выполняется для рассматриваемого диапазона размеров частиц), удастся получить из условия  $q_{eff} = 0$  в аналитическом виде зависимость диаметра частицы от стационарной температуры (рис. 1b) [16]:

$$d = \frac{\lambda_g Nu}{q_{ch,m}} \cdot \frac{T - T_g}{\left( A^2 + \sqrt{A^2 - A_g A_w} \right)}, \quad (8)$$

$$q_{ch,m} = (Q_1 k_1 + Q_2 k_2) \left( 1 + \frac{k_{v0}}{k_1 + k_2} \right) \rho_{gs} Y_{O_2^\infty}, \quad A = \frac{1}{2} (1 - A_g - A_w - A_{st})?$$

$$A_g = \frac{c_g \rho_{gs} (k_1 + k_2 + k_{v0} + U_{sk}) (T - T_g)}{q_{ch,m}}, \quad k_{v0} \approx \sqrt{F_v D_v (k_1 + k_2)},$$

$$A_{st} = \frac{1}{2} \frac{U_{sk} \rho_{gs} c_g (T + T_g)}{q_{ch,m}}, \quad A_w = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4)}{q_{ch,m}}, \quad U_{sk} = \frac{\mu_c}{\mu_{O_2}} (k_1 + 2k_2) \left( 1 + \frac{k_v}{k_1 + k_2} \right) Y_{O_2^0}.$$

Для частиц малых размеров (рис. 1б) теплотери излучением незначительны ( $A_w \ll A_g$ ). Стационарная зависимость диаметра частицы от температуры определяется выражением (8). Она и определяет температуру зажигания. Так, в области диаметров частиц  $d_{e1} < d < d_i$  критическое значение начальной температуры (пунктирная линия) увеличивается с уменьшением диаметра, что объясняется ростом теплообмена с газом единицы поверхности частицы. При начальной температуре частицы меньше критического значения для данного диаметра (рис. 1; рис. 2а, кривая 3) частица практически инертно охлаждается. При начальной температуре частицы выше критического значения происходит переход на высокотемпературный режим тепломассообмена и кинетики химических реакций (рис. 1; рис. 2а, кривая 1).

Таким образом, условие зажигания пылегазовой смеси можно определить как

$$q_{eff}|_{x=0} = 0 \text{ и } \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

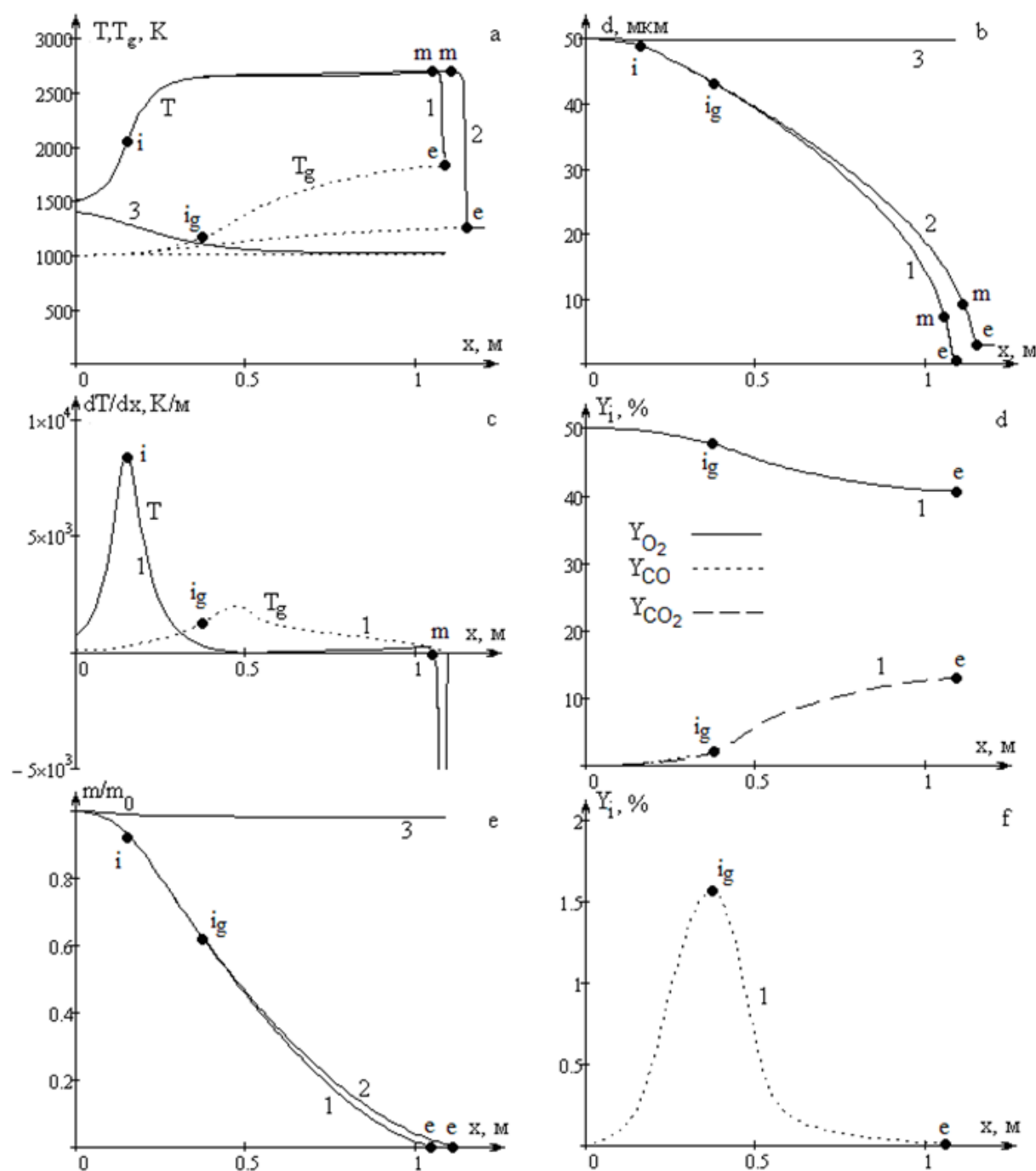
которое рассчитывается при начальных параметрах.

### Анализ результатов

На рис 2 представлены временные зависимости температуры  $T$ , диаметра  $d$  и плотности  $\rho$  частицы, температуры газа  $T_g$  и концентрации газов ( $Y_{O_2}$  – сплошная,  $Y_{CO_2}$  – великий пунктир,  $Y_{CO}$  – мелкий пунктир) в нем для случая неплотной совокупности при начальном равном содержимом кислорода и азота.

В целом для такого случая все время горение частиц вдоль факела можно разделить на несколько стадий (рис. 2, кривая 1). На первой стадии (период индукции) происходит разогрев частиц за счет протекания гетерогенных реакций (I) и (II) в переходной области. Диаметр и плотность частиц практически не изменяются. Незначительное количество частиц предопределяет значительный коэффициент излишка кислорода в смеси и медленное увеличение температуре газовой смеси за счет теплообмена с более нагретыми частицами. Окончание этой стадии характеризуется достижением точки перегиба на профиле температуры частицы (точка i):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_i > 0, \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_i = 0, \left. \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right|_i < 0.$$



**Рис 2.** Профили а) температуры частицы и газа, с) градиента температур, б) диаметра и е) массы частицы, д) и ф) концентраций компонент в азотно-кислородной смеси с  $Y_{O_2,0} = 0.5$ , частицами антрацита АШ с  $d_b = 50 \text{ мкм}$  и массовой концентрацией  $C_m = 0.015 \text{ кг/м}^3$ , относительная массовая концентрация  $B = 6.0\%$ , численная концентрация  $C_N = 1.6 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ ). Кривые 1 и 2 – учет и не учет, соответственно, гомогенной реакции окисления  $CO$  ( $T_b = 1500 \text{ K}$ ), кривая 3 –  $T_b = 1400 \text{ K}$

На второй стадии (гетерогенное горение) протекает горение углеродных частиц за счет гетерогенных реакций (I) – (III) внутри и на их внешней поверхности, в результате чего наблюдается существенное уменьшение их диаметра и плотности, а, следовательно, и массы частиц. Наличие эндотермической реакции не только существенно уменьшает квазистационарную температуру горения частиц (200 – 400К), но и повышает концентрацию угарного газа в среде.

Дальнейший рост температуры газовой смеси вместе с повышением в ней угарного газа за счет протекания реакции (II) и наличия кислорода приводит к самовоспламенению реакции угарного газа с кислородом по реакции (IV). Условием начала гомогенного горения выбрано условие максимума на профиле концентрации угарного газа (точка  $i_g$ ):

$$\left. \frac{\partial Y_{CO}}{\partial x} \right|_{i_g} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 Y_{CO}}{\partial x^2} \right|_{i_g} < 0.$$

Низкая энергия активации определяет высокую скорость экзотермической реакции (IV). Скорость выгорания кислорода в газе в разы увеличивается, а содержание угарного газа в смеси падает практически до нуля. Концентрация углекислого газа, как продукта гомогенной реакции, повышается. Стремительное повышение температуры газовой смеси уменьшает теплоотдачу от более нагретых частиц, в результате чего их температура незначительно повышается.

Формирование точки максимума на зависимости температуры частицы координаты факела (точка  $m$ ) определяется конкуренцией изменения скорости химического тепловыделения за счет гетерогенных реакций и скорости теплопотерь с уменьшением диаметра частицы в процессе гетерогенного горения и, как следствие, роста коэффициентов теплоотдачи ( $\alpha = \lambda_g Nu/d$ ) и массопереноса ( $\beta = D_g Nu/d$ ). При уменьшении диаметра частицы увеличивается скорость роста общих теплопотерь, которая к достижению точки максимума температуры горения частицы, была меньше скорости роста химического гетерогенного тепловыделения на поверхности частицы ( $\partial q_h / \partial \beta < \partial q_{ch} / \partial \beta$ ,  $\partial q_h / \partial d > \partial q_{ch} / \partial d$ ) за счет радиационного излучения. В точке максимальной температуры горения и соответствующего диаметра частицы (точка  $m$ ) ( $\partial q_h / \partial \beta = \partial q_{ch} / \partial \beta$ ,  $\partial q_h / \partial d = \partial q_{ch} / \partial d$ ). После прохождения точки  $m$  –  $\partial q_h / \partial \beta > \partial q_{ch} / \partial \beta$ ,  $\partial q_h / \partial d < \partial q_{ch} / \partial d$ , в результате чего температура частиц уменьшается.

Дальнейшее уменьшение диаметра и плотности частицы приводит к резкому изменению скорости их уменьшения по мере выгорания ("погасание"). Условием является достижение минимума на профиле температуры частицы (точка  $e$ )

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_e < 0, \quad \left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_e = 0, \quad \left. \frac{\partial^3 T}{\partial x^3} \right|_e > 0.$$

Высокий уровень температуры газовой смеси приводит к продолжению окисления углеродных частиц, однако с более меньшей скоростью. Поэтому при этих условиях использования термина «погасание» частиц является условным. Самопроизвольное «погасание» частицы происходит практически в кинетическом режиме (диффузионно-кинетическое отношение  $Se < 0.25$ ), а не в диффузионном, как это утверждается в специальной литературе.

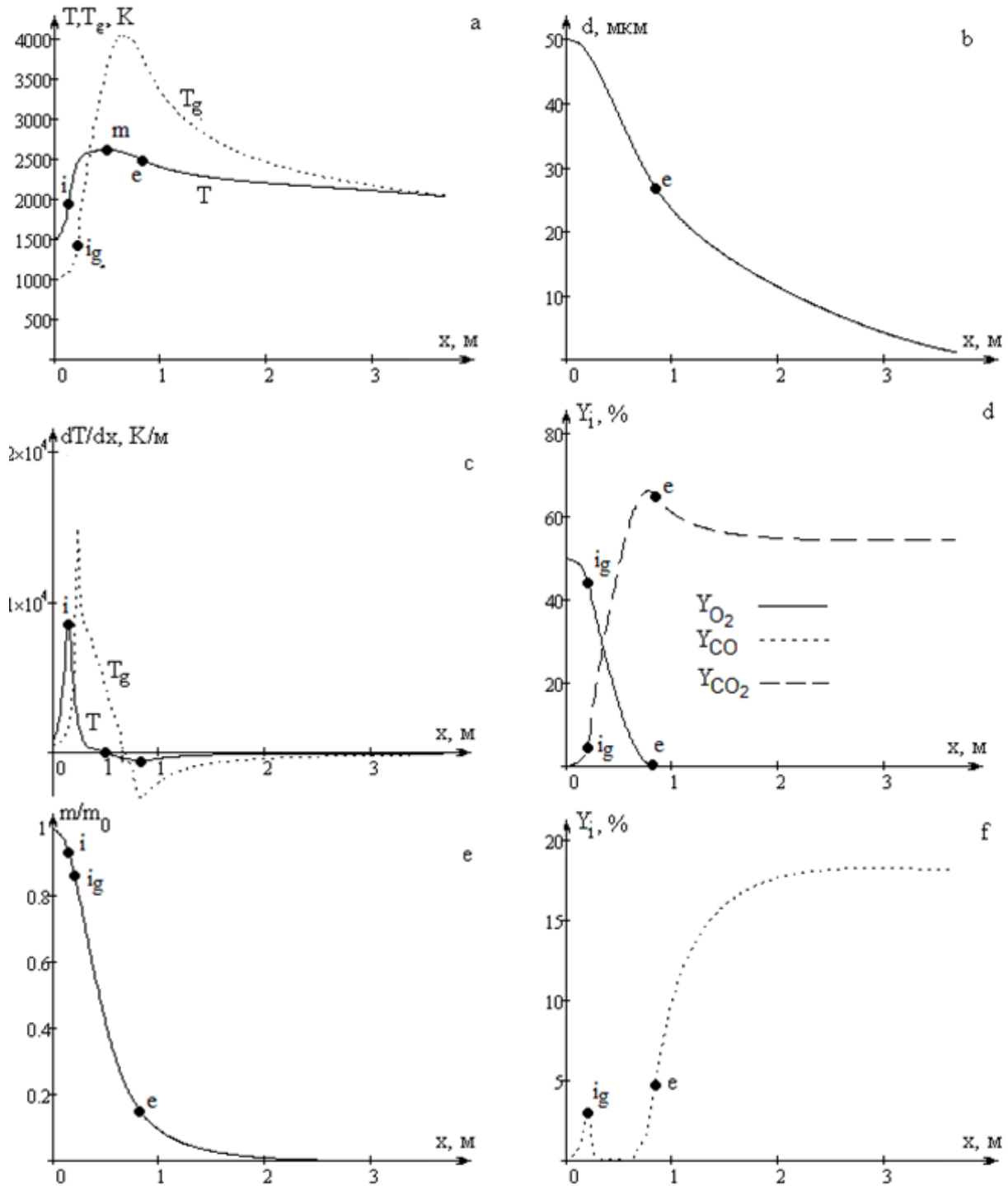
Даже для неплотной совокупности пыли с газом (рис.2) влияние гомогенной реакции окисления угарного газа существенно. При достижении газом температуры воспламенения угарного газа происходит его воспламенение, которое приводит к повышению температуры частиц и увеличению скорости их реагирования (рис. 2b, e). Однако, гомогенное окисление угарного газа при невысоких концентрациях пыли приводит к полному отсутствию угарного газа в газовой смеси (рис. 2d, f).

С повышением численной концентрации угольной пыли, а с ней и массовой концентрации, в совокупности уменьшается расстояние между частицами. При больших значениях численных и массовых концентраций в начальный момент времени коэффициент избытка кислорода может стать меньше единице (**плотная совокупность**, рис. 3). Кислорода для полного окисления углеродных частиц уже недостаточно.

В этом случае также весь процесс разделим на несколько стадий. На первой стадии (период индукции) происходит увеличение температуры частиц и газовой смеси. За счет теплоотдачи значительного количества нагретых частиц нагревания газа происходят значительно быстро. Большая концентрация частиц предопределяет в целом выгорание кислорода и выход угарного газа таким, что его часть в газовой смеси быстро увеличивается (рис. 3c) до концентрации самовоспламенения. Поэтому самовоспламенение угарного газа в пылегазовой смеси (точка  $i_g$ ) начинается практически после воспламенения коксовых частиц.

На второй стадии за счет горения частиц и  $CO$  полностью выгорает кислород в газовой смеси. В результате часть угарного газа падает практически к нулю, а углекислый газ становится основным компонентом

в смеси. Именно на этой стадии происходит основное уменьшение диаметра и массы коксовых частиц.



**Рис. 3** Профили а) температуры частицы и газа, с) градиента температур, б) диаметра и е) массы частицы, d) и f) концентраций компонент в азотно-кислородной смеси с  $Y_{O_2,0} = 0.5$ , частицами антрацита АШ с  $d_b = 50$  мкм и массовой концентрацией  $C_m = 0.100$  кг/м<sup>3</sup>, относительная массовая

концентрація  $B = 30.0\%$ , численна концентрація  $C_N = 10.6 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ ).

Кривые 1 – учет гомогенной реакции окисления  $CO$  ( $T_b = 1500 \text{ K}$ )

За счет тепловыделения в гомогенной реакции температура газа начинает преобладать температуру частиц. В результате нагревания частиц газовой смесью их температура в дальнейшем уменьшается медленно. Это способствует протеканию эндотермической гетерогенной реакции, что после точки  $e$  (начало третьей стадии – газификации частиц) является основной.

Для значительных массовых концентраций горючего характерное значение коэффициента излишка кислорода в газе меньше единицы. Уменьшение концентрации кислорода приводит к падению температуры горения с ростом концентрации частиц. Недостаточность кислорода приводит к росту диаметра углеродных частиц при самовольном погасании. Частицы практически перестают окисляться.

Таким образом, показано, что возможно осуществить зажигание угольных частиц в нагретой азотно-кислородной смеси. При этом времена индукции горения частиц происходит за малое время. Это позволяет сэкономить на нагреве большого количества газа. В зависимости от массовой концентрации пыли в исходной смеси можно регулировать полноту сгорания угольной пыли и газовый состав на заданном расстоянии от места смешения пыли с обогащенным кислородом нагретым воздухом. Так, получение целевого продукта для доменной плавки (угарного газа) в значительном количестве уменьшает полноту сгорания пыли. Гомогенная реакция окисления угарного газа является важным фактором, влияющим на процесс горения частицы. Так при малых концентрациях пыли эта реакция дополнительно способствует более полному выгоранию частиц, при высоких – к выгоранию кислорода и началу восстановления углерода частиц.

## Литература

1. Ефименко Г.Г. Металлургия чугуна: Учебник / Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. – Киев: Высшая школа, 1981. – 496 с.
2. Ярошевский С.Л. Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Metallurgy, 1988. – 176 с.
3. Бабич А.И., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Интенсификация использования пылеугольного топлива в доменной плавке. – К.: Техника, 1993. – 200 с.
4. Черненко А.С. Зажигание и горение частиц древесного угля в холодных азотно-кислородных смесях комнатной температуры. Часть I. Экспериментальные исследования. // Физика аэродисперсных систем. – 2014. – № 51. – С. 67-72.
5. Калинин В.В., Черненко А.С. Горение и самопроизвольное погасание пористых углеродных частиц в азотно-кислородных смесях комнатной температуры // Физика горения и взрыва. – 2013. – Т. 49, №2. – С. 80-88.

6. Kuniyoshi Ishii Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. – Eastbourne, Elsevier Science Ltd, 2000. – 325 p.

7. Чернецкий М. Ю., Дектерёв А. А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 3. – С. 37-46.

8. Гавин Л.В., Медведев В.А., Наумов В.А. Модель двухфазной турбулентной струи с учетом гетерогенного горения частиц // Физика горения и взрыва. – 1988. – № 3. – С. 1-17.

9. Основы практической теории горения / под. ред. В. В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1986.– 312 с.

10. Калинчак В.В., Зинченко Ю.А., Черненко А.С., Волошин В.С., Куземко Р.Д. Высокотемпературный массообмен и кинетика химических реакций углеродных частиц с газами // Металл и литье Украины. – 2013. – № 11. – С. 14-25.

11. Калинчак В.В. Влияние стефановского течения и конвекции на кинетику химических реакций и тепломассообмен углеродных частиц с газами // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т.74, №2. – С.51-55.

12. Калинчак В.В., Черненко А.С., Куземко Р.Д. Влияние зольности пылеугольного топлива на характеристики его сгорания в пределах фурменной зоны // Физика аэродисперсных систем. – 2016. – № 53. – С.46-60.

13. Калинчак В. В., Зинченко Ю. А., Черненко А. С., Куземко Р. Д. Влияние начальных параметров газа и частиц пылеугольного топлива на характеристики их горения в фурменном очаге// Физика аэродисперсных систем. – 2015. – № 52. – С. 47-62.

14. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

15. Теплообмен излучением: Справочник/ А.Г.Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

16. Калинчак В.В. Влияние излучения на критические режимы тепло- и массообмена при параллельных реакциях на поверхности частицы // Физика горения и взрыва. – 1994. – Т. 30, №4. – С. 63-74.