

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАКЕЛА ДОЖИГАНИЯ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ПОЛОСТИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА

А.В. Сущенко, А.С. Безчерев (ПГТУ, г. Мариуполь)

Разработана модель процесса взаимодействия струй вторичного кислорода с отходящими СО-содержащими газами в конвертере. Модель реализована в виде прикладной программы на ПЭВМ. Проведены аналитические исследования влияния ряда технологических факторов на параметры факела дожигания отходящих газов.

С момента получения первых результатов в 1957 г., проблема организации эффективного дожигания отходящих газов в полости кислородного конвертера являлась предметом многих теоретических и экспериментальных исследований, но "...до настоящего времени она не может считаться окончательно решённой" [1]. Это обусловлено сложностью и многофакторностью аналитического решения задачи оптимизации рассматриваемого процесса – с одной стороны, и трудностью проведения высокотемпературных экспериментов – с другой. В этих условиях математическое моделирование процесса с использованием современных численных методов является наиболее эффективным методом решения проблемы.

Целью настоящей работы являлась разработка одного из основных блоков комплексной математической модели процесса дожигания конвертерных газов – модели процесса взаимодействия струй вторичного кислорода с отходящими СО-содержащими газами, и проведение с её использованием аналитических исследований факела дожигания над уровнем ванны.

Математическая модель базируется на следующих положениях и допущениях. Струя окислителя (вторичного дутья, O_2+N_2) с объемным расходом $V_{0П}$, температурой t_{O_2} , объемными концентрациями кислорода a_{O_2} и азота a_{N_2} истекает в неизотермических условиях в газовую фазу ($CO+CO_2$) с температурой t_2 и объёмными концентрациями CO и CO_2 - r_{CO} и r_{CO_2} соответственно. На участке от среза сопла до некоторого сечения факела x в струю вторичного дутья эжектируется газ окружающей среды, происходят процессы тепло- и массообмена с химическими превращениями. В качестве параметра, характеризующего степень смешения истекающей струи с окружающей средой использовалась относительная присоединенная масса газа к струе, длиной l_x от среза сопла до сечения x - Δq_2 (кг/кг дутья). Степень развития поверхности тепло-и массообмена факела с окружающей

средой в конвертере определялась через величину приведенной боковой поверхности \bar{F}_ϕ ($\text{м}^2/(\text{кг дутья/с})$). Принято, что время протекания собственно химических реакций горения существенно меньше времени релаксации слоя смешения струи, т.е., что после образования слоя смешения струи исходные компоненты мгновенно реагируют между собой до термодинамического равновесия, определяемого физическими условиями в конкретной точке реагирующей струи. В результате расчетов получали осредненные по сечению x реагирующей струи параметры образующейся смеси (концентрации компонентов и температуру).

Уравнения материального (кг/кг дутья) и теплового (кДж/кг дутья) балансов реагирующей струи имеют вид:

$$1 + \Delta q_z = (g_{O_2} - \psi') + \left(\Delta q_z \cdot g_{CO} - \frac{28}{16} \Psi' \right) + \left(\Delta q_z \cdot (1 - g_{CO}) + \frac{44}{16} \Psi' \right) + g_{N_2} \quad (1)$$

$$g_{O_2} \cdot \int_{T_0}^{T_{O_2}} C_{p,O_2} dT + g_{N_2} \cdot \int_{T_0}^{T_{O_2}} C_{p,N_2} dT + \Delta q_{\Gamma} \int_{T_0}^{T_z} (g_{CO} \cdot C_{p,CO} + (1 - g_{CO}) \cdot C_{p,CO_2}) dT - \\ - \Delta H_{T_0} \cdot \Psi' = (1 + \Delta q_z) \int_{T_0}^{T_c} \sum_{i=1}^n (g'_i \cdot C_{p,i}) dT + Q_{nom}^\alpha, \quad (2)$$

где $T_0 = 298 \text{ К}$ – температура условного уровня отсчёта; ΔH_{T_0} – изменение энтальпии системы для реакции дожигания CO кислородом при температуре T_0 , кДж/кг O_2 дутья; ψ' – доля кислорода дутья, прореагировавшего на длине струи до сечения x , кг $O_2/$ кг дутья (ψ , кг $O_2/$ кг O_2 дутья); g_i и g'_i – массовые доли i -ого компонента в исходном веществе и в образовавшейся смеси; \bar{Q}_{nom} – приведенные потери теплоты через боковую поверхность факела, кДж/(кг дутья); $C_{p,i}$ – изобарная теплоёмкость i -ого компонента, кДж/(кг·К).

Величину ψ' , характеризующую степень использования кислорода дутья по реакции $2 \cdot \{CO\} + \{O_2\} = 2 \cdot \{CO_2\}$, определяли из соотношений:

$$\Psi' = g_{O_2} - g'_{O_2} \cdot (1 + \Delta q_z) \quad (3)$$

$$\Psi' = \{g'_{CO_2} \cdot (1 + \Delta q_z) - \Delta q_z \cdot (1 - g_{CO})\} / 2,75 \quad (4)$$

$$\Psi' = \{\Delta q_z \cdot g_{CO} - g'_{CO} \cdot (1 + \Delta q_z)\} / 1,75 \quad (5)$$

Для характеристики полноты протекания процессов горения в струе, помимо величины Ψ'/Ψ использовали степень дожигания α , %:

$$\alpha = \frac{100 \cdot P_{CO_2}}{P_{CO_2} + P_{CO}} = \frac{100 \cdot r_{CO_2}}{r_{CO_2} + r_{CO}} \quad (6)$$

где P_i – парциальное давление i -ого компонента в смеси.

Термодинамическое равновесие в сечении струи определяли из соотношения:

$$k_p = P_{CO_2}^2 / (P_{CO}^2 \cdot P_{O_2}) = r_{CO_2}^2 / (r_{CO}^2 \cdot r_{O_2}) / \{P \cdot (1 - r_{N_2})\}, \quad (7)$$

где $k_p \sim f(T, P)$ - константа равновесия реакции.

Для расчета величины \bar{Q}_{nom} использовали выражение:

$$Q_{nom} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{np} \cdot [T_c^4 - T_z^4] \cdot F_\phi \quad (8)$$

где σ_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_{np} - приведенная степень черноты в системе «факел - окружающая среда».

Величину Δq_z определяли с использованием зависимости [2]:

$$q_z = 1 + \Delta q_z = \frac{0,32}{1 + 0,2 \cdot M_j^2} \cdot \frac{x}{d_j} \sqrt{\frac{\mu_\infty \cdot T_o}{\mu_o \cdot T_\infty}}, \quad (9)$$

где M_j и d_j - число Маха и диаметр струи при полном её расширении; x - длина струи; μ_∞ и μ_o - молекулярные массы газов окружающей среды и дутья; T_∞ и T_o - температуры газов окружающей среды и дутья.

Для учета влияния процессов горения на эжекционные свойства струи в выражении (9) использовались условные эффективные температура и молекулярная масса газа окружающей среды [3]:

$$T_{\infty,эф.} = T_\infty + \left\{ \left(-\Delta H_{T_\infty} \right) / C_{p,\infty} \left[\frac{T_{\infty,эф.}}{T_\infty} \right] \right\} \cdot \psi', \quad (10)$$

$$\mu_{\infty,эф.} = \mu_{np.} \cdot \mu_\infty / \{ \psi \cdot \mu_\infty + (1 - \psi) \cdot \mu_{np.} \}, \quad (11)$$

где ΔH_{T_∞} - изменение энтальпии системы при протекании реакции горения в струе при температуре T_∞ ; $\mu_{np.}$ - молекулярная масса продуктов реакции горения.

Длину факела l_ϕ определяли по известному выражению [1], м:

$$l_\phi = 0,373 \sqrt{V_{O_2II}} \cdot V_{O_2II} \quad (м^3/мин). \quad (12)$$

Вышеизложенная модель была реализована в виде прикладной программы на ПЭВМ на алгоритмическом языке ВР 7.0 с использованием современных численных методов.

На рис.1 представлены результаты расчета среднеинтегральных температуры и состава газовой смеси по длине факела дожигания в газовой фазе для условий работы 160-т конвертера: расход первичного кислорода на продувку ванны $V_{O_2} = 380$ м³/мин; доля вторичного кислорода от общего $\bar{V}_{O_2II} = 5$ %; количество n_c и диаметр d_c дожигающих цилиндрических сопел равны 5 и 7 мм соответственно. На рис.2-5 представлены зависимости параметров факела дожигания от наиболее значимых параметров процесса. При этом индексами «вых», «мах» и «ср» обозначены параметры: в «выходном» сечении факела, максимальные и средние по длине факела соответственно.

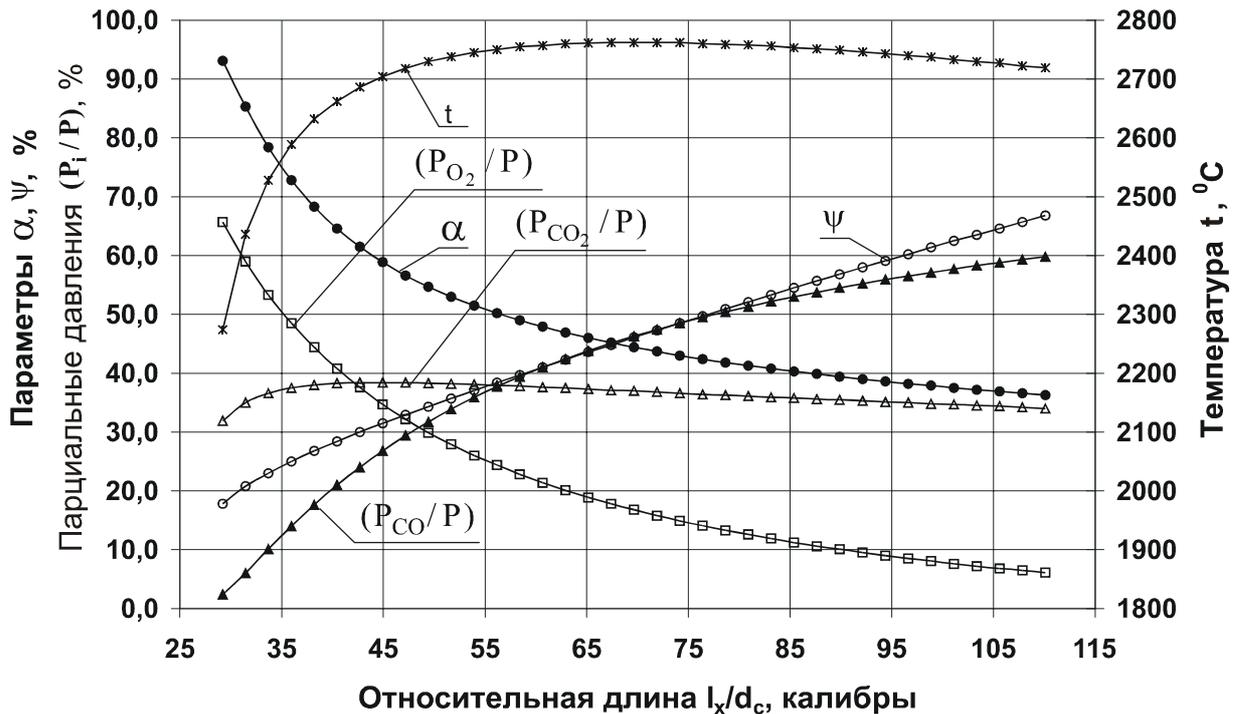


Рисунок 1 – Изменение параметров по длине факела ($P_{O_2} = 1,0$ МПа; $t_{O_2} = 25$ °С; $\bar{V}_{O_2II} = 5$ %; $a_{N_2} = 0$ %; $P_2 = 0,1$ МПа; $t_2 = 1500$ °С; $r_{CO} = 90$ %; $l_\phi/d_c = 110,1$)

Таким образом, на основании проведенных исследований разработана математическая модель процесса взаимодействия струй вторичного дутья с отходящими CO -содержащими газами над уровнем конвертерной ванны и проведены аналитические исследования влияния ряда технологических факторов на параметры факела.

Задачей дальнейших исследований является развитие разработанной модели для условий организации процесса дожигания конвертерных газов в газо-шлако-металлической эмульсии.

Литература

1. Охотский В.Б. Дожигание монооксида углерода в конвертере. Газовая динамика / В.Б.Охотский, Ю.Н. Борисов, А.Д. Зражевский и др. // Известия вузов. Черная металлургия. - 1992. - № 6. - С.4-5.
2. Капустин Е.А. О взаимодействии сверхзвуковых газовых струй с конвертерной ванной / Е.А. Капустин, А.В. Сущенко, Ф.И. Лухтура // Тепло- и массообменные процессы в ваннах сталеплавильных агрегатов. – Мариуполь, 1991. – Ч.1. – С.3-5.
3. The model of carbon oxide combustion in the oxygen jet / A.V. Sushenko, E.A. Kapustin, V.N. Logozinskaya // Abstracts of 15th International Symposium on combustion processes. Poland. Czestochova. – 1997. – P.48.

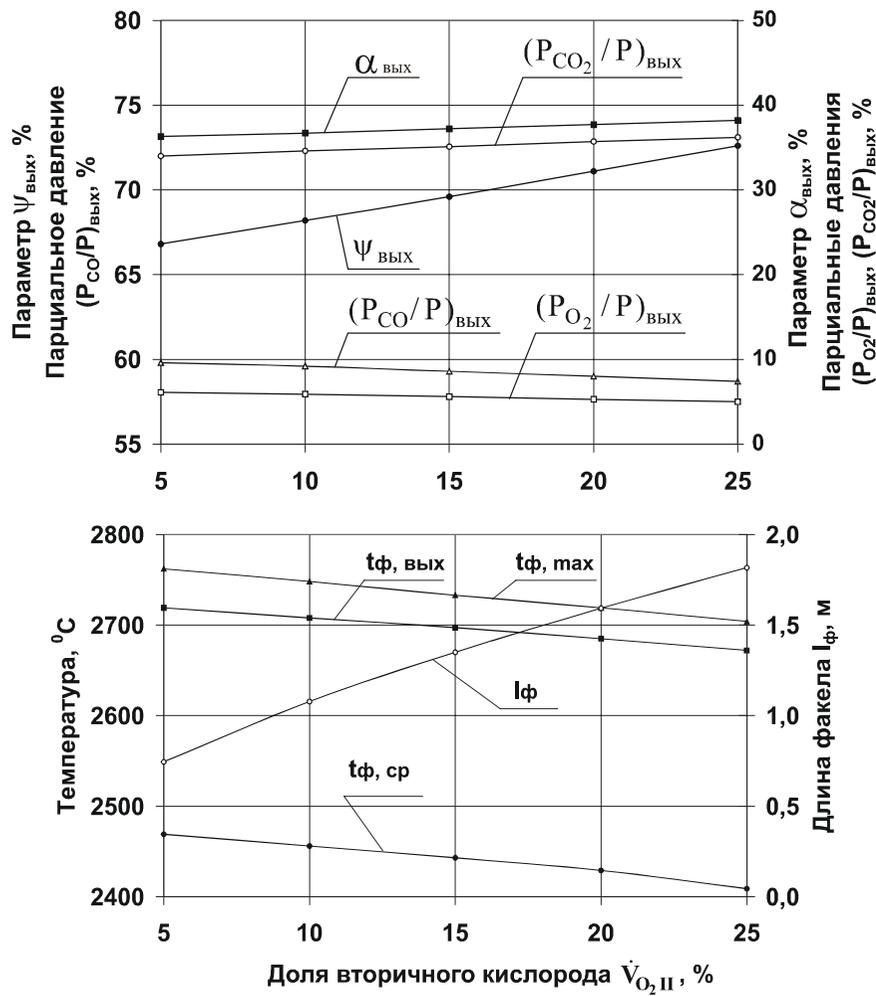


Рисунок 2 – Зависимость параметров факела от доли вторичного кислорода

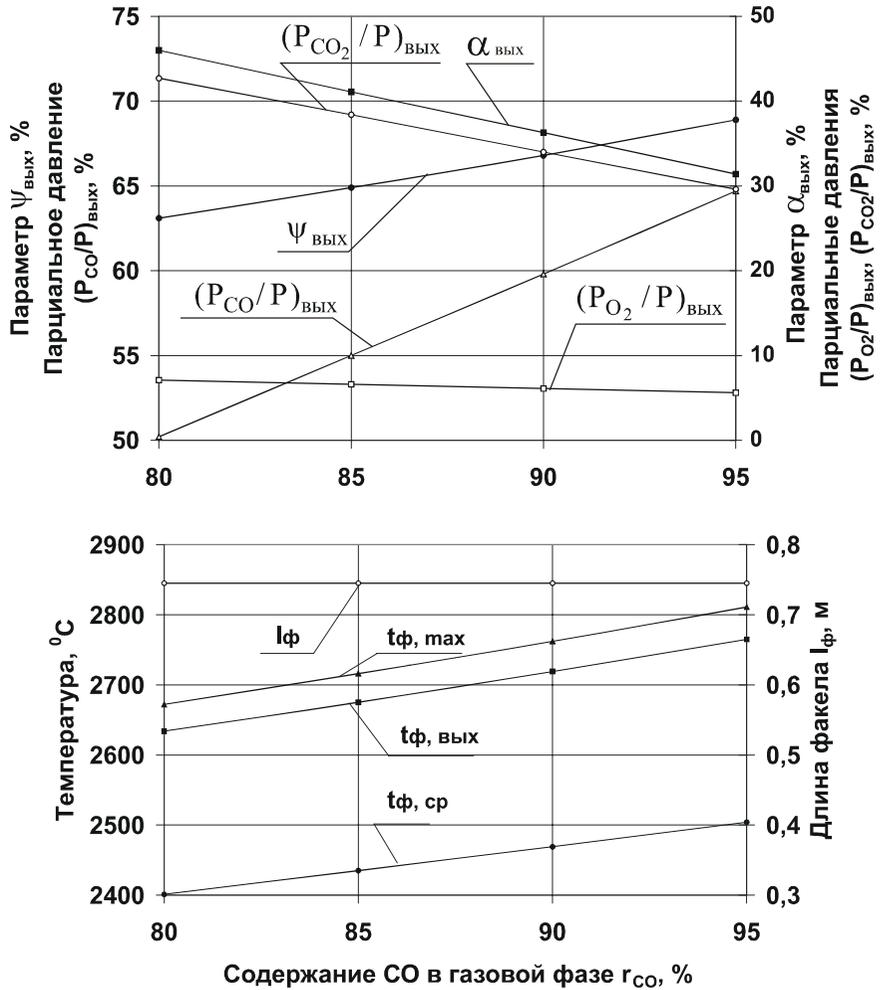


Рисунок 3 – Зависимость параметров факела от содержания СО в газовой фазе

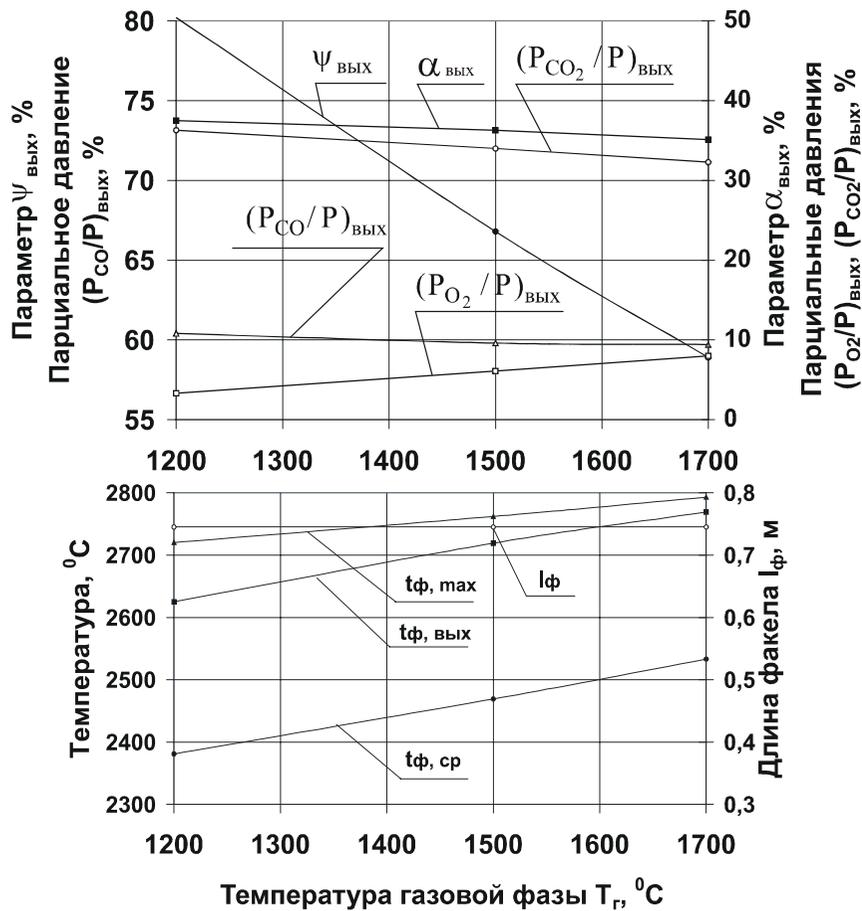


Рисунок 4 – Зависимость параметров факела от температуры газовой фазы

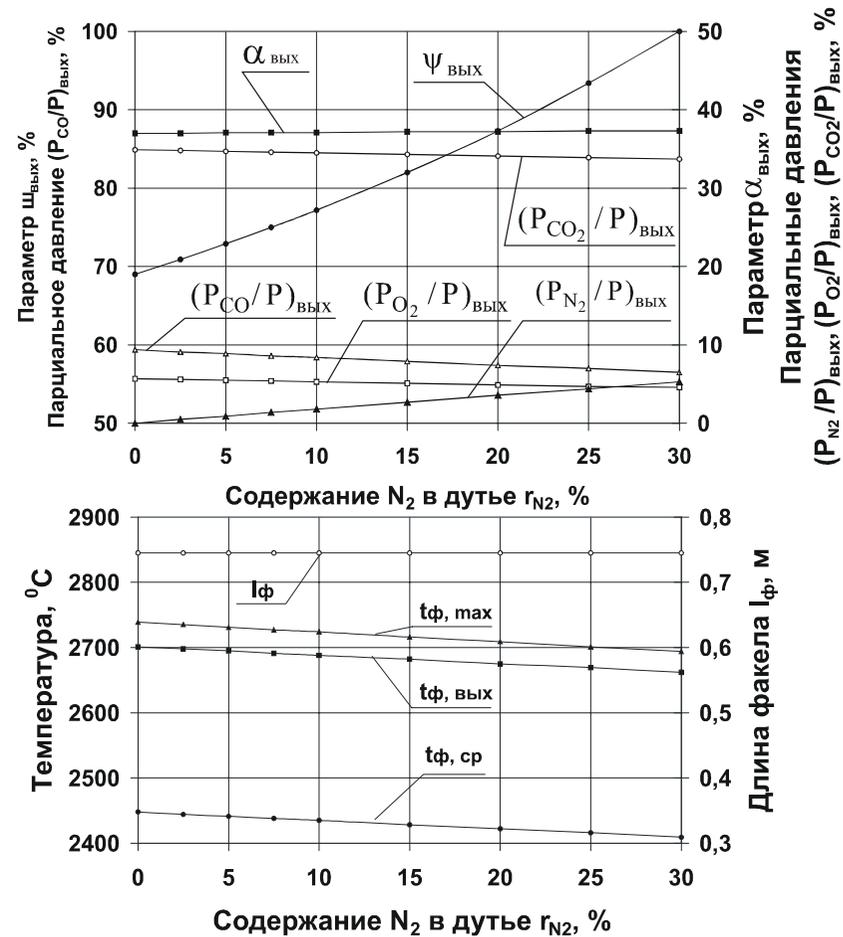


Рисунок 5 – Зависимость параметров факела от содержания азота во вторичном дутье