

СТАТЬИ

УДК 66.021.4

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ХИМИКО-ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В КОКСОВОЙ ЗОНЕ РУДНОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Бобков В.И., Никифоров В.А., Панченко С.В.

*Смоленский филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Смоленск, e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

В настоящей работе исследуются особенности протекания гетерогенных реакций при барботировании газа, выделяющегося в процессе реагирования при контакте с твердым реагентом-восстановителем, с учётом особенностей гидродинамики и тепломассопереноса при протекании реакции восстановления в коксовой зоне руднотермической печи, когда процесс осложняется образованием газовой фазы, барботирующей через расплав. Пузырьки формируют условия, интенсифицирующие перемешивание, вследствие чего активизируются химико-энерготехнологические процессы восстановления. Основной особенностью реагирования является активная диффузия реагента из-за интенсивного перемешивания, что смещает процесс восстановления в кинетическую область. Главными факторами на данном этапе выступают температура в реакционной зоне и концентрация реагента в её объеме. Реакция восстановления и образование пузырьков газа влияют на образование конвективных потоков, из-за воздействия температуры и концентрации реагента. Гидродинамические аспекты взаимного действия пузырьков газа и жидкой фазы обладают специфическими особенностями, обусловленными локальным действием на жидкую фазу. Интенсивность такого воздействия напрямую зависит от градиента газосодержания. Научно обосновано, что скорость реакции восстановления является определяющим фактором для газосодержания, а, следовательно, для перемешивания. Для описания меры воздействия газосодержания на гидродинамику уравнения фильтрации дополнены эффективными критериями, которые характеризуют зависимость реакции восстановления через тепловое и концентрационное влияние. Коэффициентов, определяющих влияние химической реакции на гидродинамику, существенно больше параметров, определяющих естественную и концентрационную конвекцию, что в действительности влияет на характер расплава в зоне реакции руднотермической печи. Содержательная постановка задачи определяется оценкой влияния малых возмущений температур и концентраций на гидродинамические аспекты фильтрующегося расплава сквозь коксовый слой. Установлено, что отличительной особенностью химико-энерготехнологических процессов восстановления является возникновение и формирование диссипативных гидродинамических структур, которые определяют теплофизические характеристики реакционной зоны восстановительного реактора, в частности температуры и концентрации реагентов. Синергетические аспекты характера реакционного объема руднотермической печи существенно влияют на возможность управления, а значит, их следует использовать и учитывать при формировании режимов функционирования электротермических восстановительных реакторов.

Ключевые слова: рудное сырьё, руднотермическая печь, реакция восстановления, температура, математическое моделирование, гидродинамика, структура, нагрев

PECULIARITIES OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER DURING ACTIVATION OF CHEMICAL AND ENERGY TECHNOLOGICAL RECOVERY PROCESSES IN COKE ZONE OF ORE-THERMAL FURNACE

Bobkov V.I., Nikiforov V.A., Panchenko S.V.

*Smolensk Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute,
Smolensk, e-mail: vovabobkoff@mail.ru*

This work examines the peculiarities of heterogeneous reactions during bubbling of gas released in the process of reaction upon contact with a solid reducing reagent, taking into account the peculiarities of hydrodynamics and heat and mass transfer during the reduction reaction in the coke zone of the ore-thermal furnace, when the process is complicated by the formation of a gas phase bubbling through the melt. Bubbles form conditions intensifying mixing, as a result of which chemical and energy technological processes of reduction are activated. The main feature of the response is the active diffusion of the reagent due to intense mixing, which shifts the reduction process to the kinetic region. The main factors at this stage are the temperature in the reaction zone and the concentration of the reagent in its volume. The reduction reaction and the formation of gas bubbles affect the formation of convective flows due to the effects of temperature and reagent concentration. Hydrodynamic aspects of the mutual effect of gas and liquid phase bubbles have specific features due to the local effect on the liquid phase. The intensity of such exposure directly depends on the GOR gradient. It has been scientifically substantiated that the reduction reaction rate is the determining factor for the gas content and therefore mixing. To describe the measure of the effect of gas content on hydrodynamics, the filtration equations are supplemented with effective criteria that characterize the dependence of the reduction reaction through thermal and concentration effects. The coefficients determining the influence of the chemical reaction on hydrodynamics are significantly greater than the parameters determining natural and concentration convection, which actually affects the nature of the melt in the reaction zone of the ore-thermal furnace. A meaningful statement of the problem is determined by assessing the effect of small temperature perturbations and concentrations on the hydrodynamic aspects of the filtered melt through the coke layer. It has been established that a distinctive feature of chemical-energy-technological reduction processes is the emergence and formation of dissipative hydrodynamic structures that determine the thermophysical characteristics of the reaction zone of the reduction reactor, in particular the temperature and concentration of reagents. Synergistic aspects of the nature of the reaction volume of the ore-thermal furnace significantly affect the possibility of control, which means that they should be used and taken into account when forming the operating modes of electrothermal reduction reactors.

Keywords: ore raw materials, ore thermal furnace, reduction reaction, temperature, mathematical modeling, hydrodynamics, structure, heating

Для энергоёмких рудотермических печей переработки рудного сырья характерны повышенные температуры расплава, в котором происходят различные химико-технологические процессы, и в частности реакции восстановления с образованием газообразной окиси углерода, барботирующей сквозь расплав [1; 2]. Всплывающие пузырьки этого газа интенсивно перемешивают жидкостный расплав. Энергетическая эффективность химико-технологических процессов гетерогенного реагирования главным образом определяется тепловыми процессами массотеплопереноса, формирующими тепловой и гидродинамический профиль реактора, а также обеспечивает поставку реагента в зону реакции [3; 4]. Прямое экспериментальное исследование электро-термических процессов затруднено трудностью доступности реакционной зоны, высокой температурой и т.д. Поэтому довольствуются фиксацией доступных извне параметров при обследовании режимов работы реакторов или изучением лишь низкотемпературных зон [5; 6]. Для численного моделирования весьма важна предварительная аналитическая оценка явлений, сопровождающих целевые процессы [7; 8].

В процессах восстановления с выделением газофазных продуктов в жидкости химические реакции зачастую определяют гидродинамическое состояние реакционного пространства [9; 10]. Ниже рассматриваются режимы реагирующей многофазной среды, где интенсивность процессов энергообмена во многом определяется барботирующими продуктами реакции в газофазной форме.

Качественный и количественный анализ особенностей теплоэнергетического и гидродинамического профиля высокотемпературной зоны протекания гетерогенных реакций рудотермической печи и расплава реагирующего рудного сырья, барботируемого газообразными продуктами реакций восстановления в виде пузырьков, позволяет описывать гидродинамику и теплоперенос системой дифференциальных уравнений с частными производными [11; 12].

Считается, что движение жидкой фазы провоцируется разностью плотностей жидкости за счет температуры, концентрации реагента и наличия газовой фазы в виде пузырьков [13; 14]. Рассматриваемая система представляется двумерной структурой: высотой H и шириной L , в виде дисперсного рудного шихтового материала с порозностью ε и жидкофазного расплава [15].

Цель работы заключается в математическом описании и расчёте характеристик конвективных потоков, формирующихся из-за изменения плотности, и влияния этих характеристик на теплоэнергетический и гидродинамический профиль высокотемпературной зоны рудотермической печи, где протекают эндотермические гетерогенные реакции восстановления.

Материал и методы исследования

Уравнения, описывающие движение фильтрующейся жидкости, перенос массы, тепла и газовой фазы в виде пузырьков, записываются в безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \nabla v &= 0, \\ \frac{1}{\sigma \text{Pr}^*} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= \\ &= -\nabla p + (\mathbf{Ra}_\theta \theta + \mathbf{Ra}_c c + \mathbf{Ra}_\varphi \varphi_g) \bar{y} - \bar{v} + \frac{F_s}{\text{Pr}_p} \bar{v} |\bar{v}|, \\ \frac{1}{\sigma} \frac{\partial c}{\partial t} &= -\bar{v} \nabla c + \text{Le} \nabla^2 c + \mathbf{Da} \omega_R(c, \theta), \quad (1) \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} &= -\bar{v} \nabla \theta + \nabla^2 \theta + \mathbf{Da} B \omega_R(c, \theta) + Q, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\bar{v} \nabla N + D_N \Delta N + \omega_R(c, \theta) \gamma_{g1} / (\rho_g V_b),$$

здесь c – степень превращения, $c = 1 - C^*/C_0^*$, здесь C^* и C_0^* – концентрации, конечная и начальная соответственно; t – безразмерное время $t = (t^* a^*) / (H^2 \sigma)$, здесь t^* – время, s ; a^* – температуропроводность, m^2/s ; σ – соотношение теплоемкостей $\sigma = 1 + (\rho_s C_{ps} (1 - \varepsilon)) / (\rho_l C_{pl} \varepsilon)$; ρ_s, ρ_l – плотности носителя, твердого и жидкого соответственно; C_{ps}, C_{pl} – теплоемкости твердого и жидкого носителя; ε – порозность; Le – безразмерный критерий Льюиса, $\text{Le} = D_e / a^*$, где D_e – коэффициент эффективной диффузии; \mathbf{Da} – безразмерный критерий Дамкеллера, $\mathbf{Da} = (k_0 \exp(-\gamma) L^2 C_0^{n-1}) / (\varepsilon a^*)$, k_0 – предэкспоненциальный множитель, $\gamma = E / RT_0$ – безразмерная энергия активации, T – температура, R – универсальная газовая постоянная, индекс $\langle 0 \rangle$ обозначает начальные значения, $\langle n \rangle$ – порядок реакции; θ – безразмерная температура, $\theta = \gamma (T - T_0) / T_0$; B – безразмерный тепловой эффект реакции, $B = (Q_R C_{ps} \gamma) / (\rho_l C_{pl} T_0)$; N – количество пузырьков; D_N – коэффициент диффузии пузырьков; V_b – объём пузырьков, $p = (p^* k) / (\mu_l a^*)$, где p^* – давление, Па;

k – коэффициент проницаемости; μ_l – динамическая вязкость жидкости, Па с; $\mathbf{Pr}^* = \nu_l H^2 / (ka^*)$, \mathbf{Pr}^* – критерий Дарси;

$$\mathbf{Ra}_\theta = \beta_0 g k H (T_0 / \gamma) / (\nu a^*),$$

$$\mathbf{Ra}_c = \beta_c g k H (T_0 / \gamma) / (\nu a^*),$$

$$\mathbf{Ra}_\varphi = \beta_\varphi g k H (T_0 / \gamma) / (\nu a^*).$$

$\beta_c, \beta_\varphi, \beta_0$ – коэффициенты объемного расширения массового, термического и газофазного, с учётом изменения плотности из-за наличия газовой фазы.

Граничные условия имеют вид: $c = \theta = 0$, при $y = 0$. $n \nabla c = n \nabla \theta = 0$ для всех границ, а у боковой стенки рудотермической печи $nv = 0$.

Учитывая малость коэффициента диффузии пузырьков D_N и градиента ∇N , уравнение переноса газовой фазы представим следующими соотношениями:

$$\frac{\partial N}{\partial t^*} \approx \omega_R(c, \theta) \gamma_{g1} / (\rho_g V_g),$$

$$N \approx \int \omega_R(c, \theta) \gamma_{g1} / (\rho_g V_g) dt. \quad (2)$$

Отсюда получим $\varphi_g \approx \omega_R \gamma_g \tau_R / \rho_g$, где τ_R – время пребывания пузырьков в слое.

$$\omega_R(c, \theta) = \frac{\partial c}{\partial t} = k_0 S (1 - c)^n \exp \left[\frac{\theta}{1 + \theta / \gamma} \right] \quad (3)$$

$$0 = -\nabla p + (\mathbf{Ra}_\theta \theta + \mathbf{Ra}_c c + \mathbf{Ra}_\varphi (k_0 S \gamma_g \tau_R / \rho_g) (a - ac + b\theta - bc\theta)) \vec{y} - \vec{v}.$$

Или при использовании возмущенной и линеаризованной формы:

$$0 = -\nabla p_1 + ((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi (k_0 S \gamma_g \tau_R / \rho_g) \omega_\theta) \theta_1 + (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi (k_0 S \gamma_g \tau_R / \rho_g) \omega_c) c_1) \vec{y} - \vec{v}_1. \quad (5)$$

Используя оператор rot в уравнении движения для условий равновесия, то есть при скорости равной нулю, можно доказать одномерность по оси Oy распределения температур и концентраций. Зависимости температур и концентраций в равновесных условиях получаются экспоненциальными, в диапазоне температур от T_0 до T_1 . Температурное и концентрационное поле в состоянии равновесия аппроксимируем линейной зависимостью, например для температуры: $T = T_1 - \beta y$, $\beta = (T_1 - T_0) / H$.

После использования возмущенных компонент линеаризованные уравнения примут вид:

$$\nabla \vec{v} = 0$$

$$((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \theta_1 + (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) c_1) \vec{y} - \vec{v}_1 - \nabla p_1 = 0$$

$$\mathbf{Le} \nabla^2 c_1 + (Fk / B) (\omega_\theta \theta_1 + \omega_c c_1) - \vec{v}_0 \vec{\nabla} c_1 - \vec{v}_1 \vec{\nabla} c_0 = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 \theta_1 + Fk (\omega_\theta \theta_1 + \omega_c c_1) - \vec{v}_0 \nabla \theta_1 - \vec{v}_1 \nabla \theta_0 = 0$$

$$R_\varphi = k_0 S \gamma_g \tau_R / \rho_g, \quad \omega_\theta, \omega_c - \text{коэффициенты, при разложении в ряд.}$$

Учитывая гетерогенную реакцию восстановления, как реакцию первого порядка, и раскладывая экспоненту в ряд до первого порядка, получим соотношение:

$$\begin{aligned} \omega_R(c, \theta) &= \frac{\partial c}{\partial t} \approx k_0 S (1 - c) (a + b\theta) = k S a - ac - b c \\ &= k_0 S (a - ac + b\theta - bc\theta), \quad (4) \end{aligned}$$

а тогда:

$$\varphi_g \approx (k_0 S \gamma_g \tau_R / \rho_g) (a - ac + b\theta - bc\theta).$$

Решение такой задачи даже численно представляет собой определенную трудность.

Для аналитического исследования поведения этой системы сделаем ряд упрощений. Рассмотрим слой, находящийся между горизонтальными плоскостями с температурами T_0 и T_1 . Предполагая поставленную задачу стационарной и двумерной, учитывая, что скорость фильтрации жидкости невысокая, в уравнении движения можно пренебречь нелинейностью. Учитывая небольшие отклонения величин, входящих в уравнения, получим соотношения для:

$$v = v_0 + v_1, \quad \theta = \theta_0 + \theta_1, \quad c = c_0 + c_1.$$

А в состоянии равновесия принимаем равенство: $v = 0$.

Уравнение для фильтрации записываем в виде:

Описывая функцию тока ψ уравнениями: $v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v_y = -\frac{1}{\alpha} \frac{\partial \psi}{\partial x}$, получим упрощенную запись для уравнений движения:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} + v_x = 0, \quad (\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \theta_1 + (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) c_1 - v_y - \frac{\partial p}{\partial y} = 0.$$

И после исключения давления систему уравнений представим в форме:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{1}{\alpha} \left((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \frac{\partial \theta_1}{\partial x} + (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \frac{\partial c_1}{\partial x} \right) &= 0, \\ \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \psi}{\partial x} + Fk (\omega_\theta \theta_1 + \omega_c c_1) &= 0, \\ \frac{\partial^2 c_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_1}{\partial y^2} - \frac{1}{\mathbf{Le} \alpha} \frac{\partial \psi}{\partial x} + (Fk / \mathbf{Le} B) (\omega_\theta \theta_1 + \omega_c c_1) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

С учётом затухающих возмущений на границах, не покидающих рассматриваемую область, удаётся записать граничные условия в виде:

$$\begin{aligned} x=0, \quad 0 < y < 1, \quad \theta_1 = 0, \quad c_1 = 0, \quad \psi = 0; \quad x=1, \quad 0 < y < 1, \quad \theta_1 = 0, \quad c_1 = 0, \quad \psi = 0; \\ y=0, \quad 0 < x < 1, \quad \theta_1 = 0, \quad c_1 = 0, \quad \psi = 0; \quad y=1, \quad 0 < x < 1, \quad \theta_1 = 0, \quad c_1 = 0, \quad \psi = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Анализируя зависимость решений системы (7) от малых возмущений, будем строить решение, удовлетворяющее граничным условиям, следующим образом:

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n \sin n\pi y, \quad \theta_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n \sin n\pi y, \quad c_1 = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin n\pi y, \quad (9)$$

где ψ_n, θ_n, c_n – функции от x .

Подставляя выражения (5.9) в уравнения (5.7), получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \psi_n}{dx^2} - n^2 \pi^2 \psi_n + \frac{1}{\alpha} \left((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \frac{d\theta_n}{dx} + (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \frac{dc_n}{dx} \right) &= 0, \\ \frac{d^2 \theta_n}{dx^2} - n^2 \pi^2 \theta_n - \frac{d\psi_n}{dx} + Fk (\omega_\theta \theta_n + \omega_c c_n) &= 0, \\ \frac{d^2 c_n}{dx^2} - n^2 \pi^2 c_n - \frac{1}{\mathbf{Le} \alpha} \frac{d\psi_n}{dx} + \frac{Fk}{\mathbf{Le} B} (\omega_\theta \theta_n + \omega_c c_n) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

С граничными условиями:

$$\psi_n(0) = \psi_n(1) = 0, \quad \theta_n(0) = \theta_n(1) = 0, \quad c_n(0) = c_n(1) = 0. \quad (11)$$

Из исходной системы уравнений (10) сформируем дифференциальное уравнение четвертого порядка относительно ψ_n , для этого первое уравнение системы (10) продифференцируем дважды по x и получим:

$$\frac{d^4 \psi_n}{dx^4} - n^2 \pi^2 \frac{d^2 \psi_n}{dx^2} + \frac{1}{\alpha} \left((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \frac{d^3 \theta_n}{dx^3} + (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \frac{d^3 c_n}{dx^3} \right) = 0 \quad (12)$$

Уравнения второго порядка для θ_n и c_n системы (10) дифференцируем по x :

$$\begin{aligned} \frac{d^3 \theta_n}{dx^3} - n^2 \pi^2 \frac{d\theta_n}{dx} - \frac{d^2 \psi_n}{dx^2} + Fk \left(\omega_\theta \frac{d\theta_n}{dx} + \omega_c \frac{dc_n}{dx} \right) &= 0 \\ \frac{d^3 c_n}{dx^3} - n^2 \pi^2 \frac{dc_n}{dx} - \frac{1}{\mathbf{Le} \alpha} \frac{d^2 \psi_n}{dx^2} + \frac{Fk}{\mathbf{Le} B} \left(\omega_\theta \frac{d\theta_n}{dx} + \omega_c \frac{dc_n}{dx} \right) &= 0 \end{aligned}$$

Подставляя выражения производных третьего порядка в уравнение (12) для функции тока:

$$\frac{d^4 \Psi_n}{dx^4} - n^2 \pi^2 \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2} + \frac{1}{\alpha} \left((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \left(n^2 \pi^2 \frac{d\theta_n}{dx} + \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2} \right) - Fk \left(\omega_\theta \frac{d\theta_n}{dx} + \omega_c \frac{dc_n}{dx} \right) \right) +$$

$$+ (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \left(n^2 \pi^2 \frac{dc_n}{dx} + \frac{1}{\mathbf{Le} \alpha} \frac{\partial^2 \Psi_n}{\partial x^2} - \frac{Fk}{\mathbf{Le} B} \left(\omega_\theta \frac{d\theta_n}{dx} + \omega_c \frac{dc_n}{dx} \right) \right) = 0,$$

и объединяя множители, можно выделить следующие коэффициенты системы:

$$a_{11} = \frac{1}{\alpha} \left((\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) (n^2 \pi^2 - Fk \omega_\theta) - (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \frac{Fk}{\mathbf{Le} B} \omega_\theta \right),$$

$$a_{12} = \frac{1}{\alpha} \left((\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \left(n^2 \pi^2 - \frac{Fk}{\mathbf{Le} B} \omega_c \right) - (\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) Fk \omega_c \right),$$

$$b_1 = - \left(\frac{d^4 \Psi_n}{dx^4} - n^2 \pi^2 \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2} + \frac{1}{\alpha} (\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta) \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2} + \frac{1}{\alpha} (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c) \frac{1}{\mathbf{Le}} \frac{\partial^2 \Psi_n}{\partial x^2} \right),$$

$$a_{21} = \frac{1}{\alpha} (\mathbf{Ra}_\theta + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_\theta),$$

$$a_{22} = \frac{1}{\alpha} (\mathbf{Ra}_c + \mathbf{Ra}_\varphi R_\varphi \omega_c),$$

$$b_2 = n^2 \pi^2 \Psi_n - \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2}.$$

Таким образом, получается система линейных уравнений относительно $d\theta_n/dx$, dc_n/dx . Далее, для полученных двух линейных уравнений, определяем соотношения для первых производных от температуры и концентрации, затем, подставляя в первое уравнение для функции тока, получим обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка, описывающее функции тока от x и y :

$$\frac{d^4 \Psi_n}{dx^4} + f_1 \frac{d^2 \Psi_n}{dx^2} + f_2 \Psi_n = 0. \quad (13)$$

Учитывая, что решение (13) ищется в виде: $\Psi_n = e^{px}$, записываем характеристическое уравнение как: $p^4 + f_1 p^2 + f_2 = 0$. Обоснованно заключаем, что функции тока описываются гармоническими функциями вида: $\Psi_n = C \sin(px) \sin(\pi ny)$, где C – произвольная const.

С использованием найденных функций тока определим компоненты вектора скорости \vec{v} :

$$\partial \Psi_n / \partial y = \pi n C \sin(px) \cos(\pi ny),$$

$$v_y = \partial \Psi_n / \partial x = p C \cos(px) \sin(\pi ny).$$

Траектория движения газовой фазы математически описывается уравнениями: $dx/d\tau = v_x$, $dy/d\tau = v_y$, а траектория движения представляется равенством:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{\pi n C}{p C} \operatorname{tg}(px) \cdot \operatorname{ctg}(\pi ny).$$

Решением этого уравнения будет соотношение: $\sin(px) \sin(\pi ny) = Tr$, здесь: $Tr = \text{const}$, которую можно найти из начальных условий.

Результаты исследования и их обсуждение

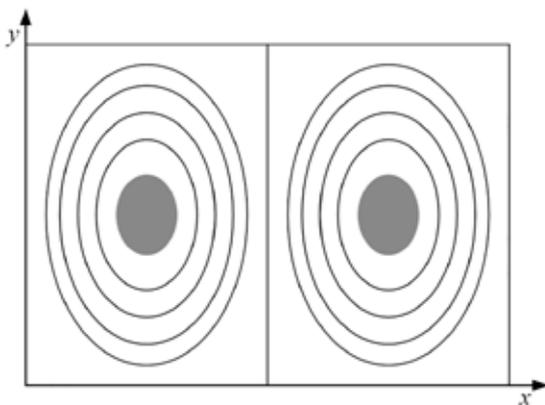
Важное значение имеют изолинии, в которых $Tr = 0$. Эти изолинии определяются уравнениями:

$$\pi ny / H = \pi m_1, \quad y = m_1 H / n,$$

$$px / L = \pi m_2, \quad x = m_2 \pi L / p,$$

где $m_1, m_2 \in \mathbf{Z}$.

Такие прямые делят зону реакций на множество отдельных ячеек. Жидкая фаза в виде расплава движется в этих ячейках, не покидая их пределов, так как компоненты скорости на границах ячеек равны нулю, то есть траектории движения жидкой фазы границ ячеек не пересекает (рисунок).



Структура траекторий движения жидкой фазы расплава в ячейке

Для каждой отдельной ячейки жидкая фаза движется внутри по замкнутой траектории вокруг ядра, внутри которого расплав неподвижен. Обнаруженная картина движения расплава в зоне гетерогенной реакции рудотермической печи качественно доказывает существование диссипативных структур в гидродинамических структурах. Она позволяет оценивать режим функционирования рудотермической печи, который образует вихревые потоки, формирующиеся под воздействием пузырьков газа. Пузырьки газообразной фазы барботируют сквозь жидкофазную среду расплава реакционной зоны рудотермической печи и интенсифицируют перемешивание и, как следствие, теплообменные и химико-энерготехнологические термически активируемые процессы.

Заключение

Установлено, что в реакционной зоне восстановительного реактора за счет образования газовой фазы возникают дополнительные факторы, влияющие на изменение плотности жидкой фазы и изменения архимедовой составляющей, значительно превосходящей по величине концентрационную и температурную. Поскольку скорость образования пузырьков и их количество зависят от температуры и концентрации, процессы перемешивания и энергообмена являются взаимосвязанными.

Перемешивание является способом подачи массы реагента и повышения эффективности целевых процессов. Научно обосновано, что формирование микровихрей в ячеистой структуре реакционной зоны – интенсифицирует теплообменные и химико-энерготехнологические термически активируемые процессы.

При увеличении эквивалентного критерия Релея возникают новые траектории конвективного движения, что изменяет упорядоченное движение конвективных потоков и обеспечивает неустойчивость конвективного движения жидкой фазы расплава. Такой режим образует беспорядочный или турбулентный профиль движения жидкой фазы даже для систем, функционирующих в ограниченном объеме. Учет синергетических возможностей в такого рода системах позволяет программировать управляющие воздействия и более корректно обеспечивать достижение эффективного воздействия на целевые процессы.

Выводы

1. Показан механизм воздействия пузырьков газовой фазы, образующейся при протекании восстановительной реакции, на гидродинамику реакционной зоны.
2. Скорость реакции для линеаризованной экспоненты, представленная для возмущенных компонентов, сводит результирующее действие к сумме действия температуры и концентрации.
3. Получено, что воздействие газовой фазы сводится к воздействию температуры и концентрации, но это воздействие существенно эффективней.
4. Аналитически показано существование гидродинамических диссипативных структур, обеспечивающих перемешивание реагирующего расплава в реакционной зоне.
5. Таким образом, интенсифицирующее воздействие на процессы массопереноса заключается в основном за счет самой реакции восстановления, и, зная механизм воздействия, есть возможность рационально управлять такими процессами.

Разработанная гидродинамическая модель формирования микрослоя и его реагирования при контакте с твердым реагентом-восстановителем и анализ закономерностей протекания гетерогенных реакций при барботировании газа, выделяющегося в процессе реакций, учитывает полученные соотношения для критических условий массопереноса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00335, <https://rscf.ru/project/22-11-00335/>.

Список литературы

1. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности проведения экспериментального обследования температурного режима функционирования обжиговой конвейерной машины // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 100-105.
2. Пучков А.Ю., Лобанева Е.И., Култыгин О.П. Алгоритм прогнозирования параметров системы переработки отходов апатит-нефелиновых руд // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 1.
3. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 1. С. 11-22.
4. Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимов Н.Н. Компьютерная программа для моделирования показателей технического состояния электромеханических систем // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 105-119.
5. Новичихин А.В., Шорохова А.В. Процедуры управления поэтапной переработкой железорудных отходов горнопромышленных районов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 60. № 7. С. 565-572.
6. Бобков В.И. Энергосбережение в технологии сушки материала в плотном слое на основе интенсификации тепло-массообмена // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12-4. С. 585-589.
7. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В. Определение комкуемости железорудной шихты с целью прогнозирования прочностных свойств окатышей // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 8. С. 53-57.
8. Ильин И.В., Лёвина А.И., Калязина С.Е. Function-oriented approach to mining enterprise automation // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 2. С. 5-19.
9. Tian Y., Qin G., Zhang Y., Zhao L., Yang T. Experimental research on pellet production with boron-containing concentrate // Characterization of Minerals, Metals, and Materials. 2020. P. 91-102.
10. Бобков В.И., Дли М.И., Панченко С.В. Обобщенная структурно-функциональная модель инжиниринга и управления экологически безопасной переработкой отвалов горно-обогатительных комбинатов апатит-нефелиновых руд // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 48-52.
11. Matkarimov S.T., Berdiyarov B.T., Yusupkhodjayev A.A. Technological parameters of the process of producing metallized iron concentrates from poor raw material. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. № 8(11). P. 600-603.
12. Kossoy A. Effect of thermal inertia-induced distortions of DSC data on the correctness of the kinetics evaluated. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. Т. 143. № 1. С. 599-608.
13. Kavchenkov V. P., Kavchenkova E. V., Chernenkov I. D. Modeling of the relationship between the earth population growth and the electric energy production processes. Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. No. 4 (94). P. 110-121.
14. Dli M.I., Vlasova E.A., Sokolov A.M., Morgunova E.V. Creation of a chemical-technological system digital twin using the Python language // Journal of Applied Informatics. 2021. Vol. 16. No. 1 (91). P. 22-31.
15. Бобков В.И., Орехов В.А. Исследование аэродинамики полифракционного слоя рудного сырья // Успехи современного естествознания. 2022. № 9. С. 67-72.