

БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЕЛЬЦЕВАНИИ ЦИНКОВЫХ КЕКОВ

BLOCK-MODULAR MODELING OF THE MECHANISM OF PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES OCCURRING DURING THE WELDING OF ZINC CAKES

V. Zarochentsev
A. Rutkovsky
I. Bolotaeva

Summary. The article presents the results of a study of the wetting process. Based on the analysis of the wetting processes occurring in the reaction zone of the furnace, the mechanism of the process is formulated as a set of ongoing interactions and a schematic diagram of modeling this mechanism is developed. As a result of the conducted research, a mathematical and block-modular model was developed in Simulink to determine the thermodynamic temperature of the beginning of the reduction of zinc oxide with solid carbon, which made it possible to calculate the temperature conditions of the wetting process in the reaction zone of the furnace. For the selected conditions of the process, a mathematical and block-modular model was developed in Simulink, which allows calculating the stationary equilibrium state of the flows of matter, heat and chemical reactions in the reaction zone of the furnace. The solution of the developed model is obtained, which clearly demonstrates the change in the process parameters depending on the oxygen content and the flow rate of furnace gases. The developed model can be used to determine the optimal conditions for carrying out the wetting process, designing metallurgical furnaces and creating control systems based on modern information technologies.

Keywords: metallurgy, wetting, zinc oxide, carbon, mathematical model, chemical kinetics, thermodynamic temperature, modeling, block-modular model, equilibrium state.

Зароченцев Владимир Михайлович

К.т.н., доцент, доцент, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет)
vlazarm@gmail.com

Рутковский Александр Леонидович

Д.т.н., профессор, профессор, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет)
rutkowski@mail.ru

Болотаева Индира Ислановна

К.т.н., доцент, доцент, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет)
iibolotaeva@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования процесса вельцевания. На основании анализа протекающих в реакционной зоне печи вельцевания сформулирован механизм процесса как совокупность протекающих взаимодействий и разработана принципиальная схема моделирования этого механизма. В результате проведенного исследования была разработана математическая и блочно-модульная модель в Simulink для определения термодинамической температуры начала восстановления оксида цинка твердым углеродом, которая позволила рассчитать температурные условия проведения процесса вельцевания в реакционной зоне печи. Для выбранных условий протекания процесса была разработана математическая и блочно-модульная модель в Simulink, которая позволяет рассчитать стационарное равновесное состояние потоков вещества, тепла и химических реакций в реакционной зоне печи. Получено решение разработанной модели, которое наглядно демонстрирует изменение показателей процесса в зависимости от содержания кислорода и скорости потока печных газов. Разработанная модель может быть использована для определения оптимальных условий проведения процесса вельцевания, проектирования металлургических печей и создания систем управления на основе современных информационных технологий.

Ключевые слова: металлургия, вельцевание, оксид цинка, углерод, математическая модель, химическая кинетика, термодинамическая температура, моделирование, блочно-модульная модель, равновесное состояние.

Введение

Вельцевание широко применяется в металлургии цинка для переработки кеков выщелачивания и получения вельц-возгонов в основном состоящих из пыли оксида цинка [1], [2], [3]. Также вельцевание получило распространение в технологиях извлечения окиси цинка из пыли, шлаков и других промпродуктов цинкового производства [4],[5].

Для создания математического описания этого процесса, необходимо рассмотреть составляющие его компоненты, различающиеся по протекающим реакциям и особенностям их проведения во вращающейся трубчатой печи. Приведенные в литературных источниках исследования, посвящены изучению: методик составления материальных балансов [6]; теплофизики процесса вельцевания и вращающихся барабанных печей [7], [8], [9], [10]; физико-химических закономерностей процессов

протекания реакций горения топлива [11], восстановления окислов металлов [12], [13]. Совершенствованию процессов при вельцевании также посвящены многочисленные исследования по различным направлениям: утилизации тепла и повышения КПД тепловой работы печи [14], [15]; моделирования и оптимизации параметров процесса [16], [17], [18], [19]; применение новых технологий [20], [21], [22].

В современных условиях широкого применения компьютерных технологий, требуется систематизация результатов научных исследований и методов математического описания для создания компьютерных информационно-управляющих систем использующих технологии искусственного интеллекта и нейронных сетей [23], [24], и опирающихся на передовые методы математического описания металлургических процессов [25], [26], [27], [28].

Но разносторонние исследования, приведенные выше, в настоящее время невозможно объединить в единую систему в силу несовместимости между собой приведенных систем уравнений, массивов данных, методов обработки информации. Современное развитие вычислительной техники, средств управления, проектирования, управления и оптимизации процессов требует совмещения имеющихся данных с разработкой математического описания и программного обеспечения.

Для этого необходимо выделить совокупность основных физико-химических закономерностей, определяющих значимые показатели процесса вельцевания. Назовем эту совокупность физико-химическим механизмом процесса вельцевания.

В свою очередь, закономерности, образующие данный механизм, описывают физические и химические взаимодействия, протекающие в печи: горение топлива и восстановление окиси цинка, радиационный и конвективный теплообмен внутри печи, теплопередача через стенки печи в окружающую среду, тепломассоперенос с печными газами и шихтой движущимися внутри печи в режиме противотока.

Сформулируем систему ограничений, допущений и условий, необходимую для разработки математической модели:

- по типу протекающих процессов в трубчатой вращающейся печи выбираем модель идеального вытеснения с непрерывным стационарным режимом работы;
- печь разделим на зоны по длине, достаточно малые для того, чтобы их можно было рассматривать как ячейки идеального смешения;
- основными химическими реакциями, от которых зависят скорость и другие показатели процесса

- вельцевания, являются: горение коксика с образованием монооксида и диоксида углерода, восстановление оксида цинка с последующим испарением жидкого цинка, окисление паров цинка в печном газе с образованием пыли окиси цинка;
- теплопередача внутри зоны печи осуществляется в результате радиационного и конвективного обмена;
- теплообмен с окружающей средой осуществляется теплопередачей через футеровку внутренних стенок печи и конвективным теплообменом вокруг внешней стенки печи;
- шихта внутри зоны печи идеально перемешивается в результате пересыпания, вызванного вращением печи;
- химический состав и реакции в печных газах в зоне печи одинаковы по всему объему зоны не занятом сыпучим материалом;
- система уравнений математической модели должна обеспечивать соблюдение балансов материальных и тепловых потоков, а также иметь возможность решения аналитически или численными методами с получением значений адекватным описываемым процессам.

Принципиальная схема разработки модели вельцевания в реакционной зоне печи приведена на рисунке 1. Приведем ниже краткое описание основных блоков этой схемы.

На основании литературных источников механизм процесса представленный на рисунке 1 включает в себя: закономерности описания материальных балансов потоков веществ в газах и шихте, которые движутся в печи в режиме противотока; уравнения материального баланса химических реакций восстановления оксиде цинка; испарения и окисления цинка; горения топлива с выделением тепла и образованием восстановительной атмосферы в слое шихты; Закономерностей теплообмена внутри печи и теплопередачи через футеровку в окружающую среду.

Из полученного математического описания необходимо выделить систему n ведущих математических уравнений, которые не поддаются аналитическому решению и содержат n неизвестных ключевых параметров, определение численных значений которых, будет являться решением данной системы уравнений.

Решение такой модели возможно осуществить численными методами с получением заданной необходимой точности решения. При этом все остальные неизвестные параметры определяются из аналитических соотношений при подстановке полученного решения. Для решения модели составляется блочно-модульная схема, в данной работе с помощью среды Simulink с ис-

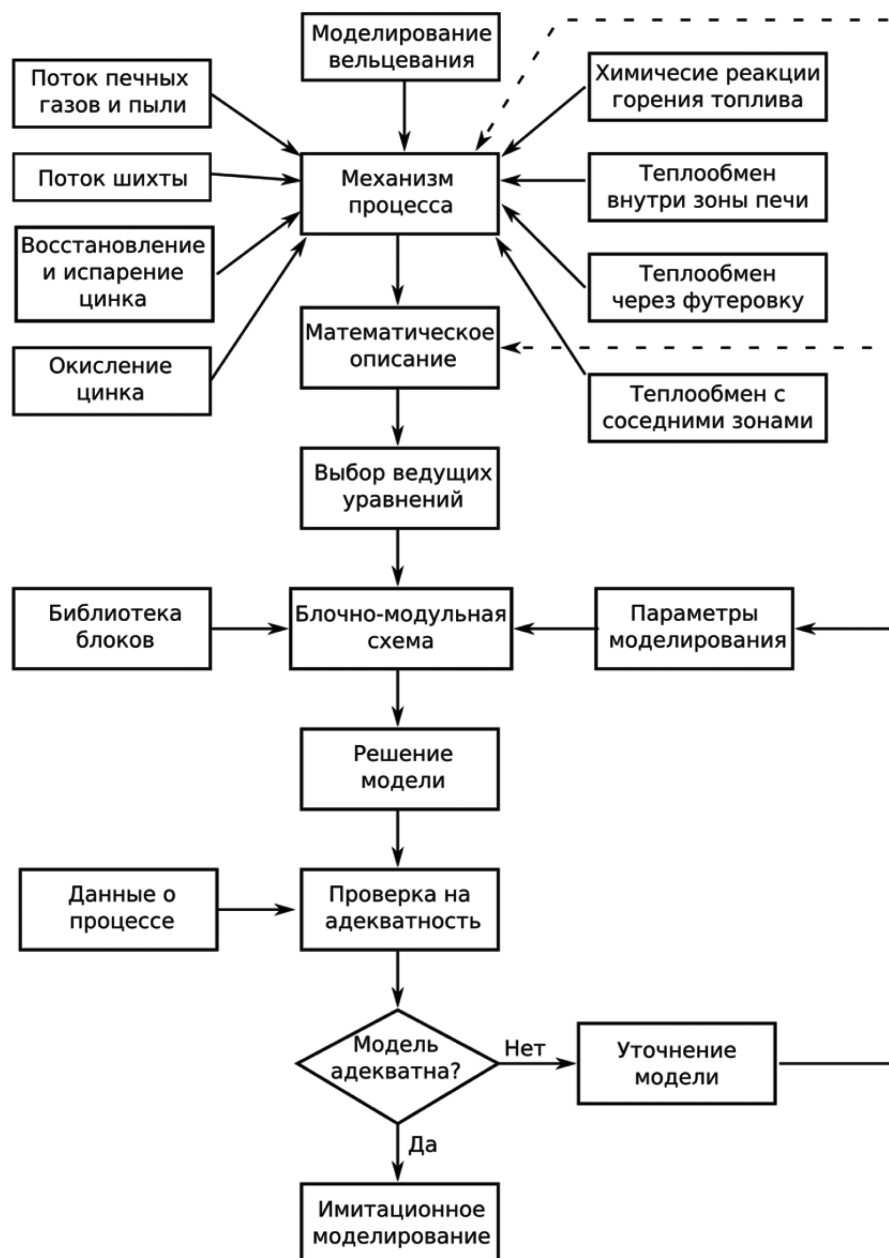


Рис. 1. Принципиальная схема моделирования механизма процесса вельцевания

пользование встроенных библиотек блоков и имеющих данные о входных параметрах процесса и коэффициентах математических уравнений. Модулями в этой схеме являются подсистемы из блоков Simulink вычисляющие основные уравнения математической модели

Проверка на адекватность модели осуществляется по имеющимся производственным, экспериментальным или литературным данным о процессе. Если по результатам проверки, модель можно считать адекватной, то она может быть использована для решения дальнейших задач имитационного моделирования, управления, проектирования и оптимизации процесса. Если адекватность модели недостаточна, то проводится уточнение модели

с помощью корректировки входных и внутренних параметров, или проводится изменение математического описания и механизма процесса.

Моделирование механизма процесса

Для моделирования выберем область печи, в которой протекает реакция восстановления оксида цинка длиной d . Разработка математической модели основывается на уравнениях материального и теплового баланса в выбранной i -й зоне печи в стационарных условиях. На рисунке 2 показана схема движения сыпучего материала шихты и печных газов в зонах печи вельцевания. Шихта и газы движутся в режиме противотока. Шихта

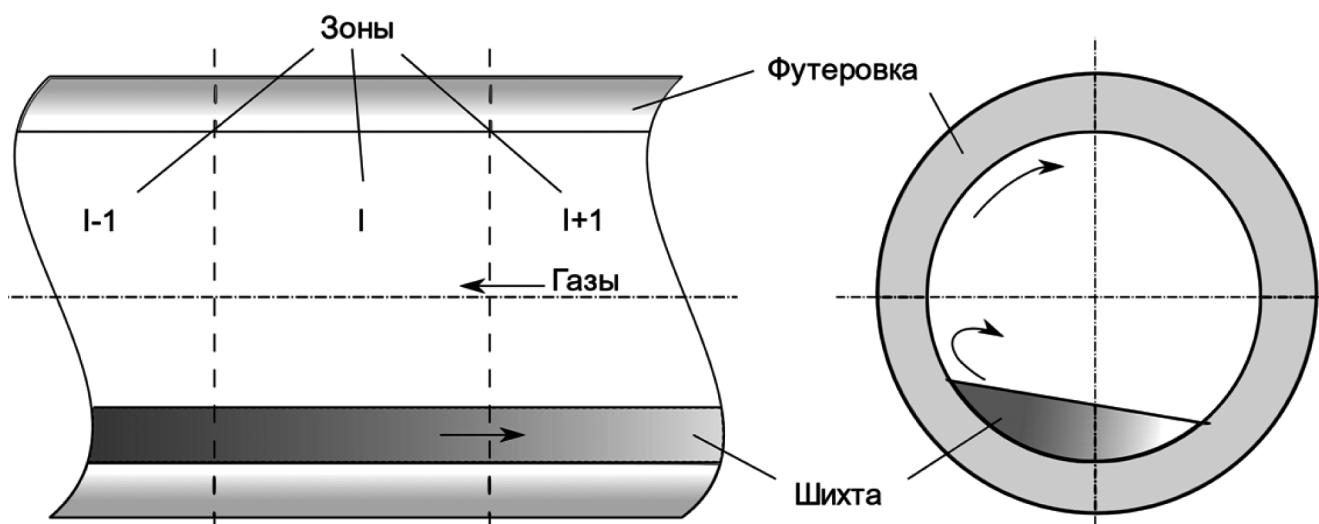


Рис. 2. Схема движения шихты и печных газов в зонах печи вальцевания

перемешивается в результате вращения, и движется в направлении наклона трубчатой печи. Теплообмен с окружающей средой осуществляется через футеровку. Состав газов и шихты изменяется в результате процессов протекающих на реакционной поверхности шихты. Теплопередача внутри печи между газом, шихтой и футеровкой осуществляется в результате радиационного и конвективного обмена.

Для создания модели были выбраны следующие основные химические реакции протекающие при вальцевании:

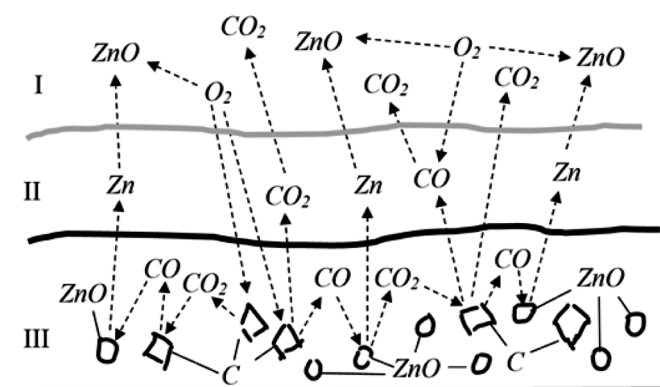
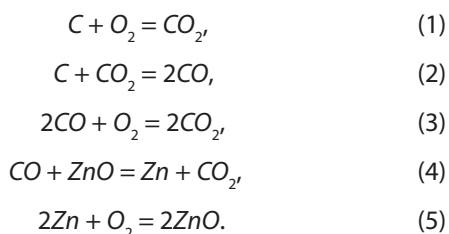


Рис. 3. Схема химических взаимодействий в печи вальцевания.

I — Пылегазовый поток, зона окисления; II — защитный слой газов с низким содержанием кислорода; III — шихта, зона восстановления и испарения цинка

Наибольшее тепловыделение происходит в результате горения коксика по реакции (1) и дожига монооксида углерода (3). Восстановленный по реакции (4) цинк, испаряется и затем окисляется по реакции (5) с образованием цинковой пыли уносимой с печными газами. Примерная схема химических взаимодействий показана на рис. 3.

Термодинамическая температура начала прямого восстановления оксида металла твердым углеродом по реакциям (1)–(4) при заданном внешнем давлении газовой фазы определяется парциальными образующихся газов:

$$P_{\text{реакц}} \approx P_{CO} + P_{CO_2} \geq P_{\text{внешн}} \quad (6)$$

где: P_{CO} и P_{CO_2} — давление; $P_{\text{внешн}}$ — давление окружающей среды.

Константы равновесий для реакций (20) и (22) вычисляются по следующим формулам как отношения парциальных давлений газов:

$$K_B = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}, \quad (7)$$

$$K_B = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}. \quad (8)$$

Выразим зависимость констант равновесия от температуры через энтальпию и энтропию реакции:

$$K_B(T) = \exp\left(-\frac{\Delta G_B}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta H_B^0 - T\Delta S_B^0}{RT}\right), \quad (9)$$

$$K_B(T) = \exp\left(-\frac{\Delta G_B}{RT}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta H_B^0 - T\Delta S_B^0}{RT}\right), \quad (10)$$

где: $R = 8,314$ Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная; ΔH_X^0 — энтальпия реакции $X = \{B, Б\}$; и ΔS_X^0 — энтропия реакции $X = \{B, Б\}$.

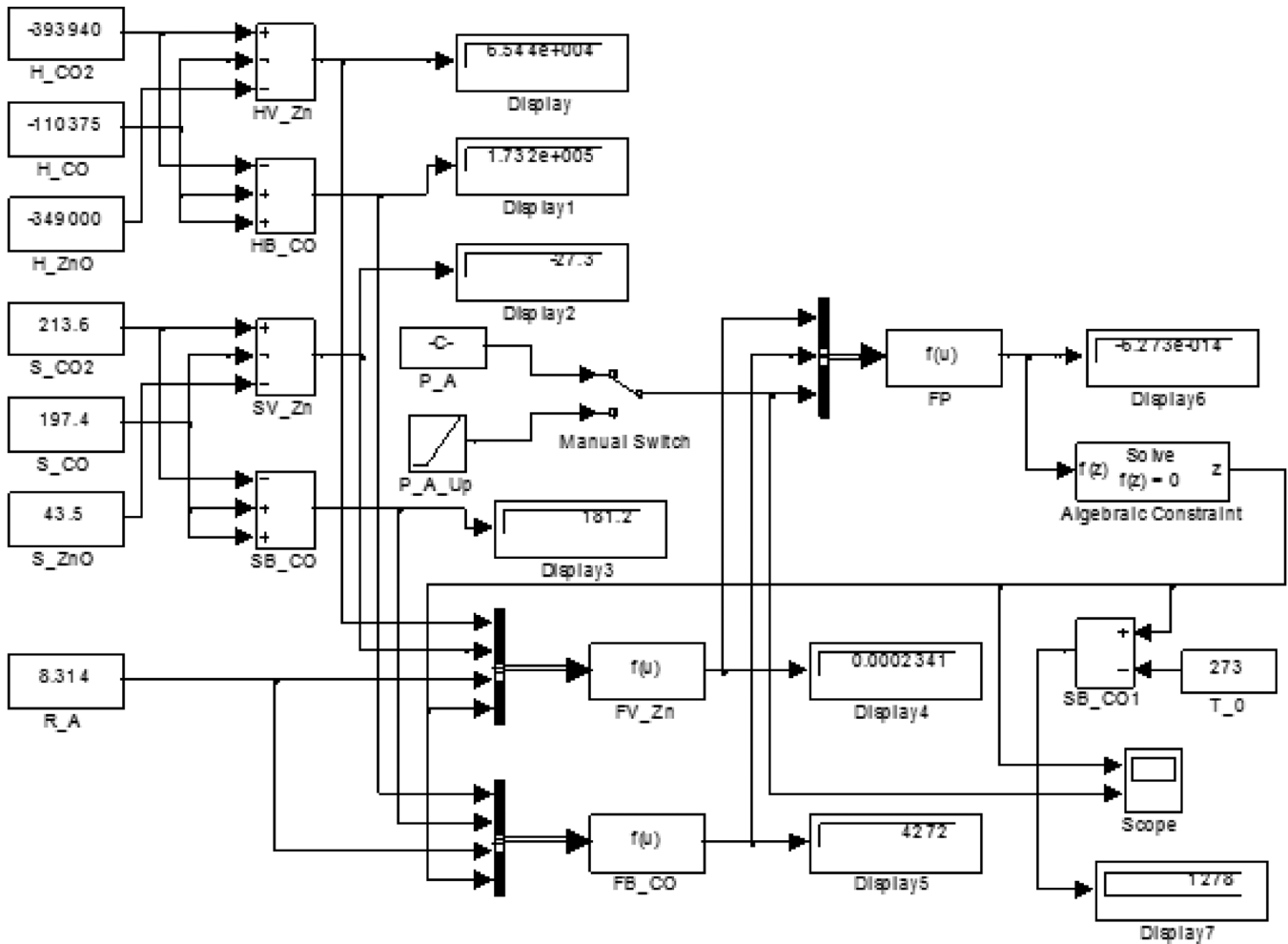


Рис. 4. Блочнo-модульная схема вычисления термодинамической температуры начала восстановления оксида металла твердым углеродом по уравнению (11). В блоке

Подставив в (6) уравнения (7)–(10) получим выражение для определения температуры начала восстановления оксида металла твердым углеродом:

$$K_B(T)K_B(T) + K_B(T)K_B(T)^2 - P = 0 \quad (11)$$

Блочнo-модульная схема решения данного уравнения в Simulink приведена на рисунке 4.

На блочно-модульной схеме (рис. 4) в левой части задаются в блоках констант термодинамические параметры для расчета уравнений (9) и (10). В блоке P_A задается постоянное значение атмосферного давления, а в блоке P_A_Up задается линейное возрастание давления окружающей среды. С помощью блока Manual Switch моделирование процесса может быть переключено в режим постоянного давления или его линейного изменения. В блоках FV_Zn и FB_CO рассчитываются уравнения (9) и (10).

Расчет уравнения (11) осуществляется в блоке FP, если полученное значение не равно нулю, то выполняет-

ся итерационный поиск численного значения температуры восстановления в блоке Algebraic Constraint до тех пор пока уравнение (11) не станет верным. Полученные значения температуры передаются в блок Scope для вывода на графике зависимости температуры от давления, приведенном на рис. 5. Для контроля рассчитанное значение температуры отображается в блоке Display7.

При давлении окружающей среды 1 атм, эта температура составляет 1278 °С. В условиях проведения вельцевания она может отличаться в связи с изменением химического состава и шихты и других факторов, поэтому для моделирования процесса был выбран интервал температур 1150–1450 0С.

Определение термодинамической температуры восстановления оксида цинка позволяет выбрать режим работы вельц-печи в зоне протекания восстановительных реакций и разработать модель процессов тепломассопереноса сопровождающегося химическими реакциями. Эта математическая модель основывается на механизме процесса, описанном выше, включающем уравнения

материального и теплового баланса в выбранной зоне печи.

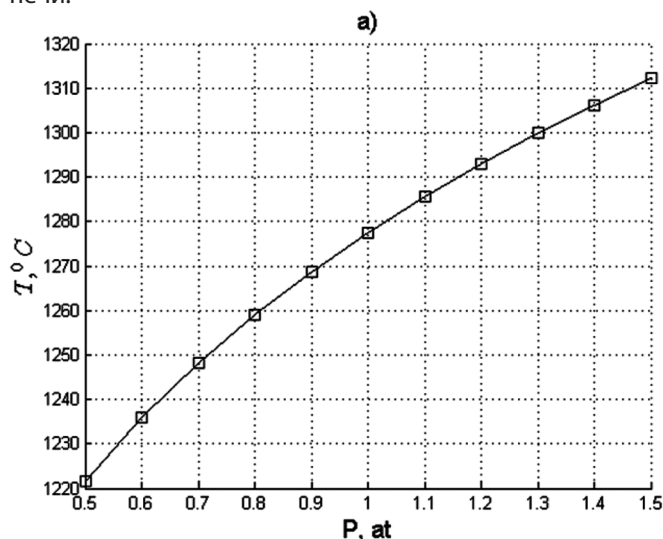


Рис. 5. График изменения термодинамической температуры начала восстановления оксида цинка твердым углеродом рассчитанный по уравнению (11)

Материальный баланс потока шихты описывается уравнением:

$$g_h^i = g_h^{i-1} - g_{hf}^i, \quad (12)$$

где: g_h^i — поток шихты в i -й зоне, кг/с; g_h^{i-1} — поток шихты на входе в i -ю зону, кг/с; g_{hf}^i — поток вещества из шихты в газы i -й зоны, кг/с.

Материальный баланс потока газов в i -й зоне описывается уравнением

$$g_f^i = g_f^{i+1} + g_{hf}^i, \quad (13)$$

где: g_f^i — поток газов в i -й зоне, кг/с; g_f^{i+1} — поток газов на входе в i -ю зону, кг/с.

Поток шихты или газов в свою очередь состоит из потоков составляющих веществ:

$$g_x^i = \sum_{j=1}^n F_{xj}^i M_j, \quad (14)$$

где: x — индекс потока шихты h или газа f ; F_{xj}^i — поток j -го вещества, моль/с; M_j — молекулярная масса j -го вещества, кг/моль; n — количество веществ в шихте и газах.

Для создания модели приняты следующие условия проведения процесса: в состав шихты входит неизменяемый твердый остаток, окись цинка и углерод в виде коксика; печные газы состоят из азота, кислорода и диоксида углерода; восстановленный цинк быстро испаряется и затем окисляется в печных газах, с которыми уносится

в виде пыли окиси цинка; монооксид углерода в печных газах практически полностью окисляется до диоксида углерода.

На основании приведенных условий, поток веществ из шихты в газы определяется химическими реакциями горения коксика (1) и восстановлением окиси цинка (4). Исходя из закономерностей химической кинетики гетерогенных реакций составим математическое описание этих потоков:

$$g_{hf}^{ZnO} = K_{ZnO}(T_f^i) P_{hco}^i \gamma_{ZnO}^i S_{hf}^i, \quad (15)$$

где: $K_{ZnO}(T_f^i)$ — константа скорости реакции восстановления ZnO ; T_f^i — температура газов окружающих шихту, К; P_{hco}^i — парциальное давление CO в слое шихты; γ_{ZnO}^i — содержание ZnO в шихте; S_{hf}^i — средняя реакционная поверхность шихты.

Зависимость константы скорости реакции восстановления от температуры обычно выражается уравнением Аррениуса:

$$K_{ZnO}(T_f^i) = k_{ZnO} \exp\left(-\frac{E_{ZnO}}{R_a T_f^i}\right), \quad (16)$$

где: k_{ZnO} — эмпирический предэкспоненциальный множитель; E_{ZnO} — эмпирический коэффициент соответствующий энергии активации; R_a — универсальная газовая постоянная.

Скорость горения коксика в i -й зоне выразим следующим уравнением:

$$g_{hfC}^i = K_C(T_h^i, w_f^i) P_{fO_2}^i \gamma_C^i S_{hf}^i, \quad (17)$$

где: $K_C(T_h^i, w_f^i)$ — константа скорости реакции горения углерода; w_f^i — скорость движения печных газов над шихтой, м/с; $P_{fO_2}^i$ — парциальное давление O_2 в газах; γ_C^i — содержание углерода в шихте; T_h^i — температура шихты.

Константа скорости горения коксика зависит от температуры реакции, и от скорости движения газов над шихтой потому что увеличение этой скорости уменьшает толщину защитного слоя (рис. 2) и облегчает диффузию кислорода к углероду шихты, т.е. имеет место внешне диффузионный контроль процесса. Поэтому при расчете константы скорости необходимо учитывать скорость движения газов над поверхностью шихты, если она может изменяться для достижения необходимых показателей процесса. На основании приведенных рассуждений при моделировании было использовано следующее выражение константы скорости реакции горения коксика:

$$K_C(T_h^i, w_f^i) = k_C \exp\left(-\frac{E_C}{R_a T_h^i}\right) w_f^i, \quad (18)$$

где: k_C и E_C — эмпирические коэффициенты.

Составим необходимые уравнения материального баланса для выбранной зоны печи по основным компонентам шихты и газов. Материальный баланс потока цинка в шихте определяется реакцией восстановления с последующим испарением, что выражается следующим уравнением:

$$g_{hZn}^{i-1} - g_{hZn}^i - g_{hfZnO}^i = 0, \quad (19)$$

где: g_{hZn}^{i-1} — поток цинка входящий в i -ю зону, кг/с; g_{hZn}^i — поток цинка уходящий из i -й зоны, кг/с.

Материальный баланс потока кислорода в газах:

$$F_{O_2}^{i+1} - F_{O_2}^i - g_{hfO_2}^i = 0, \quad (20)$$

где: $F_{O_2}^{i+1}$ — поток кислорода, поступающий из $i+1$ зоны, моль/с; $F_{O_2}^i$ — поток кислорода, выходящий из i -й зоны, моль/с; $g_{hfO_2}^i$ — поток кислорода расходуемый на окисление топлива, моль/с.

Материальный баланс потока топлива в шихте:

$$g_{hC}^{i-1} - g_{hC}^i - g_{hfC}^i = 0, \quad (21)$$

где: g_{hC}^{i-1} — количество углерода поступающего в i -ю зону, кг/с; g_{hC}^i — количество углерода уходящего с шихтой из i -й зоны, кг/с.

Материальный баланс потока нейтрального газа проходящего через i -ю зону:

$$F_{fN}^{i+1} - F_{fN}^i = 0, \text{ моль/с} \quad (22)$$

Материальный баланс потока нереагирующего компонента в шихте проходящего через i -ю зону:

$$g_{hZ}^{i-1} - g_{hZ}^i = 0, \text{ кг/с} \quad (23)$$

В результате анализа механизма протекания процессов печи вельцевания, была составлена система из четырех нелинейных уравнений, которая позволяет вычислить ключевые температуры в выбранной зоне печи, а также определить все другие показатели процесса. Полученные уравнения приведены ниже.

Уравнение баланса тепловых потоков пылегазовой смеси в i -й зоне печи:

$$q_f^{i+1}(T_f^{i+1}) + q_p^{i+1}(T_f^{i+1}) - q_f^i(T_f^i) - q_p^i(T_f^i) + q_{hfC}^i(T_h^i, w_f^i, P_{fO_2}^i, \gamma_C^i) - q_{fr}^i(T_f^i, T_h^i, T_{Sin}^i) - q_{fa}^i(T_f^i, T_h^i, T_{Sin}^i) + q_{pZnO}^i(T_f^i) = 0, \quad (24)$$

где: $q_f^{i+1}(T_f^{i+1})$, $q_p^{i+1}(T_f^{i+1})$ — потоки тепла вносимые газом "f" и пылью "p" из $i+1$ -й зоны печи; $q_f^i(T_f^i)$, $q_p^i(T_f^i)$ — поток тепла, уносимый газами и пылью; $q_{hfC}^i(T_h^i, w_f^i, P_{fO_2}^i, \gamma_C^i)$ — поток тепла, поступающий в результате горения углерода коксика; $q_{fr}^i(T_f^i, T_h^i, T_{Sin}^i)$ — поток тепла радиационного теплообмена между газопылевым потоком, шихтой и внутренней стенкой печи; $q_{fa}^i(T_f^i, T_h^i, T_{Sin}^i)$ — поток тепла конвективного теплообмена между пылегазовым потоком, шихтой и внутренней стенкой печи; $q_{pZnO}^i(T_f^i)$ — поток тепла в результате окисления паров цинка в газовом потоке; T_{Sin}^i — температура внутренней стенки печи.

Уравнение баланса тепловых потоков шихты в i -й зоне печи:

$$q_h^{i-1}(T_h^{i-1}) - q_h^i(T_h^i) - q_{hZn}^i(T_h^i, P_{hCO}^i, \gamma_{ZnO}^i) + q_{hr}^i(T_f^i, T_h^i) + q_{hf}^i(T_f^i, T_h^i) = 0, \quad (25)$$

где: $q_h^{i-1}(T_h^{i-1})$ — тепловой поток вносимый шихтой из $i+1$ -й зоны; $q_h^i(T_h^i)$ — тепловой поток уносимый шихтой; $q_{hZn}^i(T_h^i, P_{hCO}^i, \gamma_{ZnO}^i)$ — тепловой поток поступающий на восстановление и испарение цинка; $q_{hr}^i(T_f^i, T_h^i)$ — поток радиационного теплообмена между шихтой и пылегазовым потоком; $q_{hf}^i(T_f^i, T_h^i)$ — поток конвективного теплообмена между шихтой и газовым потоком.

Уравнение баланса теплопередачи через футеровку печи и потоком тепла в окружающую среду:

$$q_{ft}^i(T_{Sin}^i, T_{Sout}^i) - q_{sout}^i(T_{Sout}^i, T_A) = 0, \quad (26)$$

где: $q_{ft}^i(T_{Sin}^i, T_{Sout}^i)$ — поток теплопередачи через футеровку печи; $q_{sout}^i(T_{Sout}^i, T_A)$ — поток теплообмена через внешнюю стенку печи в окружающую среду; T_{Sout}^i — температура внешней стенки печи; T_A — температура окружающего воздуха.

Уравнение баланса потоков тепла через внутреннюю и внешнюю стенку печи:

$$q_{sinr}^i(T_f^i, T_{Sin}^i) + q_{sinf}^i(T_f^i, T_{Sin}^i) - q_{sout}^i(T_{Sout}^i, T_A) = 0, \quad (27)$$

где: $q_{sinr}^i(T_f^i, T_{Sin}^i)$ — поток радиационного теплообмена между печными газами и внутренней стенкой печи; $q_{sinf}^i(T_f^i, T_{Sin}^i)$ — поток конвективного теплообмена между печными газами и внутренней стенкой печи.

Таким образом была получена математическая модель, представляющая собой систему нелинейных уравнений описывающая процесс вельцевания в i -й зоне печи в стационарных условиях. В нее входят семь ведущих уравнений: три уравнения материального ба-

ланса (19), (20), (21) — описывающие потоки основных реагентов; и четыре уравнения теплового баланса (24), (25), (26), (27) — описывающие свободный теплообмен между потоками шихты, газа, футеровкой и окружающей средой. Для ее решения необходимо найти значения неизвестных ключевых параметров: $\gamma_{ZnO}^i, \gamma_C^i, P_{fO_2}^i, T_h^i, T_f^i, T_{S_{in}}^i, T_{S_{out}}^i$. Остальные неизвестные параметры рассчитываются с помощью простых арифметических соотношений.

Описание блочно-модульной модели

Совместное решение системы уравнений материального (19–21) и теплового (24–27) баланса возможно только численными методами. Поэтому была разработана блочная модель в системе Matlab Simulink с использованием блоков для итерационных вычислений. Созданная модель зоны печи вельцевания позволяет вычислять показатели процесса и исследовать механизм его протекания в широком диапазоне изменения входных параметров, а также выбирать наилучшие условия его проведения и выполнять необходимые расчеты при проектировании передела вельцевания.

Для моделирования были выбраны параметры процесса, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры модели процесса вельцевания

№	Название параметра	Значение	Ед. измерения
1	Длина одной зоны печи	2	м
2	Длина печи	40	м
3	Внутренний диаметр печи	3	м
4	Толщина футеровки печи	0,6	м
5	Скорость потока шихты	15	кг/с
6	Содержание цинка в шихте	14	%
7	Содержание коксика в шихте	30	%
8	Скорость потока печных газов	70–100	кг/с
9	Содержание кислорода в печных газах	5–15	%
10	Температура окружающей среды	25	°C
11	Доля внутреннего объема зоны за- нятая шихтой	15	%

Совместное решение уравнений материального и теплового баланса осуществляется с помощью блоков Algebraic Constraint, которые осуществляют итерационный поиск неизвестных значений параметров: $\gamma_{ZnO}^i, \gamma_C^i, P_{fO_2}^i, T_h^i, T_f^i, T_{S_{in}}^i, T_{S_{out}}^i$. Для контроля найденные значения выводятся в блоках Display в правой части схемы.

Решение представляет собой область равновесия между потоками вещества и энергии в стационарном режиме. Любое отклонение от равновесного состояния

приведет к возникновению переходного процесса, который вернет показатели процесса к рассчитанным значениям при условии, что внешние параметры остаются неизменными.

На схеме, приведенной на рисунке 6, находятся следующие модули:

- Modul_Dat — осуществляет передачу данных результатов молирования, в переменные рабочей области для построения графиков и дальнейшей обработки;
- Modul_Sqr — рассчитывает уравнения конвекционного теплообмена и теплопередачу через поверхности стенок зоны печи;
- Modul_Gaz — рассчитывает уравнения теплообмена в газах проходящих через зону печи;
- Modul_Sht — рассчитывает уравнения теплообмена в шихте;
- Modul_Rds — рассчитывает уравнения радиационного теплообмена в зоне печи;
- QB_S_out, QB_S_ft_out, QB_g_i QB_h_i — рассчитывают уравнения теплового баланса (24–27);
- MB_O2_i, MB_h_i, MB_Zn_i — рассчитывают уравнения материального баланса (19–21).

Пример решения модели показан на рис. 7. На графиках показаны изменения температуры процесса в зависимости от содержания кислорода в печном газе и скорости потока печных газов через выбранную зону печи.

Выбор значений коэффициентов модели и технологических ограничений проведения процесса позволяет провести настройку созданной модели до необходимого уровня адекватности.

Выводы

1. На основании анализа протекающих в реакционной зоне печи вельцевания сформулирован механизм процесса как совокупность протекающих взаимодействий и разработана принципиальная схема моделирования этого механизма.
2. В результате проведенного исследования была разработана математическая и блочно-модульная модель в Simulink для определения термодинамической температуры начала восстановления оксида цинка твердым углеродом, которая позволила рассчитать температурные условия проведения процесса вельцевания в реакционной зоне печи.
3. Для выбранных условий протекания процесса была разработана математическая и блочно-модульная модель в Simulink, которая позволяет рассчитать стационарное равновесное состояние потоков вещества, тепла и химических реакций в реакционной зоне печи.
4. Получено решение разработанной модели, которое наглядно демонстрирует изменение показателя

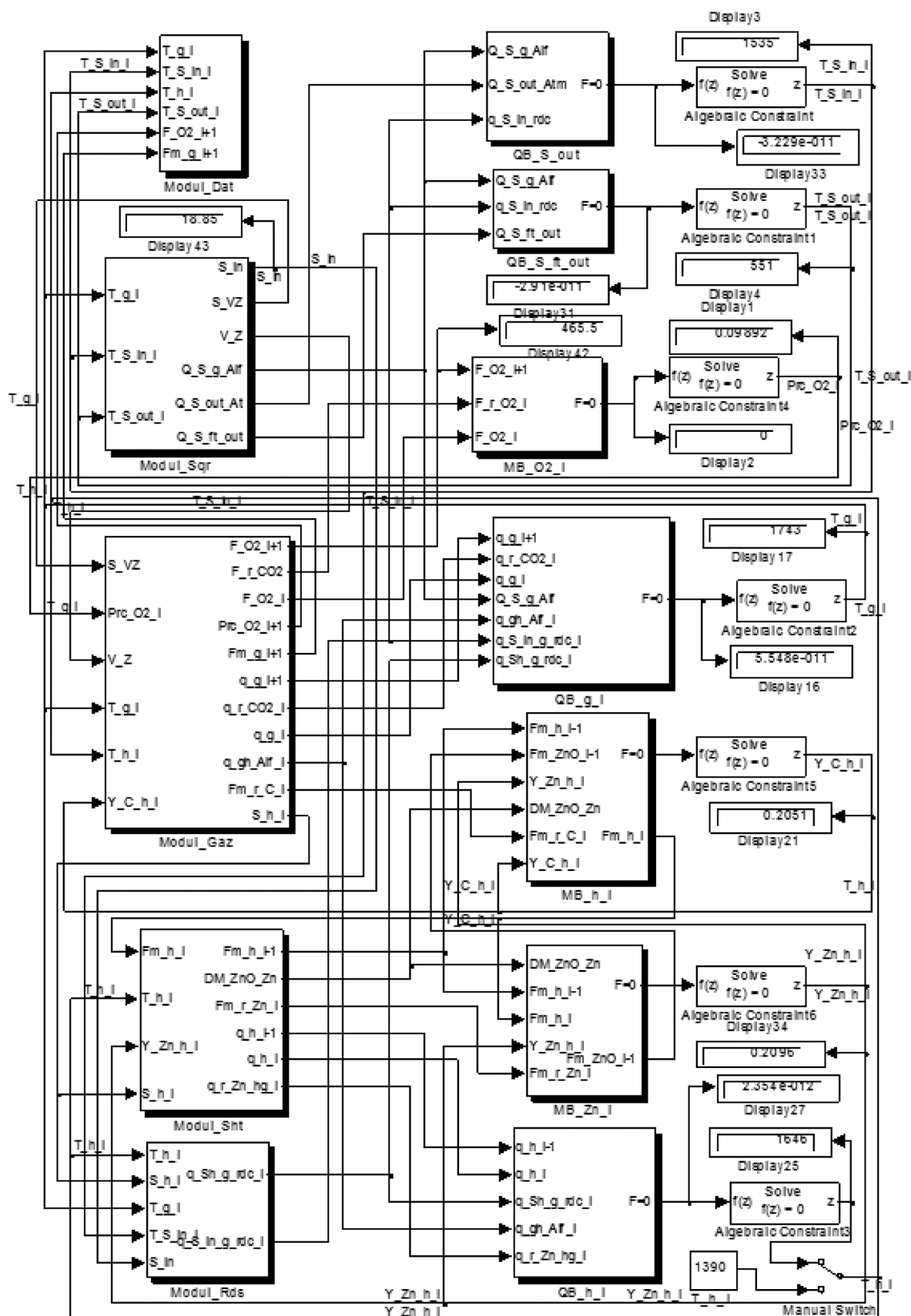


Рис. 6. Блочнo-модульная схема в Simulink, описывающая механизм процессов протекающих при вельцевании цинковых кеков в реакционной зоне печи

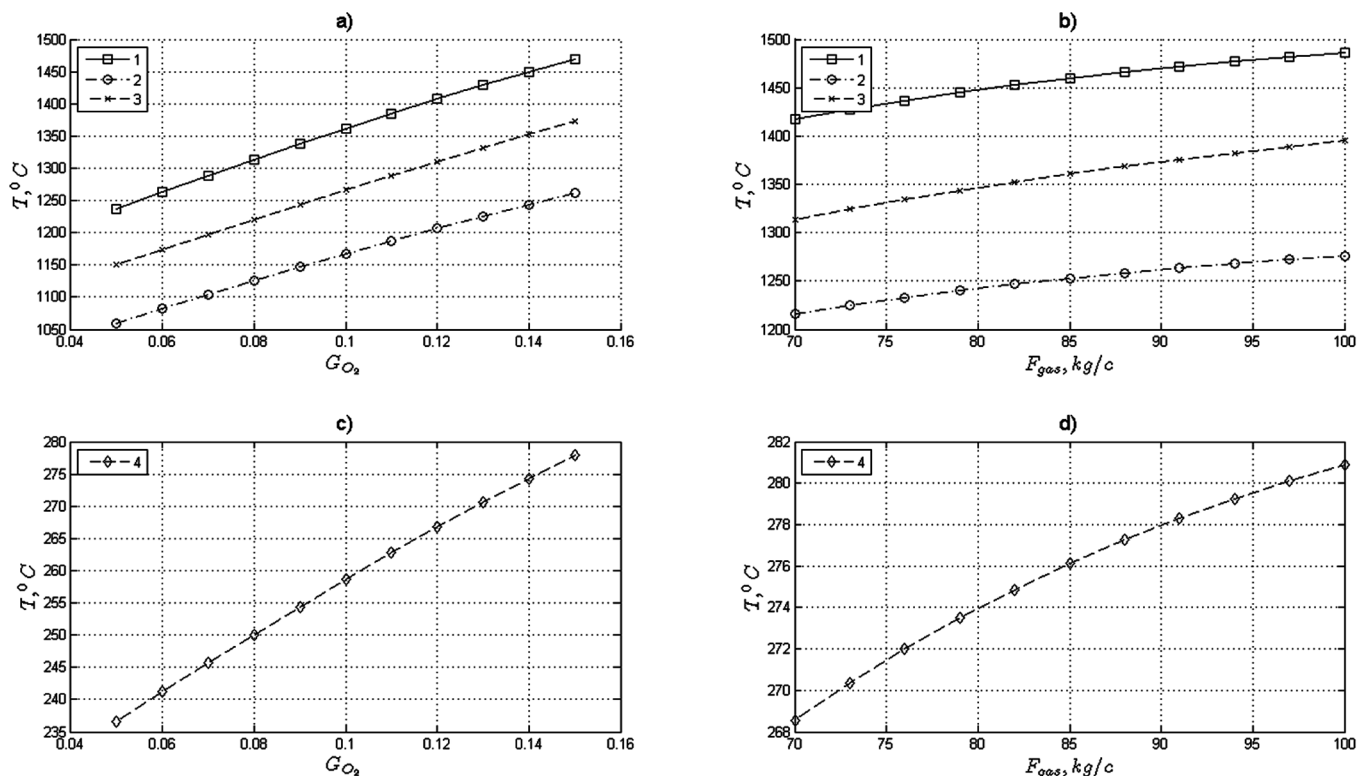


Рис. 7. Графики изменения температуры печных газов 1, температуры внутренней стенки печи 2, температуры шихты 3, и температуры внешней поверхности печи 4. В зависимости от содержания кислорода в печных газах (а, с) и скорости потока печных газов в i -й зоне печи вельцевания, рассчитанные по уравнениям модели процесса

телей процесса в зависимости от содержания кислорода и скорости потока печных газов.

5. Разработанная модель может быть использована для определения оптимальных условий проведе-

ния процесса вельцевания, проектирования металлургических печей и создания систем управления на основе современных информационных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев, В.Я. и Маргулис, Е.В. *Металлургия свинца и цинка*. Москва, «Металлургия», 1985. стр. 263.
2. Козлов, Павел Александрович. *Вельц-процесс*. Москва, «Руда и металлы», 2002. стр. 176.
3. Козлов, Павел Александрович, и др. Способ вельцевания окисленных цинксодежащих материалов. RU 2516191 С1 Россия, 20.05.2014 г.
4. Козлов, Павел Александрович, и др. Шихта для вельцевания цинк-цинксодежащих материалов. RU 2509815 С1 Россия, 20.03.2014 г.
5. Физико-химические основы комплексной технологии переработки техногенного сырья в металлургии цинка. Козлов, Павел Александрович. [ред.] Под общей редакцией А.Б. Юрьева. Новокузнецк, Сибирский государственный индустриальный университет (Новокузнецк), 2021. *Металлургия: Технологии, Инновации, Качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях. Т. 1*, стр. 57–66.
6. Применение метода опорных компонентов для расчета материальных балансов производства цинка. Рутковский, Александр Леонидович, и др. 4, 2006 г., *Вестник Владикавказского научного центра*, Т. 6, стр. 59–63.
7. Теплофизические особенности процесса вельцевания шлаковых компонентов во вращающейся печи. Часть 2. Паньшин, А.М., и др. 1(865), 2015 г., *Цветные металлы*, стр. 23–26.
8. Теплофизические особенности процесса вельцевания шлаковых компонентов во вращающейся печи. Часть 1. Паньшин, А.М., и др. 11(863), 2014 г., *Цветные металлы*, стр. 22–26.
9. Исследование тепловой работы вельц-печи. Плешкова, А.В., Воронов, Г.В. Екатеринбург, Издательство: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург), 2018. *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) с международным участием*. стр. 259–264.
10. Новая методика расчёта угловых коэффициентов зон теплообмена вращающихся печей. Салихов, З. Г., и др. 9, 1999 г., *Цветные металлы*, стр. 116–119.
11. Совершенствование процесса вельцевания шлаковых компонентов на основе закономерностей горения твердого топлива. Матюхин, В. И., и др. 10, 2016 г., *Металлург*, стр. 26–32.
12. Твердофазное восстановление оксидов железа углеродом. Крутилин, А.Н., Кухарчук, М.Н. и Сычева, О.А. 2(65), 2012 г., *Литье и металлургия*, стр. 11–16.
13. Исследование процессов переработки пыли газоочистки сталеплавильных производств. Римошевский, С.Л., Прокопчук, Д.А., Голуб, Д. М. 1, 2021 г. *Литье и металлургия*, стр. 106–113.

14. Разработка технологии утилизации тепла готового продукта на печи вельцевания. Авдеев, А.П., Матюхин, В.И. Екатеринбург, Издательство: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург), 2017. Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с международным участием. стр. 7–9.
15. Использование рекуператора типа «труба в трубе» для возврата отходящих газов в вельц-печь барабанного типа. Рутковский, Александр Леонидович, Макоева, Алла Константиновна и Коробкин, Роман Сергеевич. 1(115), 2021 г., Наука и бизнес: пути развития, стр. 30–33.
16. Математическое моделирование динамики процессов вельц-печи. Казаринов, Л.С., Вернергольд, А.Р., Колесникова, О.В. Челябинск, Издательство: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск), 2015. НАУКА ЮУРГУ. Материалы 67-й научной конференции. стр. 656–660.
17. Разработка и освоение современных методов оптимизации технологических процессов извлечения ценных продуктов из отходов металлургического производства. Касимов, А.М., и др. 3–4(52–53), 2017 г., Экология и промышленность, стр. 95–102.
18. Термодинамическое моделирование восстановления цинка из медеплавильного шлака. Тюшняков, Станислав Николаевич и Селиванов, Евгений Николаевич. 9, Екатеринбург, б.н., 2015 г., Бутлеровские сообщения, Т. 43, стр. 108–115.
19. Термодинамическое моделирование совместного восстановления металлов из смеси оксидов с образованием карбида кальция и силицидов железа. Шевко, В. М., и др. 3 (294), 2015 г., Комплексное использование минерального сырья, стр. 38–42.
20. К вопросу переработки цинковых кеков. Ахтамов, Ф.Э., Нишонов, Б.У. 1(18), 2016 г., Теория и технология металлургического производства, стр. 69–72.
21. Термодинамический анализ разложения феррита цинка в пыли электродуговой плавки стали известью. Якорнов, С.А., и др. 5, 2017 г., Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия., стр. 28–33.
22. Разработка технологии и аппаратурной схемы пирометаллургической переработки пылей черной металлургии. Якорнов, С.А., и др. 9, 2017 г., Цветные металлы, стр. 39–44.
23. Компьютерная система распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима. Спиринов, Н.А., и др. Екатеринбург, УрФУ, 2015. Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности : сборник докладов международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности. Стр. 175–181.
24. Спиринов, Н.А., и др. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУТП. [ред.] Н.А. Спиринов. Екатеринбург, ООО «УИПЦ», 2014. стр. 558.
25. Структура современной интеллектуальной системы управления технологическим процессом в металлургии. Спиринов, Н.А., и др. Екатеринбург, Уральского университета, 2012. Инновации в материаловедении и металлургии : материалы I междунар. интерактив. науч.-практ. конф. [13–19 дек. 2011 г., г. Екатеринбург]. Ч. 1. Т. Ч. 1, стр. 64–66.
26. Швыдкий, В.С., и др. Элементы теории систем и численное моделирование процессов тепломассопереноса. Москва, «Интермет инжиниринг», 1999. стр. 520.
27. Рыжонков, Д.И., Серов, Г.В., Падерин, С.Д. Термодинамика, кинетика и расчеты металлургических процессов. Москва, НИТУ МИСиС, 2010. стр. 235.
28. Романтеев, Юрий Павлович, Быстров, Валентин Петрович Металлургия тяжелых цветных металлов. Свинец. Цинк. Кадмий. Москва, «Изд. дом МИСиС», 2010. стр. 574.

© Зароченцев Владимир Михайлович (vlazarm@gmail.com); Рутковский Александр Леонидович (rutkowski@mail.ru);
Болотаева Индира Ислановна (iibolotaeva@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»