

УДК 669.1

С.Г. САВЕЛЬЕВ, канд. техн. наук, доц., Я.А. НОВОХАТЬКО, аспирант  
Криворожский национальный университет

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЗОНЫ ГОРЕНИЯ ПРИ СПЕКАНИИ АГЛОШИХТЫ

Выполнен анализ состояния моделирования агломерационного процесса железорудных материалов. Показано, что известные модели не позволяют определить скорость спекания без проведения предварительных опытов. На основе известной зависимости вертикальной скорости спекания от выхода агломерационного газа разработана оригинальная модель процесса движения зоны горения топлива в спекаемом слое, отличающаяся наличием ряда впервые установленных функциональных связей между параметрами шихты и агломерационного процесса. С помощью полученной модели выполнено исследование влияния состава и характеристик шихты на вертикальную скорость спекания.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Процесс перемещения зоны горения твердого топлива при спекании агломерационной шихты определяет вертикальную скорость спекания – одну из важнейших технологических характеристик производства агломерата, являющуюся выражением интенсивности аглопроцесса. Экспериментальное определение вертикальной скорости спекания не вызывает затруднений. Однако расчетное определение этого параметра аглопроцесса связано с определенными трудностями, обусловленными необходимостью учета большого числа факторов, влияющих на вертикальную скорость спекания, некоторые из которых не имеют однозначной теоретической оценки, например, содержание топлива в шихте [1, с. 170], основность шихты [2, с. 11] и др. В то же время возможность надежного расчетного определения вертикальной скорости спекания агломерационной шихты имеет важное научное и практическое значение, так как позволяет не только прояснить некоторые вопросы теории агломерационного процесса, но и оценить влияние на скорость аглопроцесса отдельных технологических параметров, а также выполнить сравнительную оценку интенсивности производства агломерата на различных аглофабриках. С учетом многообразия факторов, влияющих на вертикальную скорость спекания, и их взаимозависимости, очевидно, что наиболее удобной для практического использования формой представления метода расчетного определения этого показателя аглопроцесса является математическая модель перемещения зоны горения твердого топлива при спекании агломерационной шихты.

**Анализ исследований и публикаций.** Математическому моделированию агломерационного процесса в целом и отдельных его составляющих посвящено довольно много исследований и публикаций, большинство из которых направлены на получение детерминированной модели [3-6]. При этом, как правило, ставится комплексная системная задача описания всех основных тепло- и массообменных процессов, влияющих на процесс спекания аглошихты, а выходными параметрами модели являются важнейшие технико-экономические показатели агломерационного процесса, включая показатели качества агломерата. Так, в работах [3-5] выполнено совместное решение задач газодинамики и конвективного теплообмена в спекаемом слое, разработаны подсистемы испарения влаги, горения топлива, диссоциации известняка. В этих работах скорости фильтрации определены для всего слоя, после чего приведены к нормальным условиям по известным данным о потерях давления в слое. Более полной и совершенной является модель аглопроцесса [6], в которой решена задача газодинамики в каждой точке спекаемого слоя, и, кроме того, разработана усовершенствованная модель подсистемы плавления и кристаллизации.

Моделируя процесс горения частицы твердого топлива в спекаемом слое аглошихты [3-6] принимали допущение, что углерод сгорает до диоксида углерода, а константа скорости горения  $k_c'$  имеет следующий вид

$$k_c' = [d/(ShD_{CO_2}) + 1/k_c]^{-1},$$

где  $d$  - характерный размер частиц топлива, м;  $Sh$  - критерий Шервуда;  $D_{CO_2}$  - коэффициент диффузии диоксида углерода,  $m^2/c$ ;  $k_c$  - постоянная скорости реакции горения кокса, м/с.

При этом радиус частицы топлива в момент времени  $n+1$  определяли [6] по формуле

$$r^{n+1} = r^n - \Delta M r' \Delta \tau / 4\pi \rho (r^n)^2,$$

где  $r^{n+1}$  и  $r^n$  - радиус частицы кокса в момент времени  $n+1$  и  $n$  соответственно, м;  $\Delta M=0,012$  кг/моль - изменение массы в реакции горения кокса;  $r'$  - полная скорость реакции горения кокса, моль/с;  $\Delta \tau$  - изменение времени горения, с;  $\rho=1200$  кг/м<sup>3</sup> - кажущаяся плотность частиц кокса.

Начальное условие для данного уравнения:  $r^0=d/2$ .

Выходные параметры, принятых при моделировании систем процесса спекания, не содержат данных о времени прохождения зоны горения по высоте спекаемого слоя или вертикальной скорости, иными словами, при моделировании агломерационного процесса задача моделирования процесса перемещения зоны горения в спекаемом слое исследователями не ставилась.

Известные из теории агломерационного процесса формулы для определения вертикальной скорости спекания основаны либо на отношении теплоемкостей газов, проходящих через спекаемый слой, и шихты [7, с. 507], либо на удельном выходе агломерационного газа из шихты [7, с. 496]. Кроме того, в первом случае необходимы данные о газопроницаемости спекаемого слоя, а во втором – о скорости фильтрации газа в слое и насыпной массе шихты. Таким образом, существующие формулы для расчета вертикальной скорости спекания требуют наличия данных, которые предполагают проведение опытных спеканий.

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы явилась разработка математической модели процесса перемещения зоны горения при спекании аглошихты, не требующей проведения опытных спеканий для получения входных данных.

**Изложение материала и результаты.** Для составления идеальной конструкции описываемого процесса перемещения зоны горения твердого топлива в агломерационной шихте, называемой содержательной моделью [8, с. 35], использована формула [7, с. 496]

$$v_c = w_o / (V_r \cdot \rho),$$

где  $v_c$  - вертикальная скорость спекания, м/с;  $w_o$  - скорость фильтрации газа в слое, м/с;  $V_r$  - удельный выход агломерационного газа, м<sup>3</sup>/кг сухой шихты;  $\rho$  - насыпная масса агломерационной шихты, кг/м<sup>3</sup>, поскольку в результате сравнительного исследования установлено [9], что она обладает наибольшей универсальностью и пригодностью для практического применения. В пользу такого выбора свидетельствует также то, что в области повышенного содержания углерода в шихте (более 4 %), несмотря на уменьшение кажущейся теплоемкости шихты вследствие увеличения массовой доли углерода в ней, скорость спекания снижается [1, с. 170], хотя согласно формуле, основанной на отношении теплоемкостей газов и шихты, должна увеличиваться.

Основными структурными элементами модели являются параметры шихты и параметры газа, которые характеризуют начальное состояние системы.

Параметры агломерационной шихты, характеризующие начальное состояние системы, включают в себя: содержание отдельных компонентов шихты; массовую долю углерода в топливе, СаО в известняке и СаО<sub>акт</sub> в извести; фракционный состав топлива и шихты; высоту слоя спекаемой шихты.

Входными параметрами модели, устанавливаемыми при выполнении расчетов для конкретного случая спекания, являются: состав газа на входе в слой; скорость просасывания воздуха через спекаемый слой; истинная плотность шихтовых компонентов.

Согласно принятой содержательной модели, рассматриваемые процессы сгруппированы в следующие подсистемы: скорости фильтрации газа в слое; удельного выхода агломерационного газа; насыпной массы окомкованной шихты.

Параметром выхода является вертикальная скорость спекания аглошихты.

При разработке концептуальной модели приняли следующие основные допущения: компоненты шихты представлены в виде частиц шаровидной формы; горение углерода происходит по реакциям  $C+0,5O_2=CO$ ,  $C+O_2=CO_2$ ; гранулометрический состав окомкованной шихты определяется массовой долей отдельных фракций крупности в исходной шихте и содержанием связующих добавок; параметры входящего воздуха подобны атмосферному.

При разработке подмодели скорости фильтрации газа были сделаны следующие допущения: удельный расход воздуха на спекание неофлюсованной шихты из гематитовых руд и магнетитовых концентратов составляет 0,35-0,40 м<sup>3</sup>/кг [1, с. 111] (данное допущение принималось

при вычислении удельного выхода агломерационного газа по типичному расходу воздуха); высота зоны горения для типичных условий агломерации (топливо размером 0-3 мм) составляет 1/10 от общей высоты спекаемого слоя [1, с. 65, 68]; скорость просасывания газа через спекаемый слой равняется 0,35 м/с [10] (эти допущения принимались при вычислении зависимости скорости горения топливных частиц от различных факторов).

Математическая модель перемещения зоны горения в спекаемом слое представлена в виде расширяющейся сети отдельных взаимосвязанных зависимостей, выделенных в самостоятельные подмодели (рис. 1)

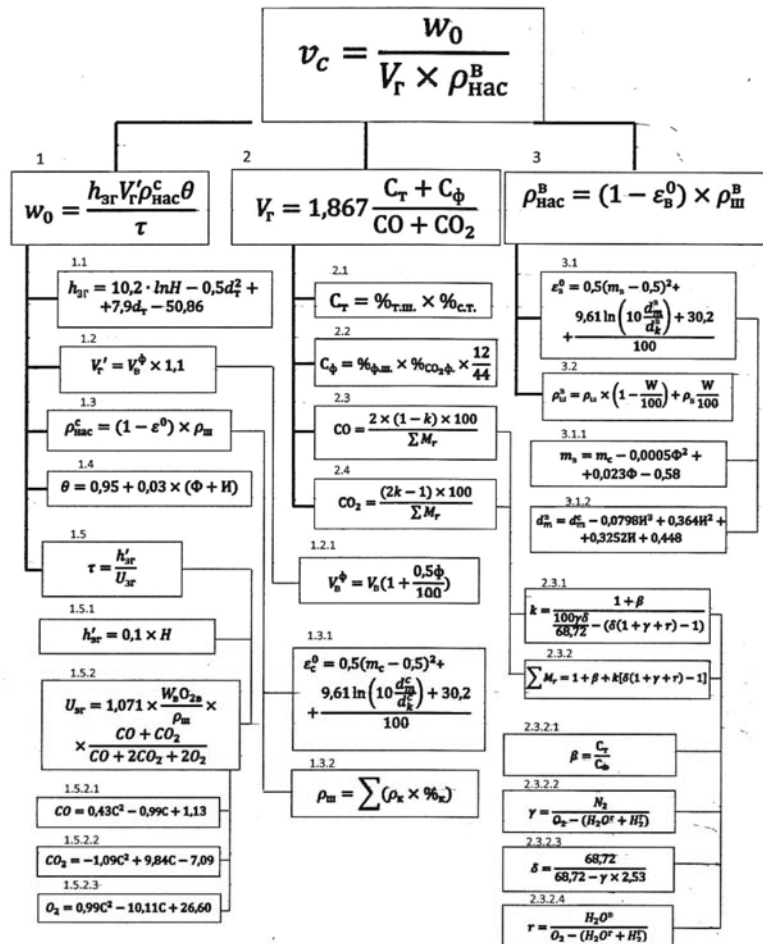


Рис. 1. Схема математической модели процесса перемещения зоны горения твердого топлива в спекаемом слое агломерационной шихты

где  $H$  - высота слоя шихты, м;  $\tau$  - время горения частичек кокса, с;  $V_c$  - вертикальная скорость спекания, м/с;  $w_0$  - скорость фильтрации газа в слое, м/с;  $V_2$  - удельный выход агломерационного газа, м<sup>3</sup>/кг;  $V_r'$  - удельный выход агломерационного газа при типичных условиях спекания;  $\rho_{\text{нас}}^c, \rho_{\text{нас}}^B$  - насыпная масса сухой и окомкованной шихты соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $h_{3r}$  - высота зоны горения, м;  $\theta$  - коэффициент, учитывающий влияние изменения объема проходящего через спекаемый слой газа, вследствие изменения его температуры, на скорость фильтрации газа;  $C$  - содержание топлива в шихте, %;  $C_T$  - содержание углерода топлива в шихте, дол. ед.;  $C_\Phi$  - содержание углерода флюса в шихте, дол. ед.;  $CO, CO_2, O_2$  - содержание  $CO, CO_2, O_2$  в отходящем газе, дол. ед.;  $\epsilon_c^0, \epsilon_B^0$  - порозность слоя сухой и окомкованной шихты соответственно, дол. ед.;  $\rho_{\text{ш}}^B$  - плотность шихты, кг/м<sup>3</sup>;  $d_r$  - средний диаметр топливных частиц, мм;  $\%_{\text{с.т.}}$  - содержание углерода в топливе, %;  $\Phi$  - содержание известняка в шихте, %;  $I$  - содержание извести в шихте, %;  $\%_{\text{CO}_2\Phi}$  - содержание диоксида углерода во флюсе, %;  $m_c, m_b$  - доля мелочи в сухой и окомкованной шихте соответственно, дол. ед.;  $d_m^c, d_k^c$  - диаметры мелкой и крупной фракции в сухой шихте соответственно, м;  $\rho_{\text{к}}$  - плотность компонентов шихты, кг/м<sup>3</sup>;  $d_m^B, d_k^B$  - диаметры мелкой

и крупной фракции в окомкованной шихте соответственно, м;  $\rho_{\text{ш}}^{\text{оком}}$  – плотность окомкованной шихты, кг/м<sup>3</sup>;  $W$  – влажность окомкованной шихты, %;  $\%_k$  – содержание компонента в шихте, %;  $V_{\text{в}}^{\text{оком}}$  – удельный расход воздуха на спекание офлюсованной шихты, м<sup>3</sup>/кг;  $V_{\text{в}}^{\text{неоком}}$  – удельный расход воздуха на спекания не офлюсованной шихты, м<sup>3</sup>/кг;  $k$  – коэффициент балансового отношения  $\text{CO}/\text{CO}_2$ , дол. ед.;  $\Sigma \text{Mг}$  – объем продуктов горения, моль;  $\beta$  – отношение концентраций углерода карбонатов и твердого топлива агломерационной шихты, дол. ед.;  $\gamma$  – коэффициент, равный отношению содержания  $\text{N}_2/\text{O}_2$  в газе, поступающем на горение, дол. ед.;  $\delta$  – коэффициент расхода воздуха, равный отношению количества воздуха, расходуемого на агломерацию, к количеству воздуха, расходуемого на горение, дол. ед.;  $g$  – относительное количество паров воды, дол. ед.;  $h'_{\text{з.г.}}$  – высота зоны горения (упрощенная), м;  $U_{\text{з.г.}}$  – скорость перемещения зоны горения, м/с;  $W_{\text{в}}$  – скорость просасывания воздуха через спекаемый слой, м/с;  $\text{O}_2^{\text{в}}$  – содержание кислорода в просасываемом воздухе, %.

Наиболее существенными элементами новизны подмодели скорости фильтрации газа в слое (формула 1), являются следующие:

наличие коэффициента  $\theta$ , учитывающего влияние изменения температуры газа, вызванной эндотермическим эффектом реакций диссоциации  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , на его объем и, следовательно, скорость фильтрации (формула 1.4);

учет зависимости высоты зоны горения от крупности топлива и высоты слоя шихты (формула 1.1); формула 1.3.1, полученная путем обработки результатов экспериментального исследования изменения порозности слоя реальной доменной шихты от доли мелочи при различном соотношении диаметров мелких и крупных фракций [11, с. 21];

учет зависимости состава продуктов горения топлива от содержания углерода в шихте (формулы 1.5.2.1 - 1.5.2.3), выполненный на основании результатов экспериментального исследования [10].

Разработка подмодели выхода агломерационного газа (формула 2) выполнена на базе известных закономерностей влияния различных факторов на этот параметр аглопроцесса [1, с. 54-79].

Новизна элементов подмодели насыпной массы окомкованной шихты (формула 3) заключается в следующем: порозность слоя окомкованной шихты представлена зависимостью (формула 3.1) аналогичной порозности слоя исходной шихты (формула 1.3.1);

на основе анализа экспериментальных данных о влиянии содержания в окомкованной шихте известняка получена подмодель содержания мелочи в окомкованной шихте (формула 3.1.1);

математическое выражение зависимости диаметра мелкой фракции окомкованной шихты от содержания извести в шихте (формула 3.1.2) получено по экспериментальным данным.

Проверка адекватности и адаптация модели определения вертикальной скорости спекания шихты, а также отдельных подмоделей проведена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в ходе лабораторных и промышленных исследований, проведенных на аглофабрике ГОКа ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

С использованием разработанной модели выполнено исследование зависимости вертикальной скорости спекания от состава и параметров слоя аглошихты, в частности, содержания твердого топлива и известняка в шихте при различной высоте спекаемого слоя, порозности слоя окомкованной шихты при различной доле в ней мелких фракций, содержания извести ( $\text{CaO}_{\text{акт.}}$ ) в шихте при различной основности шихты, скорости просасывания воздуха при различном содержании  $\text{CaO}_{\text{акт.}}$  в шихте и др.

При исследовании влияния скорости просасывания воздуха на вертикальную скорость спекания при различном содержании  $\text{CaO}_{\text{акт.}}$  в шихте исходными параметрами принимали следующие: высота спекаемого слоя 300 мм; содержание известняка в шихте 10 %; содержание твердого топлива в шихте 4,0 %; доля мелкой фракции в сухой шихте 80 %.

Результаты исследования (рис. 2) показывают практически прямолинейную зависимость скорости спекания от скорости фильтрации воздуха при различном содержании извести в шихте.

При этом, чем выше содержание извести, тем больше скорость спекания при одинаковой скорости просасывания воздуха.

Таким образом, полученное численное описание процесса движения зоны горения при спекании аглошихты является локальной динамической моделью, адекватность которой подтвер-

ждена результатами теоретических и экспериментальных исследований.

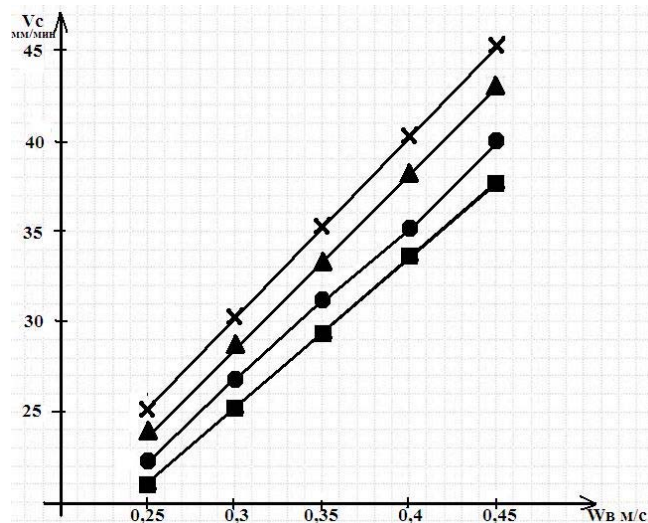


Рис. 2. Зависимость вертикальной скорости спекания  $V_c$  от скорости просасывания воздуха  $W_b$  при различном содержании  $CaO_{акт}$  в шихте: ■ - 0,5; ● - 1,0; ▲ - 1,5; × - 2,0

зависимость вертикальной скорости спекания от параметров вещественного состава и структурно-газодинамических характеристик слоя аглошихты.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть связаны с адаптацией модели к конкретным АСУТП агломерационных фабрик.

#### Список литературы

1. **Коротич В.И.** Агломерация рудных материалов. Научное издание. В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский – Екатеринбург: ГОУ ВПО "УГТУ-УПИ", 2003. – 400 с.
2. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф. Колесанов, Н.С. Хлапонин, В.Н. Кривошеев, В.И. Чикуров. – К.: Техніка, 1983. – 110 с.
3. **Young R.W.** Dynamic mathematical model of sintering process / R.W. Young // Ironmaking and Steelmaking, 1977, № 6, p. 321-328.
4. Technology for Granulating Coke Breeze by Centrifugal Rolling Type Pelletizer and Effect of Granulated Coke Breeze on Sintering Operation / Y. Hosotani, N. Konno, J. Shibata et al // ISIJ International, Vol. 35 (1995), № 11. P. 1340-1347.
5. Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed / M.V. Ramos, E. Kasai, J. Kano, T. Nakamura. // ISIJ International, Vol. 40 (2000), № 5. P. 448-454.
6. Математическая модель тепло- и массообменных процессов при агломерации шихты / З.К. Кабаков, А.А. Елисеев, Т.В. Деткова [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. - 2008. - № 1. - С. 19-22.
7. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: В 2-х т. Т.1. Сырьевая база и производство окучкованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / Под ред. В.М. Чижиковой. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 896 с.
8. **Мышкис, А.Д.** Элементы теории математических моделей / А.Д. Мышкис — М.: КомКнига, 2007. — 192 с.
9. **Савельев С.Г.** К вопросу расчета вертикальной скорости спекания аглошихты / С.Г. Савельев // Міжнародна науково-техн. конфер. «Гірничо-металург. комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку». Матеріали конфер., Кривий Ріг, Видавн. центр КТУ, 2009, с. 169.
10. **Котов В.Г.** Некоторые особенности горения топлива агломерационной шихты / В.Г. Котов // Изв. вузов. Черная металлургия, 1982, № 10, с. 14-17.
11. **Тарасов В.П.** Теория и технология доменной плавки / В.П. Тарасов, П.В. Тарасов. – М.: Тнтермет инжиниринг, 2007. – 384 с.
12. **Савельев С.Г.** Математическое моделирование в исследовании процессов производства окучкованного железорудного сырья / С.Г. Савельев, Я.А. Стойкова // Гірничий вісник. Науково-техн. зб. Вип. 95 (1), Кривий Ріг, 2012. С. 99-104.

Рукопись поступила в редакцию 25.03.14