

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ ДЛЯ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

**В.Ю.Поволоцкий, Б.А.Боковиков, В.А.Горбачев, В.И.Фомин, С.В.Петров**  
ООО «НПВП ТОРЭКС», г. Екатеринбург, ОАО «ОЭМК», г. Старый Оскол, Россия

В конце прошлого века, при разработке отечественной технологии металлизации железорудных окатышей в шахтной печи (ШП) и для проектирования промышленных установок прямого получения железа (ППЖ) впервые были созданы математические модели для кинетико-динамических и балансовых расчетов ППЖ [1]. В дальнейшем проводили их адаптацию, в частности, для усовершенствования технологии и тепловых режимов действующих установок металлизации (УМ) **Оскольского электро-металлургического комбината («ОЭМК»)**. Ниже приведено краткое описание этих моделей.

После пуска цеха металлизации «ОЭМК» были разработаны балансовая модель УМ и программный комплекс (ПК) «АРМ Технолога» для сбора производственных и технологических данных УМ и выполнения необходимых теплотехнических расчетов [2]. При этом проводился анализ работы УМ, установление соотношений между технико-экономическими показателями, качеством сырья, металлизированного продукта и их технологическими параметрами. На основании полученных результатов методами математической статистики формировались отчеты по работе всех УМ цеха.

Разработанная методика базируется на ПК расчета материальных и энергетических балансов шахтной печи и реформера. В расчете учтены наиболее характерные для технологии металлизации физико-химические превращения, протекающие при взаимодействии между газом и шихтой, при сжигании и/или реформировании топлива:

- нагрев, восстановление, науглероживание и охлаждение шихты (с учетом пылевыноса);
- газификация кислорода, углерода и влаги шихты;
- испарение и конденсация влаги;
- пиролиз, конверсия (или образование) углеводородов;
- окисление горючих компонентов топлива при избытке воздуха;
- теплопередача через стенки аппаратов и газовых трактов УМ в окружающую среду.

Для повышения точности расчета в модель включены температурные зависимости теплофизических характеристик газов и шихты, зависимость состава газов от параметров состояния при термодинамическом равновесии и условиях влагонасыщения, а также экспериментальные данные о теплотерях, полученные в зимний и летний периоды работы установок металлизации. В качестве исходных параметров используются данные ранее созданной информационной базы, куда регулярно заносятся сведения из суточных рапортов о работе модулей УМ.

Предложенная методика отличается от **подобных разработок** улучшенной структурой с элементами экспертной системы и блоком учета теплотерь, позволяющими на основании частично достоверных исходных данных путем их адаптации получать вполне надежный сбалансированный результат. При этом процедура адаптации выполняется с участием эксперта, обладающего положительным технологическим опытом и знающего особенности производства. Результатами расчета по данной методике являются скорректированные параметры

материальных потоков, комплексные показатели шахтной печи и реформера, а также сведенный с заданной погрешностью их материальный и энергетический балансы.

Для прогнозирования различных режимов работы УМ и управления процессом прямого получения железа к балансовым расчетам «АРМ Технолога» дополнительно используют кинетико-динамическую модель, которая позволяет рассчитать динамику реального процесса металлизации окатышей в объеме шахтной печи. Это расширяет поиск и расчетную отработку новых режимов работы УМ (включая газокислородную конверсию, внутripечную конверсию и разложение углеводородов в слое губчатого железа), чтобы увеличить производство и улучшить качество металлизованного продукта.

Кинетико-динамическая модель («Модель ШП») представляет собой математическое описание процесса металлизации железорудных материалов (руды, окатышей) и алгоритмы решения системы дифференциальных уравнений тепло-массообмена и газодинамики, позволяющие имитировать в ячейках памяти компьютера все изменения параметров окатышей и восстановительного газа (массового расхода, температуры, давления и химического состава) в масштабе реального времени по высоте и на границах зон ШП [3].

Детерминированный метод расчета реализован в этой модели в виде ПК, который может быть использован в компьютерах, как инструмент исследователя или технолога для анализа, прогнозирования и управления процессом металлизации окатышей в ШП.

Подбирая параметры газопотоков (расход, температура, состав) на входе в зону металлизации, параметры окатышей (гранулометрический и химический составы) с учетом скорости схода шихты, технолог с помощью этой модели может оптимизировать режим работы ШП для увеличения производства, улучшения качества и снижения энергозатрат.

При дальнейшей реализации ПК «АРМ Технолога» с базой данных (с приборов пульта управления УМ) и «Модель ШП» их можно использовать, как инструмент «Советчик мастера», для оптимизации параметров и управления процессом металлизации окатышей в ШП.

В качестве примера практического использования этих моделей показаны графики изменения параметров процесса металлизации по высоте зоны восстановления при стационарном режиме (рис.1), а также графики динамики параметров губчатого железа при управлении режимом работы ШП (от начального до квазистационарного состояний, рис.2).

Так, на первом этапе данного расчета, представлены результаты динамики при переходе от начальных параметров (расход окатышей  $G_m=80$ т/ч, расход газа  $V_g=132$ тыс.м<sup>3</sup>/ч, температура газа  $T_g=950$ °С) к увеличенной производительности ШП (до уровня  $G_m=85$ т/ч, а все другие входные параметры – const). Однако, при этом показано, что данное управляющее воздействие приведет к заметному ухудшению качества губчатого железа (за счет снижения степени металлизации: от начального уровня,  $\phi_m=94\%$  и до конечного –  $90\%$ , уже через 3 часа, рис.2,а).

Для того, чтобы улучшить качество губчатого железа, необходимо скомпенсировать заданный рост производства ( $\Delta G_m \approx 6\%$ ) за счет управляющих воздействий, в частности, изменения параметров восстановительного газа (добавлением расхода,  $\Delta V_g \approx 4\%$  и температуры,  $\Delta T_g \approx 2\%$ ). При этом, расчетная степень металлизации окатышей достигнет нужного уровня ( $\phi_m=94\%$ ) более чем через 4 часа после начала данных воздействий (рис.2,б).

Как видно из приведенных графиков, полученных из примеров расчета детерминированной модели «Модель ШП», в комплексе с балансовой моделью «АРМ Технолога», изменяя параметры восстановительного газа и скорости шихты –

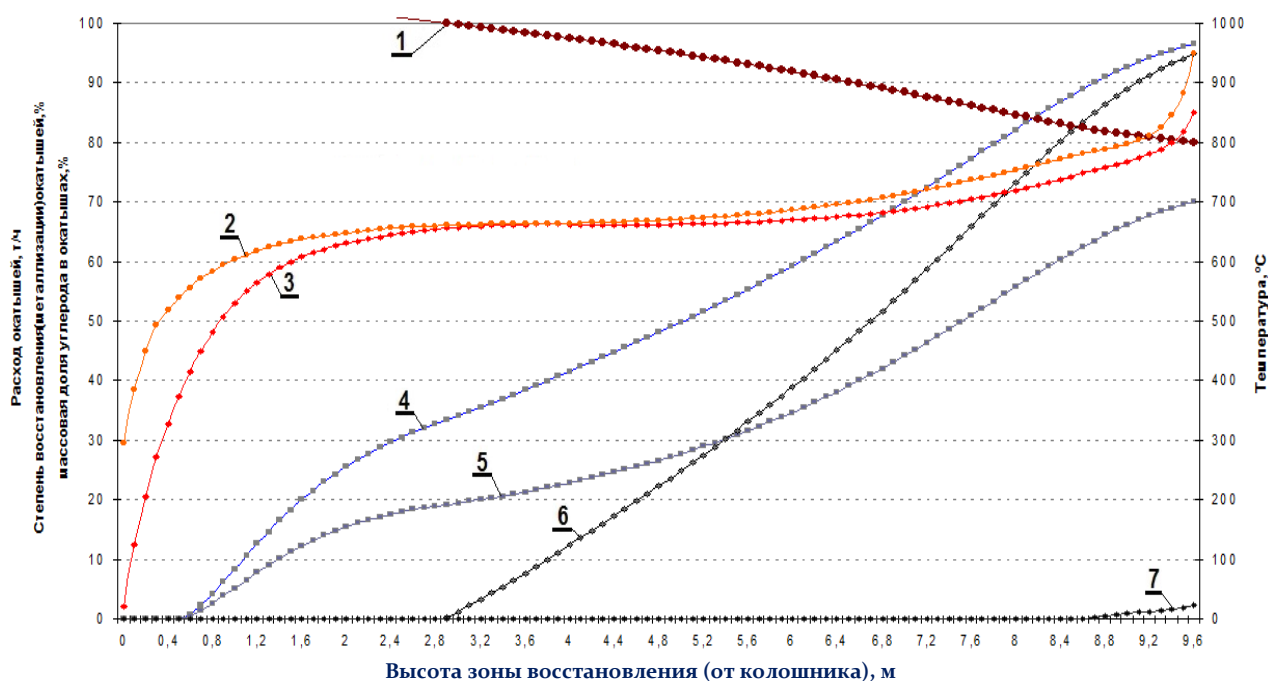
«основных рычагов управления», можно заметно поднять производство металлизированного продукта и сократить его энергозатраты, обеспечив нужное качество губчатого железа.

### Заключение

Разработана балансовая модель для установок прямого получения железа в шахтной печи, включающая материально-энергетические балансы всех основных блоков технологии металлизации (шахтная печь, реформер и др.), которая была положена в основу программного комплекса «АРМ Технолога» для анализа и оптимизации режимов работы установок металлизации ОАО «ОЭМК». Полученные результаты теплотехнических расчетов были использованы в проектах реконструкции установок металлизации и реализованы на практике.

Для выполнения анализов работы и прогнозирования режимов прямого получения железа вместе с программным комплексом «АРМ Технолога» дополнительно используют кинетико-динамическую модель (тепло-массообмен и газодинамика в слое), имитирующую динамику реального процесса металлизации окатышей в шахтной печи «Модель ШП». Это расширяет возможности разработки новых режимов работы установок металлизации с целью увеличения производства и улучшения качества губчатого железа.

Развитие **подготовленных** моделей состоит, на первом этапе, в разработке системы «Советчик мастера», как важного инструмента для оптимизации параметров и управления процессом металлизации окатышей. Дальнейшее развитие **приводит к созданию** АСУ ТП производства металлизированного продукта в шахтных печах.

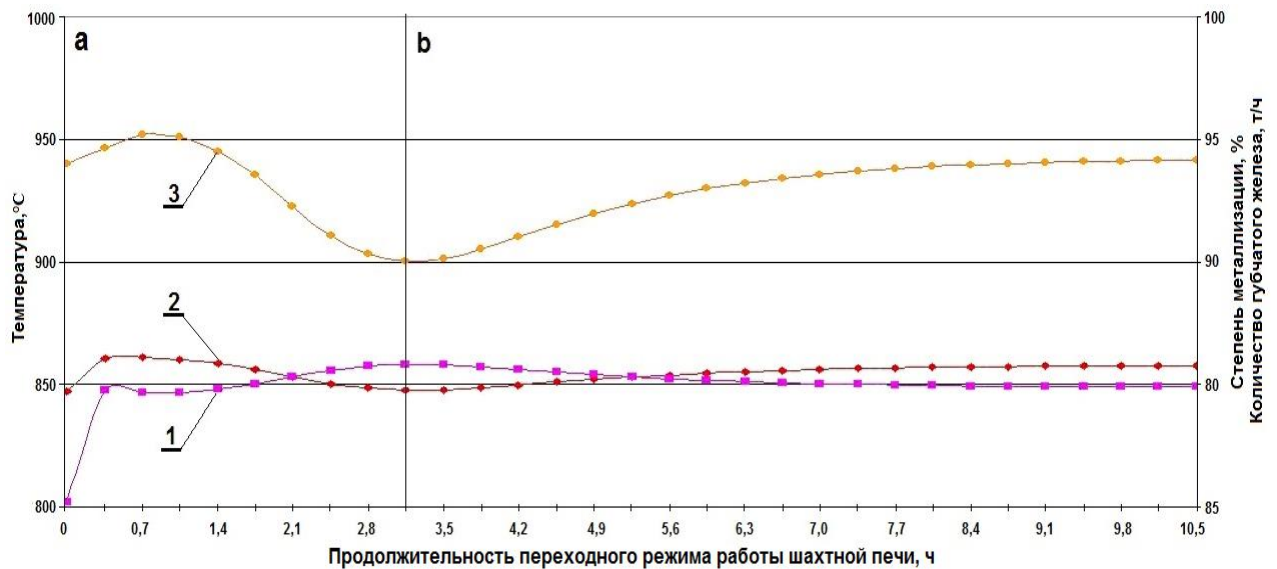


**Рис.1. Распределение параметров процесса металлизации по высоте шахтной печи**

**1** – расход окатышей, т/ч; **2** – температура газа  $T_g, ^\circ\text{C}$ ; **3** — температура окатышей  $T_m, ^\circ\text{C}$ ;

**4** – степень восстановления (общая)  $\phi, \%$ ; **5** – степень восстановления водородом  $\phi_{\text{N}_2}, \%$ ;

**6** – степень металлизации окатышей  $\phi_m, \%$ ; **7** – массовая доля углерода в окатышах, %.



**Рис.2. Динамика параметров губчатого железа на выходе из зоны восстановления шахтной печи (на нижней границе зоны – 9,6 м от колошника):**  
**а)** при увеличении расхода губчатого железа ( $\Delta G_m \approx 6\%$ );  
**б)** при увеличении расхода ( $\Delta V_g \approx 4\%$ ) и температуры ( $\Delta T_g \approx 2\%$ ) восстановительного газа.

1 – расход  $G_m$ , т/ч; 2 – температура  $T_m$ , °С; 3 – степень металлизации окатышей  $\phi_m$ , %.

### Список источников

1. Боковиков Б. А., Поволоцкий В. Ю., Гиммельфарб А. И. и др. Анализ шахтного восстановительного процесса с помощью математической модели / сб. "Прямое получение железа и порошковая металлургия". — М. : Металлургия, 1974. № 1. с.107 – 113.
2. Поволоцкий В.Ю., Ланцов Ю.В, Плотникова С.Ю. Анализ и совершенствование работы установок металлизации на базе модели «АРМ технолога». – Сталь, №7, 2011, с.16–19.
3. Поволоцкий В.Ю., Ланцов Ю.В, Плотникова С.Ю. Кинетико-динамическая модель прямого получения железа в шахтной печи. – Сталь, №8, 2014, с.35–38.

### Аннотация

Разработан программный комплекс балансовой модели для установок прямого получения железа («АРМ Технолога») и кинетико-динамической модели процесса металлизации окатышей в шахтной печи («Модель ШП»). Этот комплекс предназначен для анализа и прогнозов технологического процесса, а в качестве системы «Советчик мастера», как важного инструмента АСУ ТП, для оптимизации параметров и управления процессом металлизации окатышей в шахтной печи.

**Ключевые слова:** шахтная печь, установка металлизации, прямое получение железа, программный комплекс, губчатое железо.