

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ – СРЕДСТВО ПОЗНАНИЯ
ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Донецкий горно-металлургический институт (г. Алчевск)

Показано, что математические модели являются эффективным средством познания закономерностей доменной плавки. Модели разного типа являются взаимно дополняющими, и для наибольшей эффективности следует использовать весь их комплекс. Широкое их применение позволяет совершенствовать производство через автоматизацию и повышение квалификации персонала.

Принятые сокращения: АСУ – автоматизированная система управления, ВТ – вычислительная техника, ДП – доменный процесс, ИТ – информационные технологии, КПЧС – коэффициенты передачи частных связей, МРП, МСП – модели с распределенными и сосредоточенными параметрами, МСС – метод структурных схем, НОС – нелинейные обратные связи, МО – массообмен, ПСС – причинно-следственные связи, ТО – теплообмен, ТМО – тепломассообмен, ТАУ – теория автоматического управления.

Становление и развитие информационных технологий расширяет набор средств управления и меняет приоритеты в деятельности специалистов на производстве, в исследованиях и при обучении. Математические модели потенциально – одно из наиболее эффективных средств познания закономерностей плавки и повышения качества управления, но эти возможности пока почти не реализованы.

Главная причина – отсутствие преемственности: практически моделями пользуются только их создатели. Во многом это – результат господства неправильных оценок состояния теории доменного процесса и ее проблем (проблем именно теории, а не самого доменного производства).

Главную трудность моделирования ДП видят в нехватке данных для достоверного его описания. С другой стороны, считают, что наше дело – описать технологические закономерности, а дело математиков и компьютерщиков – превратить их в алгоритмы и программы, и что, при любой сложности взаимосвязанных явлений, достаточно правильно написать исходные уравнения и заложить в них достоверные коэффициенты. Эти взгляды не соответствуют идеологии ИТ.

Для оценки научных теорий А.Эйнштейн ввел два критерия: «внешнего оправдания» и «внутреннего совершенства». Наука формулирует аксиомы и доказывает теоремы. Первый критерий требует надежно базировать аксиомы на опытных фактах, а второй – сводить их число к минимуму: нельзя вводить аксиому по каждому частному вопросу.

В этих терминах пресловутая недостаточная изученность на самом деле есть недостаток внутреннего совершенства теории доменного про-

цесса: много аксиом, мало теорем. Лишние аксиомы – это недоказанные теоремы. Профессиональное мышление доменщиков отстаёт от реалий ИТ. Все ещё многие считают, что математика им не нужна, и нет ясности в вопросе, зачем она все-таки нужна. Наиболее верным следует признать тезис: «Цель расчетов – не числа, а понимание» [5].

Естественно, что большинство решений (исключая, разве что, долговременные и чрезвычайной важности) принимаются интуитивно – как ходьба или езда на велосипеде. Но интуиция хороша, когда базируется на фундаменте точных знаний. Они связаны через посредство опыта и общего интеллекта. Поэтому приобщение теории к практике – не только приземленные расчеты, но и глубокое постижение сущности основополагающих понятий, включая и фундаментальные.

«Познание – это моделирование. Что такое "знать"? Это значит – знать структуру предмета–системы, его связи с другими, его изменения во времени. Иногда мы знаем точно – подробные модели, в другой раз приблизительно – примитивные модели.» (Н. М. Амосов).

Нельзя говорить: сначала изучим, а потом будем считать. «Чтобы развивать теорию, нужен эксперимент, но чтобы знать, какой нужен эксперимент, нужна теория» (И. Померанчук). Построив устойчиво работающую модель, пусть с ненадежными коэффициентами, можно затем их варьировать, оценивая результаты фактами. Это и есть исследование.

Наиболее употребительные модели доменного тепломассообмена можно подразделить на четыре класса.

Статика:

1. МСП-С – алгебраические уравнения;

2. МРП-С – дифференциальные уравнения обыкновенные, аргумент: координата;

Динамика:

3. МСП-Д – дифференциальные уравнения обыкновенные, аргумент: время;

4. МРП-Д – дифференциальные уравнения в частных производных, аргументы: координаты, время.

Статические модели с сосредоточенными параметрами (МСП-С)

Их первоисток – балансовые методы расчета показателей плавки. Главная трудность их создания (в традиционном исполнении) – противоречие между стремлением к *линейности* и необходимостью учета *нелинейных* обратных связей (НОС). Для ее преодоления предложена модификация методики – линеаризованный расчет в отклонениях от известного базового режима [1, 2], для чего из ТАУ заимствован метод структурных схем (МСС). Используемая модификация последнего отличается от принятой в ТАУ непринципиальными деталями, облегчающими технологическую привязку (рис.1).

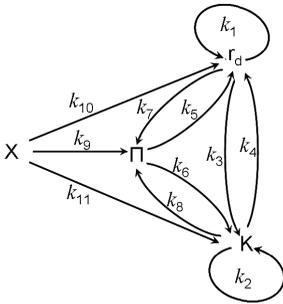


Рис.1. Укрупненная схема влияния обобщенного входа на основные показатели доменной плавки. Связи 9, 10, 11 – внешние, специфичные для входа X. Остальные связи – внутренние, одинаковы для любых X.

Ядро модели – определение полных производных выходных величин по внешним входам и выражение их через КПЧС. Система уравнений между производными всегда линейна, независимо от вида исходных уравнений. Поэтому здесь учет НОС совмещен с достоинствами линейной структуры. Указанное ядро непосредственно описывает малые отклонения от базы, и одновременно служит системой дифференциальных уравнений, численное интегрирование которых решает задачу для больших отклонений.

Часть КПЧС, независимо от степени изученности процесса, нельзя определить в рамках данной модели. Их нужно получить из внешних источников (данных практики, либо моделей иного уровня). Расчет в отклонениях позволяет делать это наиболее рациональным образом.

Явная форма ПСС создает преимущества перед другими моделями, в том числе и с большей разрешающей способностью. Она дисциплинирует мышление, повышая культуру дискуссий.

Возможно оценивать эффекты взаимодействия факторов через состав второй смешанной производной. Обычно эту задачу связывают с теорией планирования факторного эксперимента. Но в доменном производстве результат такого эксперимента обычно находится на пределе или даже за пределом его разрешающей способности. МСП–С позволяет применить более теоретичный подход.

Если выходная функция Y зависит от аргументов X_1, X_2 через посредство промежуточной переменной U , имеем:

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial X_1 \partial X_2} = \frac{\partial^2 U}{\partial X_1 \partial X_2} \cdot \frac{\partial Y}{\partial U} + \frac{\partial U}{\partial X_1} \cdot \frac{\partial U}{\partial X_2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial U^2}.$$

Иными словами, эффект парного взаимодействия распадается на две составляющих, которые назовем эффектами 1–го и 2–го рода. Есть практические важные комбинации, когда для оценки знака результата достаточно знать знаки входящих в них сомножителей, а они обычно известны достоверно.

Если промежуточный аргумент U есть произведение входных факторов или их функций f_1, f_2 , вторая смешанная производная равна 1 или

$f'_1 \cdot f'_2$, и эффект 1–го рода присутствует; если же он есть их сумма или иная линейная комбинация, смешанная производная равна нулю и эффект заведомо отсутствует.

Возможность эффекта 2–го рода определяется характером влияния промежуточного аргумента на выходную величину. Если оно линейно, эффект отсутствует, если нелинейно – присутствует.

Пример 1. Теплота дутья есть произведение его количества на удельное теплосодержание, а теплоотдача углерода, сгорающего у фурм, практически линейно от нее зависит. Поэтому для факторов, влияющих на указанную теплоотдачу через теплоту дутья, будет действовать только эффект 1–го рода. Например, для пары аргументов: температура дутья и содержание в нем кислорода, знаки производных теплоты дутья по ним противоположны, и смешанная производная отрицательна. Отсюда следует неблагоприятность одновременного увеличения значений этих входов.

Пример 2. Количество газа–восстановителя, вносимое углеродом кокса и вдуваемыми углеводородами, есть сумма этих составляющих, а на степень прямого восстановления оно влияет заведомо нелинейно. Поэтому для факторов, влияющих на r_d через него, действует эффект взаимодействия 2–го рода. Для пара аргументов: температура дутья и расход вдуваемой топливной добавки, знаки производных количества газа противоположны, а вторая производная r_d по количеству газа положительна. Следовательно, вторая смешанная производная r_d по этим входам отрицательна, и такое сочетание благоприятно.

Выводы из обоих примеров давно известны, но здесь они получены кратчайшим путем.

Статические модели с распределенными параметрами (МРП–С)

Наиболее пригодны для построения автономных моделей противоточного теплообмена и массообмена и наглядного описания частных закономерностей. Модель теплообмена общеизвестна, модель массообмена требует комментариев.

Графики хода процесса по высоте выявляют аналогию явлений тепло- и массообмена. При недостатке восстановителя процесс наиболее интенсивен внизу и затухает вверх, при его избытке – соответственно наоборот, аналогично случаям недостатка или избытка теплоносителя. С ростом восстановимости руды такое смещение выражено сильнее. Отсюда кажущийся парадокс – с улучшением кинетических условий восстановление начинается позже (рис.2). Для конечных результатов восстановления железа в изотермическом противотоке построены номограммы в безразмерных координатах, показывающие зависимость степеней восстановления и использования восстановителя от расхода газа и от комплексного кинетического критерия M (рис.3). Они выявляют основные системные закономерности, например, позволяют судить о характере влияния на результа-

ты плавки вдувания углеводородов (Рис.4). Несмотря на грубость модели, количественные оценки близки к наблюдаемым на практике.

Для конечных результатов восстановления железа в изотермическом противотоке построены номограммы в безразмерных координатах, показывающие зависимость степеней восстановления и использования восстановителя от расхода газа и от комплексного кинетического критерия M (рис.3). Они выявляют основные системные закономерности, например, позволяют судить о характере влияния на результаты плавки вдувания углеводородов (Рис.4). Несмотря на грубость модели, количественные оценки близки к наблюдаемым на практике.

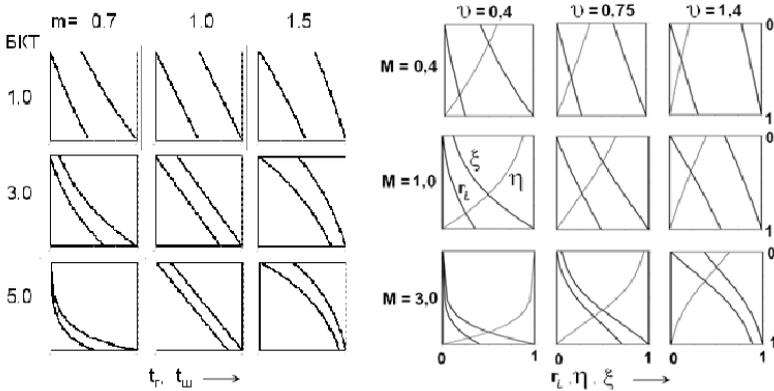


Рис.2. Аналогия автономных одноступенчатых противоточных моделей теплообмена и восстановления

Выше упоминалось о необходимости внесения в МСП-С информации из внешних источников. Данная модель может служить таким источником, оценивая значения КПЧС небалансовых зависимостей (рис.5). Ее алгоритм для замкнутой (автономной) системы имеет вид неявного выражения для зависимости

$$r_d = f(M, \nu): \quad M = \frac{-\ln(r_d \cdot \xi)}{1 - \frac{r_i}{\nu} + \frac{1}{\nu}}$$

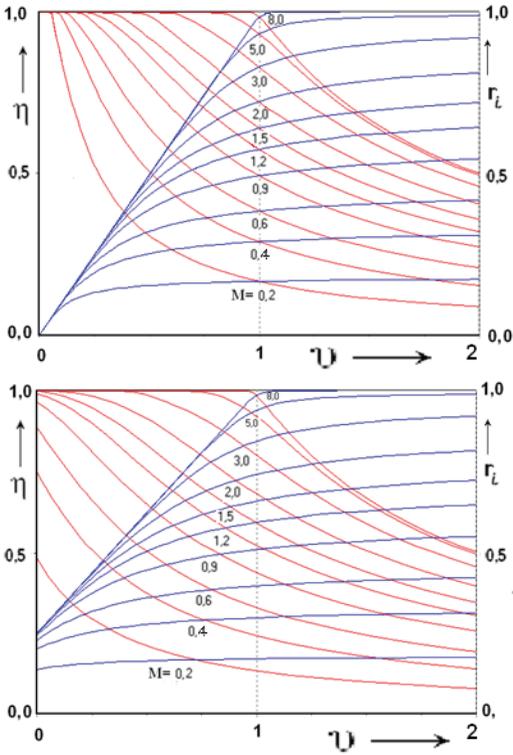


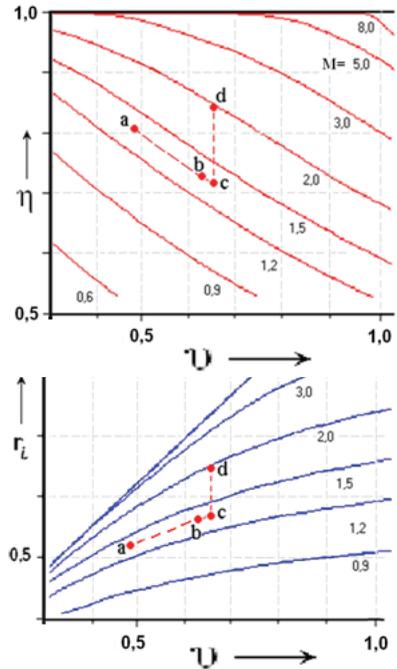
Рис.3. Влияние расхода и концентрации восстановителя на степень его использования и степень косвенного восстановления в противотоке без учета (вверху) и с учетом присоединения к газу CO – продукта прямого восстановления. u – безразмерный расход газа-восстановителя, M – комплексный кинетический критерий.

Рис. 4. Пример технологического анализа с помощью автономной МРП-С для массообмена: механизм влияния добавок природного газа к доменному дутью – исходный режим на атмосферном дутье

b – эффект добавки восстановителя

c – эффект замены части CO на H_2 без учета его кинетических преимуществ

d – эффект возрастания критерия M , главным образом за счет повышения концентрации активных газов.



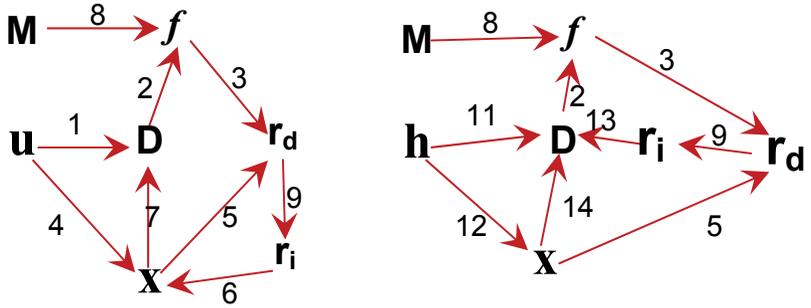


Рис.5. Структурные схемы зависимостей $rd = f(M, u)$ для замкнутой и $rd = f(M, h)$ для разомкнутой модели

Для перехода к разомкнутой системе, необходимого для учета более сложной системы взаимосвязей в доменной печи, производим замену переменных: $r_d = f(M, \eta)$, или $M = \frac{-\ln(r_d \cdot \xi)}{1 + \frac{\eta}{r_i}}$.

Смысл в том, что кусок руды «чувствует» не расход газа, а его состав. Поэтому расход u , уместный в автономной модели, здесь заменяем степенью использования η .

Базовое значение M вычисляем по этой формуле, разбитой на фрагменты: $\xi = 1 - \eta$, $\phi = r_d \cdot \xi$, $D = \xi + \frac{\eta}{r_i}$. Для определения КПЧС приводим вид формул в соответствие с направлением причинно-следственных связей: $\phi = e^{-M \cdot D}$, $r_d = \frac{\phi}{\xi} = \frac{e^{-M \cdot D}}{\xi}$. КПЧС при этом

выразятся формулами: $k_2 = \left(\frac{\partial \phi}{\partial D} \right)_M = -M \cdot \phi$, $k_3 = \left(\frac{\partial r_d}{\partial \phi} \right)_\xi = \frac{1}{\xi}$,

$k_5 = \left(\frac{\partial r_d}{\partial \xi} \right)_\phi = -\frac{\phi}{\xi^2}$, $k_8 = \left(\frac{\partial \phi}{\partial M} \right)_D = -D \cdot \phi$, $k_9 = \left(\frac{\partial r_i}{\partial r_d} \right) = -1$,

$$k_{11} = \left(\frac{\partial D}{\partial \eta} \right)_{\xi, r_i} = -1, \quad k_{12} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial \eta} \right) = -1, \quad k_{13} = \left(\frac{\partial D}{\partial r_i} \right)_{\xi, \eta} = -\frac{\eta}{r_i^2},$$

$$k_{14} = \left(\frac{\partial D}{\partial \xi} \right)_{r_i, \eta} = 1.$$

Результирующие КП для передачи в МСП–С, согласно схеме, примут вид:

$$\left(\frac{\partial r_d}{\partial M} \right)_{\eta} = \frac{k_8 \cdot k_3}{1 - k_2 \cdot k_3 \cdot k_9 \cdot k_{13}},$$

$$\left(\frac{\partial r_d}{\partial \eta} \right)_M = \frac{(k_{11} + k_{12} \cdot k_{14}) \cdot k_2 \cdot k_3 + k_{12} \cdot k_5}{1 - k_2 \cdot k_3 \cdot k_9 \cdot k_{13}}. \text{ Подробнее см. [3].}$$

Динамическая модель с сосредоточенными параметрами (МСП–Д)

Приближенно описывает динамику теплового состояния печи, как единого целого, типовыми звеньями 1 или 2 порядка. Строгие соотношения между переходными характеристиками ступенчатого и импульсного возмущений расширяют набор доступных технологических расчетов, например, для оценки действия холостых подач на динамику нагрева горна.

На основе модели создан тренажер технолога–доменщика (Т1). Ряд его версий использовался в ДонГТУ на протяжении 20 лет. Последняя версия адаптирована к современным системам программирования и усовершенствована как содержательно, так и сервисно. Принята преимущественно графическая форма выдачи результатов при одновременном расширении возможностей табличной формы, увеличено числа выдаваемых параметров, увеличен период времени, отражаемый на графиках, возможно просматривать результаты в таблицах с начала сеанса.

Динамическая модель с распределенными параметрами (МРП–Д).

Это – объединенная модель противоточного теплообмена с наибольшими из рассматриваемых типов разрешающими способностями. Ее можно использовать для исследования и статики, и динамики ДП. Повышенные трудности ее создания обусловлены проблемами обзримости и устойчивости вычислительных процедур. Первая преодолевается иерархической структурой модели, вторая – разработкой нестандартных вычислительных приемов на основе технологического мышления.

Верхнюю ступень иерархии составляет основная система уравнений, описывающая три главные из противоточных процессов – восстановление железа, газификацию углерода и теплообмен между газом и шихтой. Принимая для каждого по одному неизвестному параметру в обоих потоках, получаем 6 дифференциальных уравнений: три для газа и три для шихты.

Это – минимум, при котором доменный процесс остается самим собой, даже если пренебречь прочими явлениями. Но убрав из модели любой из указанных, мы лишаемся его ведущих характеристик. Все остальное учитывается расшифровкой переменных основной системы на низших ступенях иерархии.

Первоначально разработанная для ЭВМ третьего поколения [4], модель оказалась рекордной по быстродействию. Тем не менее, реально ее нельзя было использовать на ВТ того времени. После переработки применительно к современным технике и системам программирования, машинное время составляет 1/10000 от моделируемого процесса, и сняты ограничения для многоцелевого использования по этому и другим параметрам.

Внешне модель (для краткости T_2) сходна с T_1 , отличаясь более адекватным учетом взаимосвязей и использованием теоретических предпосылок для расчета динамических характеристик вместо ориентировочного их задания. Наряду с показом хода процесса во времени, рассматривается распределение температур и составов по высоте печи. Целесообразно совместное использование обоих тренажеров, T_1 преимущественно для целей обучения, а T_2 для технологических исследований и для уточнения настроек в T_1 и в МСП-С. В частности, только этим путем можно определить влияние соотношения водяных чисел потоков на степень прямого восстановления. Такое взаимодействие моделей позволяет наиболее эффективно использовать преимущества каждой из них, сводя к минимуму проявления их недостатков.

Ниже приводится сравнение моделей рассмотренных типов.

Сравнительные характеристики моделей	1 МСП-С	2 МРП-С	3 МСП-Д	4 МРП-Д
1. Удобство технологических расчетов	+	–	–	–
2. Явная форма ПСС	+	–	–	–
3. Быстрый перебор многих вариантов	+	+	–	–
4. Наименьшая зависимость от эмпирики	–	–	–	+
5. Теоретическая оценка статических характеристик	–	+	–	+
6. Теоретическое определение динамических характеристик	–	–	–	+
7. Простота приближенного автономного анализа закономерностей противотока	–	+	–	–
8. Прозрачность алгоритма.	+	+	–	–
9. Анализ пространственных полей.	–	+	–	+
10. Быстрая оценка динамики; расчет импульсных воздействий.	–	–	+	–

Заключение.

Вопреки сложившемуся стереотипу, утилитарная польза от моделей не подразделяется на производственную и учебную. Она едина, и состоит в повышении квалификации специалистов всех уровней, что и ведет к улучшению производственных результатов.

Модели разного типа являются взаимно дополняющими, и для наибольшей эффективности следует использовать весь их комплекс.

Ближайшей задачей является обеспечение преемственности в использовании моделей разными школами доменщиков.

1. *Шур А.Б.* Пути рационализации описания доменного процесса // *Металлургия и коксохимия*. – К., Техніка, 1978. – № 59.
2. *Метод* структурных схем и его нетрадиционные приложения: Учебн. пособ. – Алчевск: ДГМИ, 1993. – 88 с.
3. *Шур А.Б.* Дифференцирование сложных и неявно заданных функций для инженерных и иных приложений: Учебн. пособ. –3–е изд. – Алчевск: ДГМИ, 2004. – 50 с.
4. *Шур А.Б.* . Тепломассообмен в доменной печи, часть 1: Учебн. пособ. – Алчевск: ДГМИ, 2006. – 138 с.
5. *Шур А.Б., Шур Ю.А.* Математическая модель для исследования динамических характеристик доменного процесса. //В сб. Проблемы авто матизированного управления доменным производством. – К., КИА, 1977 .
6. *Хэмминг Р.В.* Численные методы для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1972 . – 400 с.

Сведения об авторе:

Шур Александр Борисович, к.т.н., доцент Донецкого горно-металлургического института (г Алчевск), член-корр. Академии акмеологических наук, консультант Генерального директора ОАО «Алчевский металлургический комбинат»