

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.046

В.П. Цымбал, С.П. Мочалов

Сибирский государственный индустриальный университет

СОЗДАНИЕ НОВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

В представленной работе на конкретном примере создания нового струйно-эмульсионного металлургического процесса показана возможность учета и реализации основных принципов синергетики (теории самоорганизации) непосредственно на этапе конструирования процесса и агрегата.

Исходные предпосылки концепции создания новых процессов и агрегатов

Рассмотрим цели, которые можно достичь при разработке нового процесса и агрегата.

1. Возможность получения различных видов металлургической продукции (достаточная универсальность).
2. Минимизация энергетических и материальных затрат.
3. Высокая скорость протекания процессов.
4. Устранение многозвенности технологии – непрерывность процесса.
5. Хорошая управляемость.

Как реализовать одновременно все эти столь важные цели? На начальных этапах разработки нового металлургического процесса и агрегата в 1985 – 1990 годах движущей силой принимаемых конструктивных решений являлись две взаимодействующие идейные линии. С одной стороны, ясно, что экстенсивный путь развития металлургии себя исчерпал, нужны принципиально новые качественные решения, с другой стороны, поиск теоретических и конструктивных решений для реализации поставленных выше целей и прежде всего достижения предельно высоких скоростей протекания гетерогенных химических реакций при хорошей управляемости процессом, а также минимизации энергозатрат. Остальные цели в этом случае становятся производными.

В качестве теоретической и даже можно сказать философской основы явилась синергетика. Какие же принципы синергетики [1, 2] возможно использовать и каких из поставленных выше целей можно добиться таким образом [3 – 6].

Наиболее важные принципы синергетики

1. Высокий уровень отклонения от термодинамического равновесия. Главная цель – повышение скорости химических реакций.

2. Организация стационарного колебательного режима, что позволяет обеспечить режим текущего равновесия (стабильное течение процесса) с минимальным производством энтропии. Повышение или понижение уровня поддержания этого стационара обеспечивается изменением соотношения приток-сток или конструктивных параметров агрегата, для чего необходима совместная модель процесса и объемлющей системы агрегата.

3. Принцип минимального принуждения, близкий по существу, к принципу Ле-Шателье. Использование этого принципа позволяет минимизировать затраты на управление и не мешать положительным тенденциям в системе процесс – агрегат.

4. Принцип круговой подчиненности. Его целесообразно использовать в сочетании с предыдущим принципом. Иллюстрация этого принципа представлена на рис. 1, где показано, что ансамбль частиц создает поле, а поле действует на каждую из частиц. Это позволяет создать согласованное (когерентное) поведение и обеспечить внутреннюю обратную связь в процессе, а также упростить математическое описание процесса за

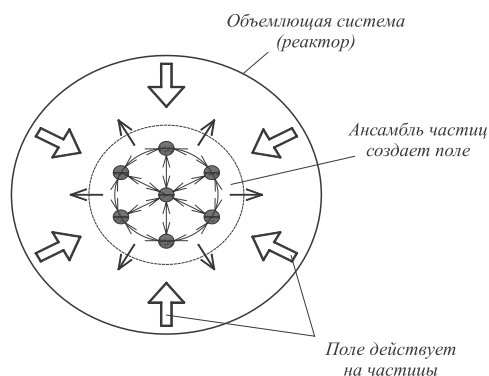


Рис. 1. Круговая подчиненность

счет уменьшения числа параметров порядка из-за когерентности.

Пути реализации принципов синергетики для достижения поставленных целей

Во-первых, необходимо создать математическую модель, связывающую параметры процесса (ансамбль частиц) и параметры агрегата (система, объемлющая поле), во-вторых необходимо сконструировать агрегат, реализующий эти задачи и принципы во взаимосвязи. При конструировании агрегата (рис. 2) были решены следующие основные задачи.

1. Резкое увеличение скорости гетерогенных физико-химических процессов, что было достигнуто двумя мероприятиями:

а) увеличением межфазной поверхности, что было реализовано отказом от стадии окомкования и использованием пылевидных материалов; переходом от раздельных фаз (металл – шлак) к созданию газозвеси путем диспергации шихты встречными струями в реакторе-осцилляторе; созданием эмульсии в рафинирующем отстойнике 5 за счет нижней подачи приготовленной в реакторе 3 газозвеси через газодинамически запираемый канал 4;

б) большим отклонением процессов от термодинамического равновесия, что реализовано созданием возможности повышения давления в реакторе-осцилляторе 3 за счет аэродинамического запирания канала 4 и режима подачи реагентов; полной изоляцией процесса от атмосферы и созданием вынужденного давления продуктов реакции через все последовательно соединенные аппараты, включая теплоутилизирующие и очистные устройства, что в сочетании с переходом к газозвеси позволило сделать резкий скачок в умень-

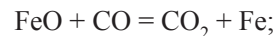
шении удельного объема металлургических агрегатов и снижении капиталоемкости.

В процессе Корекс, например, для транспортировки продуктов из первого агрегата во второй используются весьма громоздкие и дорогие высокотемпературные шнековые питатели.

2. Создание проточного реактора-осциллятора, в котором реализована внутренняя обратная связь благодаря сочетанию эффекта газодинамического запирания канала 4 с принципом круговой подчиненности частицы поля и принципом Ле-Шаталье-Брауна. При достижении в этом канале критической скорости истечения (которая зависит от скорости звука) давление в реакторе 3 начинает расти, скорости реакций с газообразными продуктами (v_r) начинают тормозиться, а объемная доля конденсированной фазы металл – шлак (V_k) начинает увеличиваться. Это приводит к изменению объемного газосодержания

$$\alpha_r = \frac{v_r}{v_r + V_k} \quad (1)$$

и к изменению соотношений исходных и конечных продуктов в системе, например, следующих окислительно-восстановительных реакций:



а также к уменьшению поступления кислорода в реактор из коллектора вследствие увеличения потенциала давлений. В конечном итоге с учетом переходного запаздывания развивается обратная тенденция и процесс

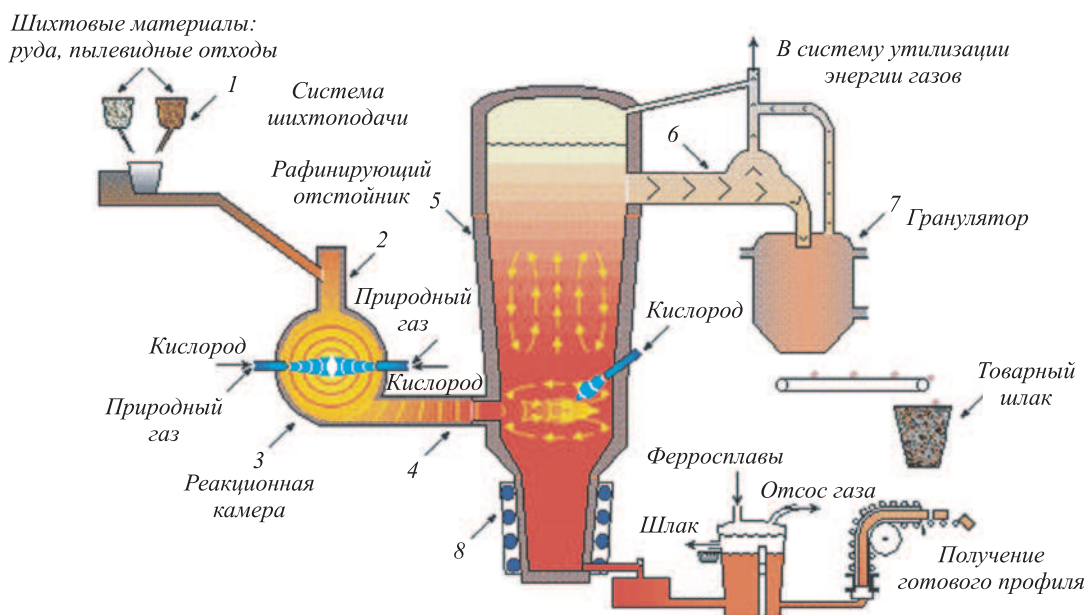


Рис. 2. Технологическая схема процесса и агрегата типа струйно-эмульсионного реактора

защипывается. Таким образом, в реакторе-осцилляторе 4 и на его выходе создается неравновесный колебательный стационар, уровень которого можно изменять с учетом необходимой производительности и величины потенциала давления, необходимого для проталкивания продуктов реакции через все элементы агрегата, а также через теплоутилизирующие и очистные установки.

Связь между интенсивностью процессов, протекающих в реакторе 4 (модели процесса), и его основными конструктивными элементами (модели агрегата) описывается следующим соотношением:

$$\frac{dP_p}{dt} = \frac{RT}{V_p} (V_{пр} - V_{отв}), \quad (2)$$

где P_p – давление газозвеси в реакторе; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; V_p – объем реактора; $V_{пр}$ – секундный объем прихода (образования) газозвеси (определяется из реализации математической модели); $V_{отв} = v_{отв} S_k$ – секундный объем отвода газозвеси; S_k – площадь соединительного канала; $v_{отв}$ – скорость отвода газозвеси (двухфазной среды), являющаяся нелинейной функцией, т.е.

$$v_{отв} = \begin{cases} f(P_p - P_0) & \text{при } v_{отв} < v_{кр}; \\ f(\alpha_r) & \text{при } v_{отв} > v_{кр}. \end{cases}$$

Зависимость скорости звука c_1 (и $v_{отв}$) от газосодержания $\varphi = \alpha_r$ представлена на рис. 3. На рис. 4 показан характер колебательных процессов в низкотемпературной модели реактора-осциллятора.

Как следует из теоремы [1] для колебательных систем (моделей типа Лотка-Вольтерра) и из теоремы о минимальном производстве энтропии, энтропия колебательного движения меньше, чем энтропия среднетраекторного движения, из чего следует, что принудительное подавление колебаний, например, с помощью стабилизирующего регулирования не является эффективным управлением для сложных систем, обладающих способностью к самоорганизации.

3. Нижняя подача приготовленной в реакторе газозвеси в рафинирующий отстойник 5, который

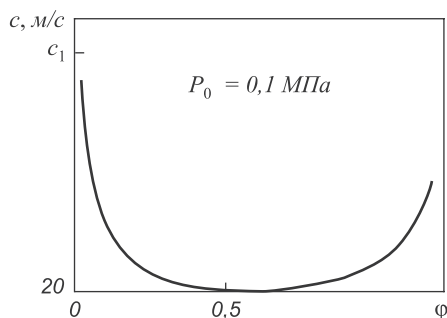


Рис. 3. Зависимость скорости звука в водовоздушной смеси от газосодержания

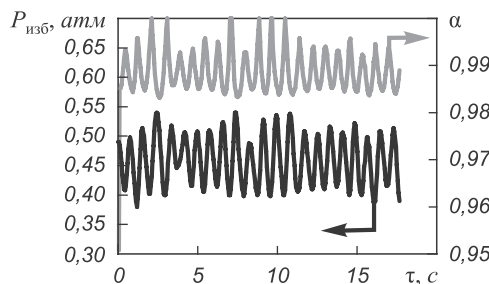


Рис. 4. Результаты исследования динамических пульсирующих режимов в реакторе-осцилляторе

представляет собой колонный реактор, реализующий вместе со шлакоприемником задачу разделения потоков металла, шлака и газа. Это позволяет более гибко управлять составом получаемых продуктов за счет изменения соотношения скоростей реакций и времени пребывания металла и шлака. Удаляемый из верхней части рафинирующего отстойника шлак не находится в термодинамическом равновесии с металлом, что позволяет получать в этом агрегате не только чугун, но и сталь, а также другие сплавы.

Энергия вылетающей из реактора-осциллятора струи в результате торможения в плотных слоях шлака над зеркалом металла превращается в потенциал давления, которое (как провальная решетка агрегата кипящего слоя) вместе с динамическим напором поднимающегося газа держит столб газошлакодинамической эмульсии в верхней части колонного реактора 5. В этой эмульсии и протекают основные, например, восстановительные процессы, а восстановленное железо обратным потоком вдоль стен колонного реактора опускается в копильник 8.

Интересно также подчеркнуть, что соотношение расхода поднимающегося в колонном реакторе газа и площади его поперечного сечения выбирается таким образом, чтобы процесс в верхней половине этого реактора находился [5] в инерционно-турбулентном режиме, при котором пылевидные частицы эффективно «намазываются» на капли жидкого шлака и металла. В этом случае находящийся здесь слой эмульсии играет роль мокрой газоочистки (это подтверждено на опытной установке), а процессы в соответствии с выводами из S-теоремы Климонтовича имеют минимальное значение энтропии, отнесенное к средней энергии.

В результате описанного подхода был создан в значительной степени универсальный технологический агрегат: самоорганизующийся реактор-осциллятор, который может использоваться для реализации целого ряда металлургических и энергетических технологий.

Прямое восстановление пылевидных руд и отходов (шламов, окалины, хвостов обогащения и т.п.) с получением, например, шихтовой заготовки

Коротко это представляется следующим образом (рис. 2).

Основными конструктивными элементами агрегата СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор) являются шаровидная реакционная камера (реактор-осциллятор) 3 и рафинирующий отстойник (колонный реактор) 5 с системами подачи шихты 1, энергоносителей (газа, угля и кислорода) 2 и системами циркуляции воды в ограждающих гарнисажных элементах агрегата. В реакторе-осцилляторе на встречных струях кислорода и природного газа осуществляется диспергация шихты и частичное сжигание топлива. Приготовленная в этом реакторе газовзвесь с объемным газосодержанием порядка 0,99 через газодинамически запираемый канал подается в нижнюю часть колонного реактора под высокий слой газошлаковой эмульсии, где происходит преимущественное восстановление оксидов железа. К нижней части колонного реактора пристыковывается индукционно подогреваемый копильник 8, в котором накапливается восстановленное из оксидов железа и другие металлы, а обезжелезненный сильно вспененный шлак выталкивается под давлением из верхней части колонного реактора 6 в гранулятор 7 и может использоваться как сырье для производства цемента, в качестве адсорбента или малотеплопроводного заполнителя и т.д.

Переработка бытового мусора

Наиболее эффективно эта задача решается в комплексе с описанной выше технологией путем подачи брикетированного мусора в колонный реактор, в слой шлаковой эмульсии, состоящей из оксидов железа, кремния, кальция и др. При этом углерод и водород мусора играют роль восстановителей, отбирая кислород у оксидов железа, что позволяет вдвое уменьшить расход кислорода по сравнению с простым сжиганием мусора, например, в котельных агрегатах. Из-за полной замкнутости процесса обеспечивается его экологичность. Мусор сгорает внутри слоя пенистой газо-шлако-металлической эмульсии, при этом такие экологически вредные вещества, например бензапирен и другие ПАУ разлагаются на более простые вещества.

Переработка относительно бедных (20 – 30 % Mn) пылеобразных железомарганцевых руд (без окомкования)

При этом можно получать прямым путем из пылевидной железо-марганцевой руды ферромарганец, высокомарганцевистые стали (типа стали Гадфильда), в том числе, по-видимому, безникелевую нержавейку, а также сплавы типа Fe–Mn–Al.

Можно создать абсолютно изолированный от окружающей среды экологически чистый агрегат, в котором вместо дыма получается энергетический газ. Например, для прямого восстановления марганца нужно иметь в атмосфере колонного реактора около 90 % CO. Такой газ, кроме энергетической ценности, достаточно легко превратить в синтез-газ путем пропускания через ре-

шетку с раскаленным коксом. При этом одновременно осуществляется химическая регенерация физического тепла отходящих газов и получается еще более ценный газ, пригодный для переработки, например, в синтетическое моторное топливо.

Безотходная переработка титаномагнетитовых руд и концентратов с получением железа, легированного рядом элементов (Mn, Mo и др.), и титанистого шлака с содержанием порядка 45 – 50 % TiO₂, который в горячем состоянии может быть восстановлен кремнием и алюминием до ферротитана или выдаваться в гранулированном виде как дешевое (отход производства стали) и удобное для переработки сырье для титановой промышленности. Имеется патент на эту технологию [6].

Газификация и комплексная переработка пылеугольного топлива и хвостов обогащения с получением синтез-газа

При этом в первом реакторе создается газовзвесь, а в колонном реакторе осуществляется эффективное сжигание и газификация угля в шлаковом слое. Получаемый газ может использоваться как товарный или корректироваться до кондиционного состава синтез-газа, который может быть превращен в диметилвый эфир – экологически чистое дизельное топливо. Реальность такого превращения обсуждалась с Институтом нефтехимического синтеза РАН.

При сжигании 1 т угля можно получить порядка 6 МДж физического тепла (товарной воды или пара), 1000 м³ энергетического газа с теплосодержанием 15 МДж, 15 – 20 кг металла в виде ценной природнолегированной шихтовой заготовки и 200 кг обезжелезненного сильно вспененного шлака, пригодного в качестве адсорбента или сырья для производства цемента.

Создание малогабаритных (или даже мобильных) энергетических или энергометаллургических установок – мини-котельных с возможностью выработки наряду с металлом горячей воды, газа, электрической энергии, сжатого воздуха. Такие установки целесообразно использовать вблизи мест образования отходов.

О подходах к управлению синергетическими объектами

Анализ сталеплавильных процессов с позиций теории самоорганизации позволяет несколько по-иному взглянуть на принципы управления этими сложными многосвязными объектами. Сформировавшийся в теории автоматического управления подход, во многом ориентированный на задачи управления летательными аппаратами, основан на идее разделения программного и возмущенного движения, что, по-видимому, малоприменяемо для рассматриваемых нами объектов. Если продолжить аналогию с летательными аппаратами, то можно представить, что траектории основных параме-

тров сталеплавильной ванны (обезуглероживания, нагрева, окисленности шлака и других) как бы погружены в среду, через которую они могут воздействовать друг на друга. Так, например, изменение по каким-либо причинам траектории обезуглероживания приводит к изменению траекторий нагрева металла и окисленности шлака. Навязывание объекту в этих условиях заранее заданных программных траекторий и попытки поддержания их методом регулирования по отклонению приводят к неоптимальным результатам. И наоборот, использование особенностей внутреннего самодвижения системы (собственных функций объекта), выбор «резонансных» управлений позволяют добиться конечных результатов с малыми затратами на управление. При этом очень важно учитывать внутренние обратные связи в объекте.

Можно выделить два приемлемых подхода к управлению самоорганизующимися объектами физико-химического типа.

1. Если имеется достаточно адекватная модель, то в результате ее исследования и оптимизации могут быть найдены собственные функции объекта и на их основе программно реализованы (управление в большем), например, режимы с обострением, удовлетворяющие целям функционирования данного объекта [5], или какие-либо другие технологически оптимальные режимы.

2. Если имеется модель только качественного плана или данные о параметрах порядка с учетом принципа подчиненности, то на объект могут накладываться периодические пробные воздействия в сторону повышения степени неравновесности (увеличение потока вещества или энергии) и проверяться результат самоорганизации (движение в нужном направлении) через период, близкий к наиболее медленному параметру. Успешный пример такого подхода приведен в работе [5].

Наиболее приемлемым к управлению такими системами является подход, в какой-то мере согласующийся

с принципами теории *дуального управления* А.А. Фельдбаума, идея которого в самом простейшем виде сводится к следующему: сначала изучи, а затем прими решение по управлению. Проще всего он реализуется через систему управления на основе прогнозирующей адаптивной модели. Подробнее подход к управлению синергетическими объектами рассматривается в работе [5].

Выводы. Показано, что использование при создании нового процесса и агрегата идей и принципов синергетики привело к выбору интересных физических эффектов и новых конструктивных решений, что позволило создать, по существу, достаточно универсальный технологический агрегат: струйно-эмульсионный самоорганизующийся реактор-осциллятор, обладающий значительными преимуществами перед известными процессами и агрегатами и пригодный для реализации целого ряда технологий. При управлении такими объектами необходимо учитывать прежде всего их внутреннее самодвижение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
2. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
3. Цымбал В., Кустов Б., Айзатулов Р. и др. // *Металлы Евразии*. 1996. № 8. С. 114 – 117.
4. European Patent. International number PCT/RU93/00325. Process for the continuous refining of metal and a facility for carrying out said process / V.P. Tsybal, S.P. Mochalov, K.M. Shakirov a.e. // International publication number WO 95/18238. 1995.
5. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х частях. Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Учеб. пособие / Под ред. В.П. Цымбала. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 264 с.
6. Цымбал В.П., Мочалов С.П. // *Металлы Евразии*. 2006. № 6. С. 78 – 80.

© 2012 г. В.П. Цымбал, С.П. Мочалов
Поступила 16 июня 2010 г.