

УДК 621.643:628.147.22

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ САМООРГАНИЗАЦИИ И ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР ПРИ СОЗДАНИИ НОВОГО СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Цымбал В.П., д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования
Кожемяченко В.И., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования
Рыбенко И.А., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования
Падалко А.Г., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий и программирования
Оленников А.А., к.т.н., доцент кафедры теплогазоводоснабжения,
водоотведения и вентиляции (tgsy-sibsiu@mail.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
 (654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрен принцип работы агрегата типа струйно-эмульсионного реактора (СЭР). Показана возможность использования и реализации основных принципов синергетики (теории самоорганизации) при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса и агрегата СЭР. Рассматриваются конкретные примеры управления соотношением скоростей восстановительных и окислительных процессов, а, следовательно, и химическим составом металла путем организации пространственных динамических диссипативных структур. Описаны особенности процесса СЭР, позволяющие в процессе прямого восстановления управлять составом металла с использованием некоторых принципов синергетики.

Ключевые слова: синергетика, теория самоорганизации, диссипативная структура, струйно-эмульсионный, металлургический процесс, агрегат, управление, восстановление, окисление.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-572-577

В настоящей работе на примере создания нового струйно-эмульсионного металлургического процесса и агрегата делается попытка показать возможность использования и реализации основных принципов синергетики (теории самоорганизации) на этапе конструирования процесса и агрегата СЭР, а также технологического управления химическим составом металла путем организации пространственных динамических структур.

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, неприемлемо для рассматриваемых нами объектов. Если продолжить аналогию с летательными аппаратами, то можно представить, что траектории основных параметров 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. Поэтому попытка управления од-

ной из них приводит к возмущениям на других траекториях. Кроме того, непонятно, какая форма траектории каждого из внутренне связанных параметров является рациональной. Навязывание объекту в этих условиях заранее заданных программных траекторий и попытки поддержания их методом регулирования по отклонению приводят к неоптимальным результатам и даже к снижению эффективности функционирования объекта. 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.

Появление в 1980 – 81 гг. фундаментальных трудов Н. Пригожина [1] и Г. Хакена [2] по теории самоорганизации (синергетике) помогло понять, почему такими объектами нельзя управлять «по самолетному». Но при этом естественно возникает вопрос, как конкретно использовать синергетический эффект для управления такими сложными многосвязными процессами.

Создание непрерывного сталеплавильного процесса было давней мечтой металлургов. А.М. Бигеев, вложивший большой вклад в разработку этого процесса [3 – 5], важным и необходимым преимуществом такого процесса, наряду с отсутствием промежуточных потерь энергии и сырья, считал наличие отдельных камер (зон)

для реализации необходимых технологических операций (обезуглероживания, десульфурации, дефосфорации и др.). Однако в то время в связи протеканием процесса близко к состоянию равновесия и, как следствие, низкими скоростями химических реакций, эти камеры получались достаточно громоздкими, а агрегат в целом капиталоемким.

Благодаря переходу в область газозвеси и эмульсии, а также реализации описанных выше принципов удалось создать (*вместо физически реализуемых камер*) определенные зоны в виде динамических диссипативных структур, которые существуют только на момент протекания процесса в определенном режиме. При этом задача десульфурации решается за счет наличия огромной реакционной поверхности на газовых пузырьках, а задача дефосфорации может решаться за счет управления гранулометрическим составом шихтовых материалов, подаваемых на границу металл–шлак. На задаче управления содержанием углерода остановимся несколько ниже отдельно.

Прежде чем показать, почему в процессе СЭР в отличие, например, от процесса Корекс возможно полу-

чение стали или полупродукта с более низким содержанием углерода, чем в чугуна, кратко остановимся на принципе работы агрегата [6–9]. Основу технологической схемы агрегата типа СЭР (рис. 1) составляют: система подачи шихты 1–5; реактор-осциллятор 6; соединительный канал с газодинамическим самозапираанием 7; рафинирующий отстойник 8, одновременно играющий роль первой ступени мокрой газоочистки; копыльник 9, а также система гарнисажного охлаждения 10; шлакоприемник 13 с гранулятором 14; система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17 и система газоочистки 18.

Процесс осуществляется следующим образом. Мелкодисперсная шихта, состоящая из смеси оксидов железа и других металлов, вместе с частью твердых восстановителей подается в центральную зону реакционной камеры 6, где в месте встречи потоков кислорода образуется диск уплотнения, на котором в результате динамического взаимодействия происходит интенсивная турбулизация потока шихты и образование больших поверхностей для гетерогенного химического взаимодействия. При этом за счет неполного сжигания в реак-

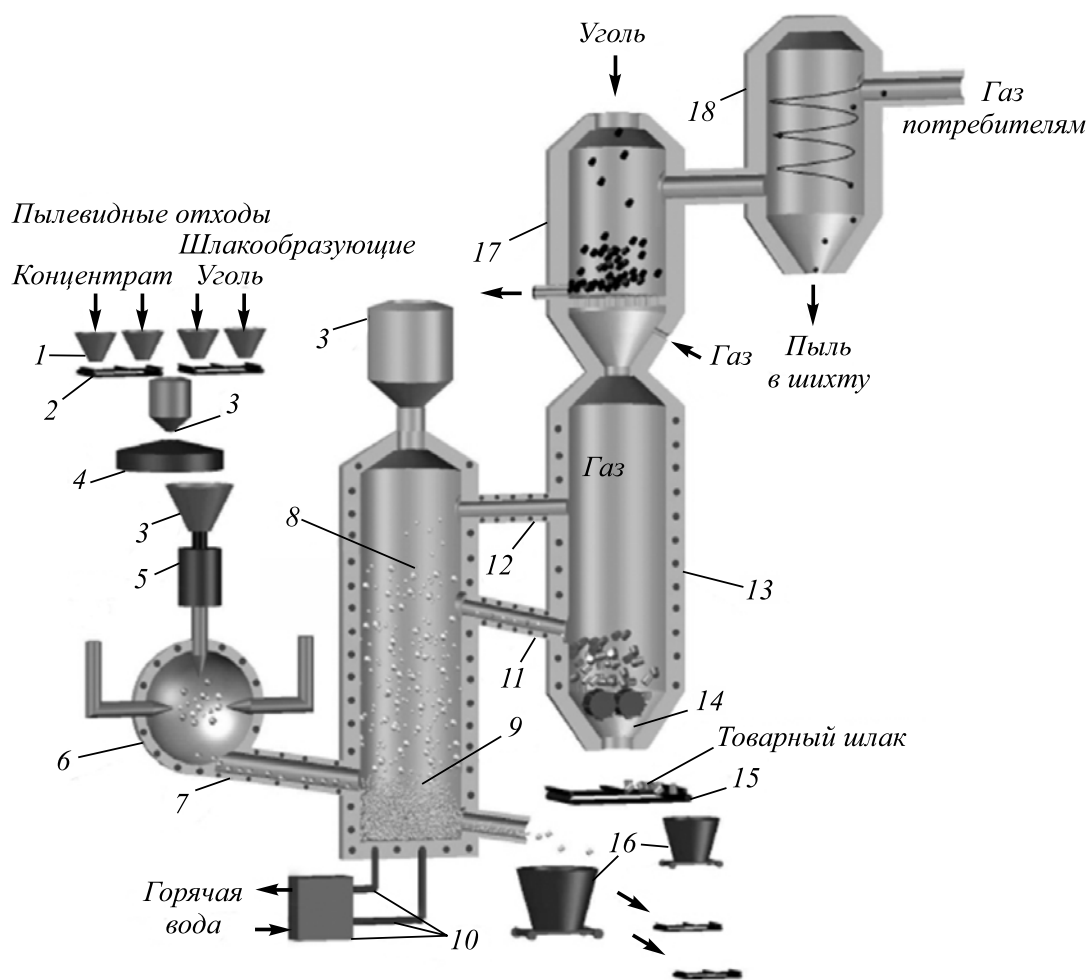


Рис. 1. Технологическая схема мини-модуля на основе процесса типа СЭР

Fig. 1. Flow chart of a mini-module based on the process of JER type

ционной камере части угля, природного газа или другого восстановителя (в соответствии с долей поданного кислорода) происходит нагрев и частичное восстановление оксидов.

Остановимся на диссипативных структурах, совокупность которых и позволила получить рассмотренный агрегат и протекающий в нем процесс.

В качестве первой диссипативной структуры рассмотрим диск уплотнения, который образуется при соударении встречных струй. На рис. 2 показан эксперимент по проверке возможности использования этого эффекта путем прерывания и распыления азотом струи чугуна из стотонного разливочного ковша в цехе изложниц ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК».

Благодаря второй диссипативной структуре, включающей в себя рассмотренный выше эффект, удалось создать так называемый реактор-осциллятор, в котором оказалось возможным реализовать сразу несколько принципов теории самоорганизации (синергетики): большое отклонение от термодинамического равновесия, принцип наименьшего принуждения (Ле-Шателье-Брауна), принцип круговой подчиненности. Это в свою очередь позволило создавать и автоматически поддерживать неравновесный колебательный стационарный режим на любом (в пределах возможности агрегата) уровне.

Для того, чтобы иметь возможность повышать давление в шарообразном реакторе, нужно было найти способ, как управлять истечением двухфазной среды (газовзвеси или эмульсии) из этого реактора. Было даже предположение поставить в соединительный канал заслонку, защищенную высокоогнеупорным материалом. Но в результате использования еще одного интересного физического явления (эффекта критического истечения двухфазной среды) было найдено простое решение в виде газодинамически запираемого канала. Рассмотрим механизм, заложенный в основу функционирования ре-

актора-осциллятора, в том числе механизм формирования в нем двухфазного потока газовзвеси, а затем и газошлакометаллической эмульсии.

Реализация важного принципа синергетики – значительного отклонения системы от состояния термодинамического равновесия – достигается за счет выбора площади сечения выходного канала шарообразного реактора (рис. 3, а) таким образом, чтобы скорость истечения двухфазного потока q_3 находилась в нелинейной области зависимости скорости этого потока от газосодержания (рис. 3, б). Процесс как бы перемещается по правой ветви этой характеристики.

Создав затруднения для истечения получающего при этом двухфазного потока q_3 и учитывая нелинейную зависимость его критической скорости от газосодержания, которое в свою очередь зависит от характера протекающих в реакторе процессов, получаем пульсирующий характер изменения давления в реакторе. Зависимость критической скорости истечения двухфазного потока ($C_{кр}$) от объемного газосодержания (α_r) для системы газ–жидкость представлена на рис. 3, б.

Стационарная диссипативная структура на выходе реактора-осциллятора играет ключевую роль в обеспечении функционирования агрегата в целом и в том числе самоорганизующегося характера протекающих в нем процессов, поскольку реактор-осциллятор является одновременно своеобразным карбюратором (смесителя) и компрессором (побудителем расхода), проталкивающим рабочую смесь через все последующие аппараты.

Перейдем к анализу структур, образующихся в колонном реакторе-отстойнике (рис. 1). Для лучшего понимания обратимся к зонной модели (рис. 4). Полученная в реакционной камере 6 (зоны 1 и 2) газовзвесь с объемным газосодержанием порядка 0,99 через соединительный канал (зону 3) подается в нижнюю часть рафинирующего отстойника над верхним срезом копияльника (зоны 5 и 8). При этом выходящая из соединительного потока двухфазная струя играет роль своеобразной динамической подушки, или провальной решетки (зона 4 – это третья диссипативная структура), отделяющей столб пенной газошлаковой эмульсии, играющей одновременно роль мокрой газоочистки, от металла, накапливающегося в копияльнике (зона 8), благодаря опусканию по вертикальным пристенным слоям капель металла, получающихся в результате восстановительных процессов в газошлаковой эмульсии в зоне 6.

Использование в качестве рафинирующего отстойника вертикального колонного реактора с нижней подачей реакционной газовзвеси в сочетании с существенным отклонением процессов от термодинамического равновесия является важнейшим фактором, который обуславливает возможность разделения потока железоуглеродистого металла, оседающего в копияльнике 9 (рис. 1), и потока обедненного железом



Рис. 2. Обдув чугуна встречными струями

Fig. 2. Cast iron blow-off with the approaching jets

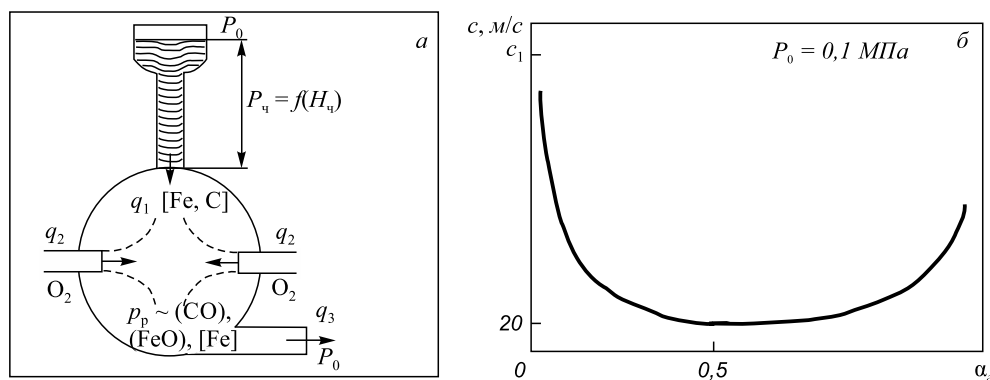


Рис. 3. Шарообразный реактор (а) и зависимость скорости потока от газосодержания (б):

p_0, p_p и p_q – соответственно давление атмосферное, в реакторе и столба шихты; q_1, q_2 и q_3 – потоки шихты, кислорода и истекающей из реактора двухфазной среды

Fig. 3. Ball-shaped reactor (a) and jet speed dependence on gas-content (b):

p_0, p_p and p_q – atmospheric pressure correspondently, in the reactor and stock column; q_1, q_2 and q_3 – charge flow, as well as oxygen and running from the reactor two-phase medium

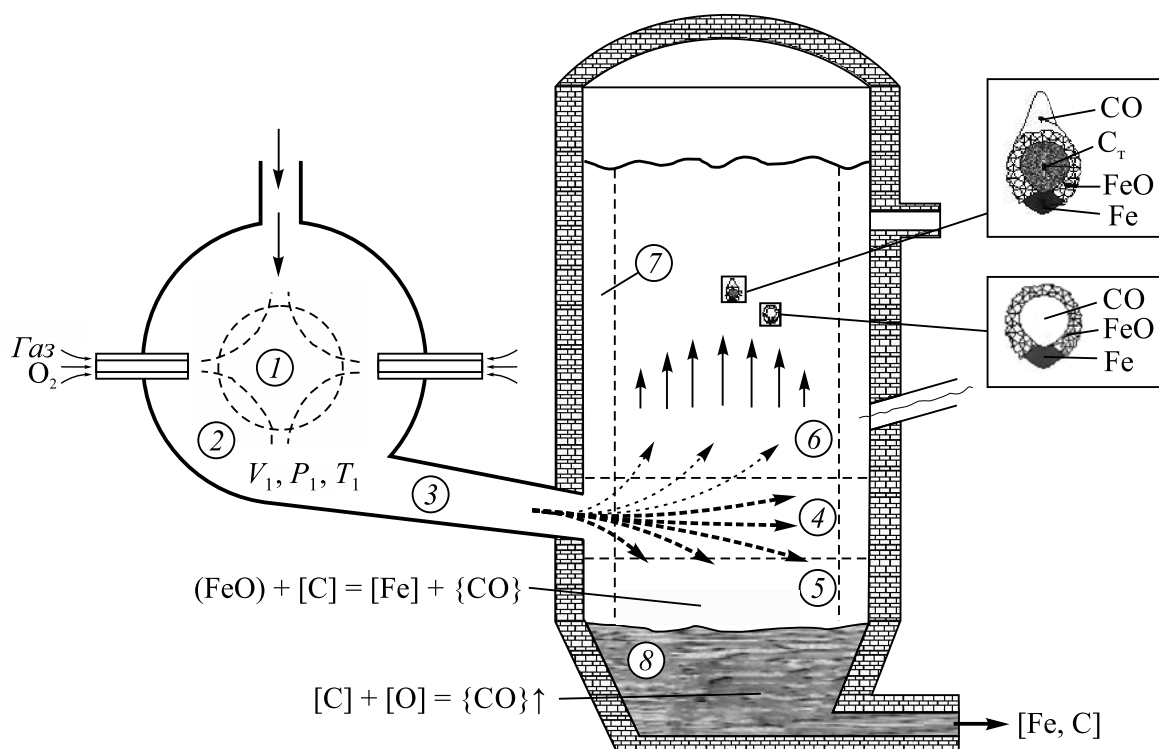


Рис. 4. Зонная модель процесса СЭР

Fig. 4. Zone model of a JER process

шлака, отводимого по наклонному каналу 11 в шлакоприемник 13.

В результате этих процессов образуется *четвертая диссипативная структура* – сепаратор металла, шлака и газа, которая получается в результате противодействия гравитационных и аэродинамических сил в верхней половине рафинирующего отстойника (зона б), где образующиеся в результате восстановительных процессов частицы железа, имеющие плотность в три раза большую, чем шлак, вследствие параболического распределения

скорости по сечению скатываются на периферию колонного реактора и опускаются в копильник, газослаковая эмульсия выдавливается в шлакоприемник.

Одновременно с этим образуется *пятая диссипативная структура* – неравномерное распределение параметров (плотности, газосодержания и химического состава) по высоте агрегата. Распределенность содержания оксидов железа по высоте обуславливается прежде всего термодинамически неравновесным характером процессов, протекающих в реакционной камере

и рафинирующем отстойнике, в том числе интенсивными потоками вещества и энергии, поступающими снизу через соединительный канал 7 из реакционной камеры 6 (рис. 1). Эта структура имеет большое значение для управления соотношением скоростей восстановительных и окислительных процессов, а, следовательно, и содержанием углерода.

В заключение упомянем еще об одной (шестой) диссипативной структуре, которую удалось наблюдать во время аварийного прожигания крышки колонного реактора. При этом вылетело большое количество полых шариков диаметром порядка 5 мм и толщиной стенок около 1 мм. Это явилось наглядным подтверждением существования в колонном реакторе инерционно-турбулентного режима, в результате которого пленки и частицы оксидов в эмульсии наматываются на пузырьки газа. Это явление имеет большое значение для удаления серы, а также для предварительной очистки отходящих газов.

После представленного выше анализа можно сделать заключительные выводы об особенностях процесса СЭР, позволяющих в процессе прямого восстановления управлять составом металла с использованием некоторых принципов синергетики.

Выводы. Благодаря наличию побудителя расхода (реактора-осцилятора), повышенного давления, внутреннего транспорта и нижней подачи рабочей смеси в вертикальный колонный реактор в нем создаются диссипативные структуры (зоны), в которых возможно независимое управление отдельными процессами. В колонном реакторе создан диссипативный сепаратор металла, шлака и газа, а плотность эмульсии по высоте распределена по параболическому закону, при этом временем пребывания металла и шлака можно в определенной мере управлять независимо. Химические реакции [10] протекают в неравновесных условиях с отводом продуктов реакций, при этом реакции восстановления оксидов железа твердым углеродом имеют преимущественное развитие в зоне 6 (верх колонного реактора), а реакции с растворенным в металле углеродом имеют место на границе зон 5 и 8 (турбулентный слой на границе металл–шлак) и скорость на по-

рядок большую, чем реакций в твердой фазе. Зоны 5 и 8 отделены динамической «подушкой» (зоной 4) от зоны 6. Долю оксидов железа, перерабатываемых на границе шлак–металл (зоны 5–8), можно увеличивать за счет крупности рудных материалов и дополнительного индукционного подогрева копильника, а в зоне 6 повышать восстановительный потенциал за счет подачи коксика или угля в колонный реактор на верх шлаковой эмульсии. В большинстве экспериментальных плавов на опытной установке нового процесса на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» получалось содержание углерода в диапазоне 0,5–1,5 %, а на нескольких плавках было даже получено 0,04–0,10 % С, но это связано либо с длительным открыванием летки, либо со значительным переокислением шлака, за счет излишней подачи кислорода.

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. Бигеев А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы. – М.: Metallurgy, 1986. – 136 с.
4. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Metallurgy стали. Теория и технология плавки стали. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.
5. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
6. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х ч. Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Учеб. пособие. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2005. – 264 с.
7. Цымбал В., Кустов Б., Айзатулов Р. и др. Записи: в Сибири рождается альтернативная наукоемкая металлургия постиндустриальной эпохи // Металлы Евразии. 1996. № 8. С. 114–117.
8. Цымбал В.П. Введение в теорию самоорганизации с примерами из металлургии: Учебное пособие. Изд. 2-е. стер. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2001. – 251 с.
9. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 588 с.
10. Телегин И.А., Шакиров К.М., Мочалов С.П. и др. Экспериментальные исследования кинетики совместно протекающих реакций в системе железоуглеродистый расплав – шлак – газ // Изв. вуз. Черная металлургия. 1993. № 6. С. 10–14.

Поступила 9 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 8, pp. 572–577.

USAGE OF THE PRINCIPLES OF SELF-ORGANIZATION AND DISSIPATIVE STRUCTURES IN A NEW JET-EMULSION METALLURGICAL PROCESS

Tsybmal V.P., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Information Technologies in Metallurgy

Kozhemyachenko V.I., Cand. Sci. (Eng.), Asist. Professor of the Chair of Information Technologies in Metallurgy

Rybenko I.A., Cand. Sci. (Eng.), Asist. Professor of the Chair of Information Technologies in Metallurgy

Padalko A.G., Cand. Sci. (Eng.), Asist. Professor of the Chair of Information Technologies in Metallurgy

Olenikov A.A., Cand. Sci. (Eng.), Asist. Professor of the Chair of Heat-Gas-Water-Supply, Water Disposal and Ventilation (tgsv-sibsiu@mail.ru)

Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The article presents the principle of operation of the unit of a jet-emulsion reactor type (JER). The possibility of using and implementing the basic principles of synergy (the theory of self-organization) when creating a new jet-emulsion metallurgical process and the unit JER, has been shown. Specific examples of a ratio speed control of reducing and oxidizing processes and, consequently, the chemical composition of the metal by the dynamic spatial organization of dissipative structures have been considered. The features of the JER process, allowing in a direct reduction process to control the composition of the metal with the use of some principles of synergy, have been described.

Keywords: synergy, theory of self-organization, dissipative structure, spray-emulsion metallurgical process, unit, control, reduction, oxidation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-8-572-577

REFERENCES

1. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. Wiley. 1977, 512 p (Russ.ed.: Nicolis G., Prigogine I. *Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh*. Moscow: Mir, 1979. 512 p.).
2. Haken Hermann. *Synergetics*. Springer-Verlag, 1977. (Russ.ed.: Haken H. *Sinergetika*. Moscow: Mir, 1980. 406 p.).
3. Bigeev A.M. *Nepreryvnye staleplavil'nye protsessy* [Continuous steel-making processes]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 136 p. (In Russ.).
4. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgiya stali. Teoriya i tekhnologiya plavki stali* [Steel metallurgy. Theory and the technology of steel making]. Magnitogorsk: MGTU, 2000. 544 p. (In Russ.).
5. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. *Volnovaya dinamika gazo- i parozhidkostnykh sred* [Wave dynamics of gas- and vapour-liquid media]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 248 p. (In Russ.).
6. Tsybal V.P., Mochalov S.P., Kalashnikov S.N. *Modeli i mekhanizmy samoorganizatsii v tekhnike i tekhnologiyakh. V 3-kh ch. Ch. III. Primery realizatsii idei i printsipov sinergetiki: Ucheb. posobie* [Models and mechanisms of self-organization in techniques and technologies. In 3 parts. Part III. The examples of realization of ideas and principles of synergy: Instructional aid]. Novokuznetsk: izd. Sib-GIU, 2005. 264 p. (In Russ.).
7. Tsybal V., Kustov B., Aizatulov R., Mochalov S., Shakirov K. Zapsib: An alternative science-intensive metallurgy of a post-industrial metallurgy was born in Siberia. *Metally Evrazii*. 1996, no. 8, pp. 114–117. (In Russ.).
8. Tsybal V.P. *Vvedenie v teoriyu samoorganizatsii s primerami iz metallurgii: Uchebnoe posobie* [Introduction into the theory of self-organization with the examples from metallurgy: Manual]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2001. 251 p. (In Russ.).
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobayev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Burykin A.A. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in automatic control systems of technological processes]. Ekaterinburg: OOO «UIPTs», 2014. 588 p. (In Russ.).
10. Telegin I.A., Shakirov K.M., Mochalov S.P., Zhulina Zh.M., Plyshevskii A.A. Experimental kinetics researches of jointly proceeding reactions in the iron-carbon alloy – slag – gas system. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1993, no. 6, pp. 10–14. (In Russ.).

Received October 9, 2014