

промышленной печи прокали нефтиного кокса параметров, от их расчетных значений не превышает 5 %. В результате исследования численными экспериментами прокали антрацита в печах длиной 45 м и 60 м определены совокупности значений производительности печи, времени прокали и расхода топлива, обеспечивающие получение заданного, 1000 мкОм·м удельного электрического сопротивления прокаленного продукта. Печь большего размера обеспечивает повышение производительности прокали при снижении удельных затрат и одинаковом качестве продукта.

### Список использованных источников

1. Суринов Ю.А. Об итерационно зональном методе исследования и расчёта локальных характеристик лучистого теплообмена. Теплофизика высоких температур. 1972. Т.Х. № 4. С. 844–852.
2. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий, Москва: Металлургия, 1972.
3. Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Томилина А.А. Совершенствование и идентификация математической модели прокали углеродных материалов в барабанной вращающейся печи
4. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей, Москва: Металлургия, 1990.
5. Мешков Е.И. Развитие теории и совершенствование технологии производства графитированной электродной продукции на основе математических моделей массо- и теплопереноса. Автореф. дис. ... докт. техн. наук, Владикавказ: СКГМИ (ГТУ), 2009.
6. Zurabov A.T., Meshkov E.I., Gerasimenko T.E. Investigation of Calcination of Anthracite in new Technological Complex. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2007. Vol. 48, № 3. Pp. 231 – 235.
7. Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Математическое моделирование в задачах проектирования систем управления сложными объектами, Калининград: Изд. ФГОУ ВПО КГТУ, 2011.
8. Салихов З.Г., Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами, Москва: Теплоэнергетик, 2004.
9. Khan J.A., Pal D. and Morse J.S. Numerical modeling of a rotary kiln incinerator. Hazardous Waste & hazardous Materials. 1993. № 10 (1). Pp. 81–95.
10. Leger C.B., Cundy V.A. and Sterling A.M. A three dimensional detailed numerical model of a field-scale rotary kiln incinerator. Environmental Science & Technology. 1993. № 27. Pp. 677–690.

УДК 669.02.01

**В. П. Цымбал, И. А. Рыбенко, П. А. Сеченов, А. А. Оленников**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,  
г. Новокузнецк, Россия

### **НЕРАВНОВЕСНЫЕ ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ КАК ОСНОВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПАКТНОГО И МАЛОЭНЕРГОЕМКОГО СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО ПРОЦЕССА И АГРЕГАТА**

#### **Аннотация**

*Рассмотрены принципы создания самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора (СЭР), основой которых является организация вынужденного движения двухфазной рабочей (реакционной) смеси в замкнутой системе под давлением, что позволило создавать значительное отклонение от термодинамического равновесия и получать неравновесные диссипативные структуры. Показана роль диссипативных структур в*

решении задач управления химическим составом металла, а также в создании процесса и агрегата, имеющего малый удельный объем и энергоёмкость.

*Ключевые слова:* диссипативные структуры, принципы, струйно-эмульсионный реактор, удельный объем, энергоёмкость.

### **Abstract**

*The principles of creating a self-organizing jet-emulsion reactor (SIR) are considered, the basis of which is the organization of forced motion of a two-phase working (reaction) mixture in a closed system under pressure, which allowed creating a significant deviation from thermodynamic equilibrium and obtaining non equilibrium dissipative structures. The role of dissipative structures in solving problems of controlling the chemical composition of the metal, as well as in creating a process and an aggregate having a small specific volume and energy capacity is shown.*

*Key words:* dissipative structures, principles, jet-emulsion reactor, specific volume, energy intensity.

### **Введение**

Интерес к исследованиям, направленным на создание непрерывных металлургических процессов, во второй половине прошлого столетия возникал неоднократно. Особенно интенсивно велись эти исследования в 70–80-ых годах. В сборнике докладов [1], целиком посвященному разработке непрерывных процессов, представлены агрегаты с последовательно соединенными ваннами, процессы конвертерного типа и др. Особый интерес представляют исследования по струйно-эмульсионным процессам, весьма ценные результаты которых не потеряли значение и в настоящее время. А.М. Бигеев, вложивший большой вклад в разработку непрерывного сталеплавильного процесса [2, 3], важным и необходимым преимуществом такого процесса, наряду с отсутствием промежуточных потерь энергии и сырья, считал наличие отдельных камер (зон) для реализации необходимых технологических операций (обезуглероживание, обессеривания, обесфосфоривания 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.

В представляемой статье показано, что одновременное решение задачи управления химическим составом металла и уменьшения удельного объема агрегата достигается путём конструктивной и режимной организации динамических диссипативных структур [4], играющих роль своеобразных «камер», которые планировалось создавать в первоначальных конструкциях агрегатов.

### **Основные принципы и решения**

Рассмотрим, какие принципы и решения были заложены в основу конструктивной реализации рассматриваемого ниже процесса и агрегата [4, 5]:

– организация вынужденного движения рабочей (реакционной) смеси в замкнутой системе под давлением, что позволило создавать значительное отклонение от термодинамического равновесия и одновременно решить задачу внутреннего транспорта продуктов реакции через все последовательно соединенные аппараты;

– создание большой реакционной поверхности и двухфазной рабочей смеси (газовзвеси или эмульсии), то есть перевод процесса в область газодинамики, что позволило получить большие скорости физико-химических процессов;

– использование нелинейной зависимости скорости течения двухфазной среды от газосодержания для создания потенциала давления за счет эффекта газодинамического запирающего соединительного канала;

– создание диссипативных структур, существенно отклоненных от термодинамического равновесия, что позволило получить большие возможности по управлению химическим составом металла и шлака.

Ниже кратко рассмотрим эти диссипативные структуры [4], со ссылкой на представленную на рисунке 1, зонную модель:

- 1 – ядро уплотнения;
- 2 – реактор-осциллятор;
- 3 – динамическая подушка;
- 4 – относительно плотная газошлаковая эмульсия;
- 5 – слой жидкого металла;
- 6 – диссипативный гравитационный сепаратор.

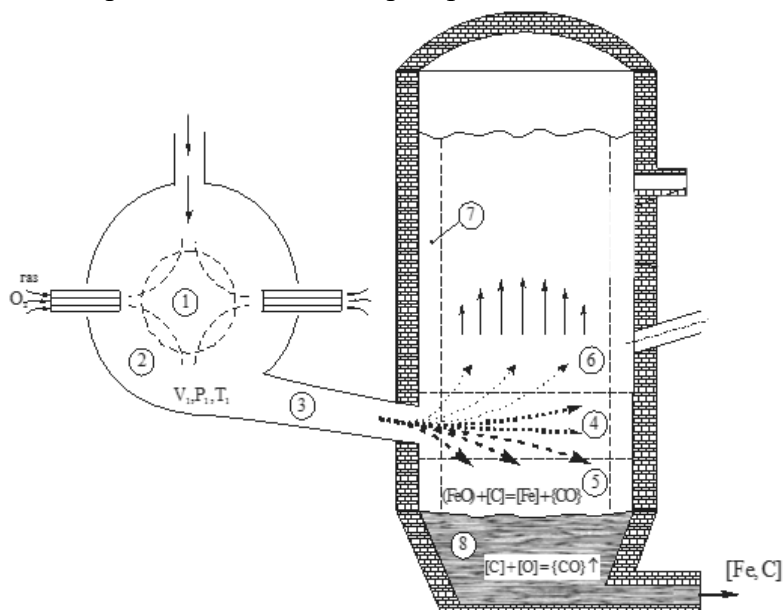


Рис. 1. Зонная модель струйно-эмульсионного процесса

1. Ядро уплотнения на встречных струях газа (зона 1).

2. Реактор-осциллятор (рисунок 2), включающий упомянутую структуру 1, а также зону 2 (газовзвесь, созданную в результате диспергации встречными струями) соединительный канал 3, играющий роль газодинамического затвора. В результате использования эффекта нелинейной зависимости скорости звука от газосодержания [6] создан реактор-осциллятор, в котором реализована внутренняя обратная связь за счет критического истечения двухфазной среды [4] и влияния давления (по принципу Ле-Шателье-Брауна) на протекании химических реакций с газовыделениями, что приводит к изменению объемного газосодержания в реакторе, а затем к изменению скорости истечения двухфазной среды в соединительном канале 3 по формуле:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{v_{\Gamma}}{v_{\Gamma} + v_{\text{кф}}}, \quad (1)$$

где  $v_{\Gamma}$  – объем газа,  $\text{м}^3$ ;  $v_{\text{кф}}$  – объем конденсированной фазы,  $\text{м}^3$ .

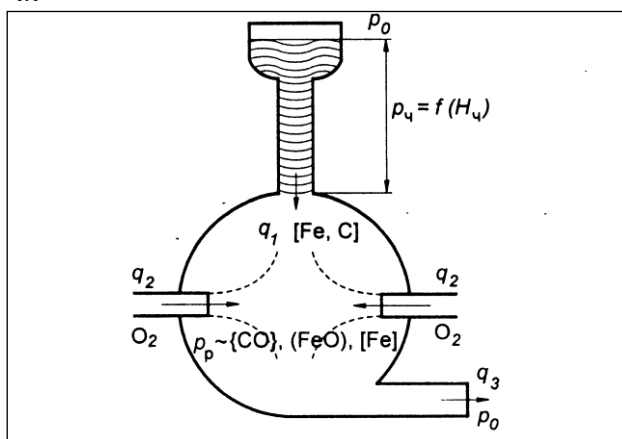


Рис. 2. Реактор-осциллятор:  $p_0, p_p, p_ч$  – соответственно давление атмосферное, в реакторе и столба шихты;  $q_1, q_2, q_3$  – потоки шихты, кислорода и истекающей из реактора двухфазной среды

Процесс как бы «бежит» по правой ветви нелинейной зависимости скорости звука  $c$  от газосодержания  $\alpha_r$ , представленной на рисунке 3. В результате получена возможность создания стационарного колебательного режима на любом заданном уровне давления. Это важнейшее звено в задаче создания самоорганизующегося процесса.

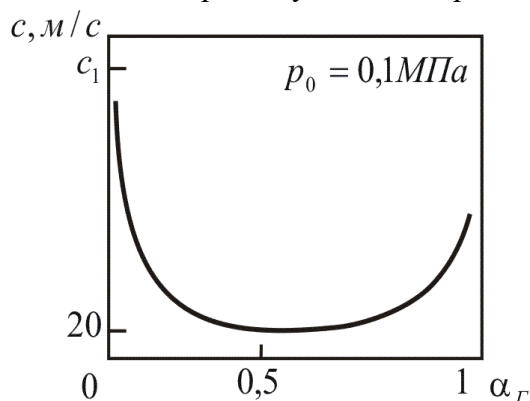


Рис. 3. Зависимость скорости звука в водовоздушной смеси от газосодержания

Таким образом, на основе реактора-осциллятора был создан побудитель расхода (своеобразный карбюратор-компрессор), с помощью которого (в сочетании с переводом процесса в область газозвеси и эмульсии) оказалось возможным создать внутренний транспорт рабочей смеси через все элементы агрегата, в том числе через теплоутилизирующие устройства (котел-утилизатор, газовая турбина, кипящий слой, реформатор дыма в синтез-газ). Это позволяет создать условия для глубокого использования энергии исходного топлива.

3. **Динамическая «подушка»**, играющая роль провальной решётки (зона 4), образуемая в результате превращения кинетической энергии струи, вылетающей из реактора-осциллятора, в потенциальную энергию давления. Эта подушка отделяет и поддерживает зоны 6 и 7, где протекают в основном восстановительные реакции, от зон 5 и 8, где могут протекать, в том числе и окислительные реакции.

4. **Относительно плотная газошлаковая эмульсия** типа сильно вспененного конвертерного или мартеновского шлака в слое, прилегающем к металлу (зона 5). Эта зона может играть решающую роль в процессах самоорганизации в рафинирующем отстойнике, так как здесь находится самая неравновесная составляющая процесса, связанная с большим содержанием оксидов железа в шлаке.

5. **Слой жидкого металла**, зона 8 — предназначена для накопления металла, восстанавливаемого в зоне 6 и опускающегося через зону 5. Следует также подчеркнуть, что на границе зон 5 и 8 могут протекать окислительные реакции, особенно в случае попадания на эту границу относительно крупных кусков, например, руды.

6. **Диссипативный гравитационный сепаратор** (зона 6). Это взвешенный над зоной 4 достаточно высокий слой пенистой газо-шлако-металлической эмульсии, в которой также могут находиться частицы твердых оксидов и углерода. Эта зона занимает подавляющую часть колонного реактора (рафинирующего отстойника). Из-за влияния гравитационной составляющей и близкого к параболическому распределения вектора скорости движения эмульсии в поперечном сечении колонного реактора в нем имеет место сепарация частиц в зависимости от их плотности. Вследствие этого явления, частицы восстановленного железа, имеющие плотность в два-три раза большую, чем частицы оксидов железа, «скатываются» на периферию потока и образуют пристенный слой с отрицательной (обратной) скоростью (зона 7). Это явление наблюдалось нами визуально на физической модели.

Таким образом, с учетом противодействия гравитационных и аэродинамических сил в верхней половине рафинирующего отстойника (зона 6) происходит сепарация металла и шлака, а также образуется неравномерное (по плотности, газосодержанию и химсоставу) распределение параметров по высоте агрегата. Распределенность содержания оксидов железа по высоте обуславливается также термодинамически неравновесным характером процессов,

протекающих в реакционной камере и рафинирующем отстойнике, в том числе интенсивными потоками вещества и энергии, поступающими снизу через соединительный канал 3 из реактора-осциллятора.

Рассмотреть системную модель представленного выше комплекса диссипативных структур [4, 7] в рамках данной статьи не представляется возможным. Но важно отметить, что декомпозиция процесса и его модели в виде совокупности диссипативных структур позволила существенно упростить математическое описание этого сложного процесса. В связи с тем, что внутри каждой диссипативной структуры имеет место самоорганизация, или, по крайней мере, самостабилизация, происходит, по существу, сворачивание информации [8], а структуры обмениваются между собой и с внешней средой только потоками вещества и энергии. Это позволяет строить модели каждой диссипативной ячейки в отдельности и значительно уменьшить количество необходимых связей между элементами (подсистемами).

Ниже кратко коснемся модели лишь одной очень важной структуры, диссипативного гравитационного сепаратора металла, шлака и газа.

Учитывая важную роль отмеченной диссипативной структуры, связывающей все остальные зоны и обуславливающей круговорот веществ в агрегате, для ее воспроизведения и изучения создана имитационная модель [9], в которой в качестве «первых принципов» – элементов нижнего уровня иерархии, выступают дисперсные частицы шихты с реально заданным гранулометрическим распределением. Вид графического интерфейса программы представлен на рисунке 4.

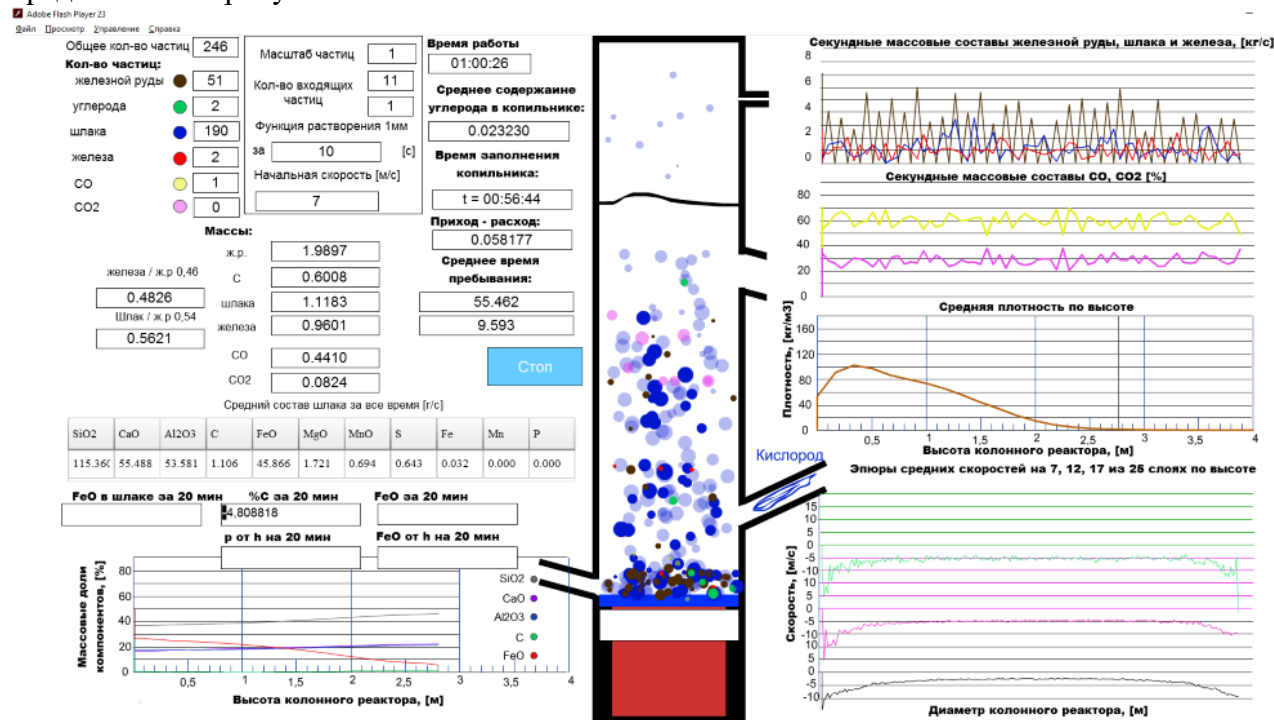


Рис. 4. Фрагмент реализации имитационной модели гравитационного сепаратора

Ядром этой модели является задача обтекания единичной частицы вертикальным потоком несущего реакционного газа. С помощью специально созданного алгоритма и программы на ЭВМ с использованием метода Монте-Карло проигрывается большое число упругих и неупругих столкновений частиц шихтовых материалов и продуктов реакций, с учетом протекающих в них процессов. Разработанная модель, тестируемая на основе результатов большого числа компьютерных статистических испытаний по совпадению с законами сохранения, оказалась достаточно адекватной «виртуальной реальностью» изучаемого процесса). Она позволяет вскрывать внутренний механизм сложных взаимодействий, протекающих в колонном реакторе: оценивать время пребывания в агрегате исходных веществ и продуктов реакций, в том числе металла и шлака; распределение плотности взвешенных дисперсных материалов по высоте агрегата; влияние на ход процесса различных управляющих воздействий, в том числе гранулометрического состава металла,

соотношения рудных материалов и топлива-восстановителя и др. Являясь заместителем объекта, эта модель позволяет численным методом решать задачи системной динамики, проигрывать и разрабатывать проектируемые технологии. Более подробно эта модель заслуживает отдельного рассмотрения [9].

### Управление химическим составом металла

После знакомства с основными принципами функционирования процесса и ролью диссипативных структур, остановимся на вопросе управления химическим составом металла, прежде всего содержанием углерода [10]. Для этого снова обратимся к зонной модели (рисунок 1). Подчеркнув, что химические реакции протекают в неравновесных условиях с отводом продуктов реакций, отметим, что 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 порядок большую, чем реакции (2)–(4).

При этом зоны 5 и 8 отделены динамической «подушкой» (зоной 4) от зоны 6.

Долю оксидов железа, перерабатываемых на границе шлак-металл (зоны 5 и 8) можно увеличивать за счет повышения доли более крупных рудных материалов и дополнительного индукционного подогрева копильника, а в зоне 6 повышать восстановительный потенциал за счет подачи угля в колонный реактор на верхний уровень газошлаковой эмульсии.

Таким образом, возможность создания описанных выше динамических диссипативных структур при определенных газодинамических режимах позволяет отдельно управлять соотношением скоростей восстановительных и окислительных процессов, а, следовательно, и содержанием углерода в получаемом металле.

### Конструктивные и технологические особенности агрегата СЭР

Использование описанных выше подходов и принципов позволило создать агрегат с очень малым удельным объемом и энергоемкостью [4, 5, 10]. Технологическая схема и краткое описание агрегата СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор) представлено ниже (рисунок 5). Основу технологической схемы мини-модуля 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, копильник 9, а также система гарнисажного охлаждения 10, канал 11 для выдачи газошлаковой эмульсии и канал 12 для перетока части газа, шлакоприемник 13 с гранулятором 14, система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17 и система газоочистки 18.

Созданный в реакторе-осцилляторе 6 высокий потенциал давления, а также полная изоляция процесса от атмосферы, позволяет проталкивать продукты реакций через все находящиеся за основным технологическим агрегатом устройства утилизации энергии без использования высокотемпературных побудителей расхода.

Пылевидная шихта, состоящая из смеси оксидов металлов и твердых восстановителей, эффективно диспергируется в реакционной камере 6. Здесь создается газовзвесь с объемной долей газа порядка 0,99. Вследствие зависимости скорости истечения двухфазной среды от газосодержания (рисунок 3), в соединительном канале 7 образуется аэродинамически запираемый затвор (торможение струи), а в сочетании с обратной связью по газосодержанию (за счет изменения условий протекания химических реакций, а также условий подачи в реактор шихты и кислорода) имеется возможность создавать стационарный колебательный режим (самоорганизующийся реактор-осциллятор).

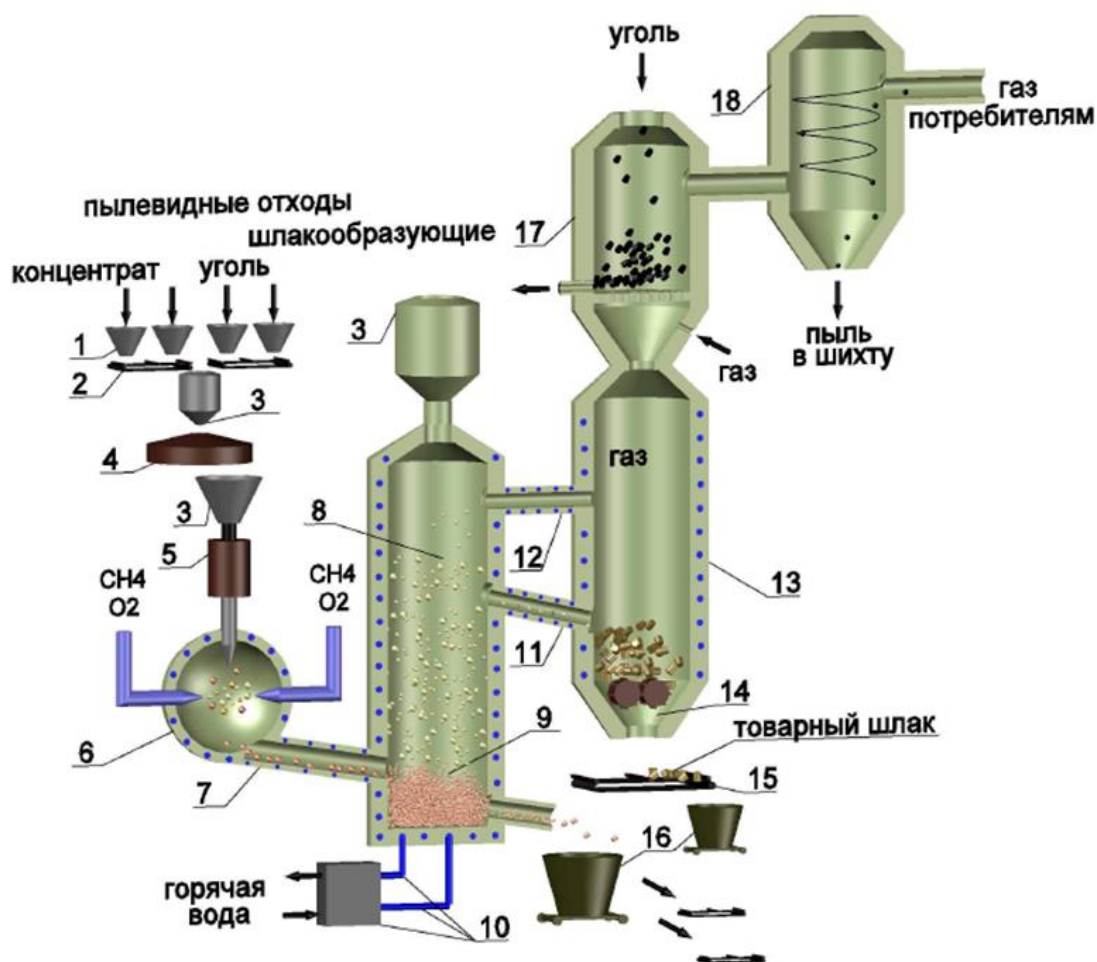


Рис. 5. Технологическая схема мини-модуля на основе процесса СЭР

Использование в качестве рафинирующего отстойника вертикального колонного реактора 8 с нижней подачей через канал 7 реакционной газовой смеси в сочетании с существенным отклонением процессов от термодинамического равновесия является важнейшим фактором, который обуславливает возможность гравитационного разделения потока железоуглеродистого металла, стекающего по периферии колонного реактора и оседающего в копильнике 9, и потока обедненного железом шлака, отводимого по наклонному каналу 11 в шлакоприемник 13.

### Резюме

При создании этого агрегата впервые в мировой металлургии [10] была предпринята попытка использования некоторых идей теории самоорганизации (синергетики), таких как принципы подчинения и наименьшего принуждения, большого отклонения от термодинамического равновесия и др. [11]. Для реализации этих принципов удалось применить ряд физических эффектов, таких как диспергация шихты встречными струями газа, создание самоорганизующегося реактора-осциллятора за счет использования эффекта критического истечения двухфазного потока и обратной связи по изменению газосодержания продуктов реакций, нижняя подача рабочей смеси из реактора-осциллятора в колонный реактор, организация вынужденного движения и внутреннего пневмотранспорта двухфазной рабочей смеси.

Сочетание этих факторов и мероприятий позволило создать в агрегате динамические диссипативные структуры, что привело к резкому уменьшению удельного объема агрегата (в 10–15 раз) и обеспечило значительную гибкость управления, в том числе соотношением скоростей восстановительных и окислительных реакций, что дает возможность прямого получения металла с достаточно широким диапазоном содержаний углерода. В настоящее время в мире известно несколько десятков создаваемых новых агрегатов для прямого восстановления, но ни в одном из них, включая КОРЕКС, принципиально невозможно

получить железо-углеродистый сплав с содержанием углерода ниже 2%, в связи с тем, что процессы в них находятся близко к состоянию равновесия и управлять отдельно составом металла и шлака невозможно.

Ниже (таблица 1) приведено сравнение технико-экономических показателей процесса СЭР с наиболее близким и продвинутым в мире аналогом – агрегатом КОРЕКС.

Таблица 1 – Сравнение технико-экономических показателей процессов СЭР и КОРЕКС

Позиция	Показатели	Процесс КОРЕКС	Процесс СЭР	Преимущество
1	Энергоемкость, ГДж/т	29	15–17	в 1,7 раза
2	Удельный объем, т/м <sup>3</sup> сут.	1,1	11	в 10 раз
3	Капитальные затраты, \$/т.год	350	120–150	в 2,5 раза

#### Список использованных источников

1. Труды совещания «Непрерывные процессы выплавки черных и цветных металлов», 26–28 ноября 1973 г., Академия наук СССР, Научный совет «Физико-химические основы металлургических процессов». – Москва: Наука, 1975 – 195 с.
2. Бигеев А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы. М.: Металлургия, 1986. – 136с.
3. Бигеев А.М., Бигеев А.М. Теория и технология плавки стали. Учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. Магнитогорск: МГТУ. 2000. – 344 с.
4. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / Цымбал В.П., Мочалов С.П., Рыбенко И.А., Айзатулов Р.С., Соколов В.В., Падалко А.Г., Кожемяченко В.И., Красноперов С.Ю., Шакиров К.М., Калашников С.Н., Ермакова Л.А., Оленников А.А., Огнев А.М., Щепанов С.В., Рыбушкин А.А., Суздальцев Е.В. // Под ред. В.П. Цымбала. – М: Металлургиздат, 2014. – 488 с., ил.
5. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А., Падалко А.Г., Оленников А.А. Сб. тр. XIII Международного конгресса сталеплавателей. – М.: Полевской, 2014. – С. 472–477.
6. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волоновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.
7. Цымбал, В.П. Имитационное моделирование диссипативных структур в струйно-эмульсионном металлургическом реакторе / В.П. Цымбал, П.А. Сеченов, А.А. Оленников // Моделирование и наукоемкие информационные технологии. – Новокузнецк: СибГИУ, 2016. – С. 52–59.
2. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 419 с.
3. Имитационное моделирование гетерогенного сепаратора в агрегате СЭР и проблема применения уравнения Навье-Стокса / В.П. Цымбал, П.А. Сеченов, А.А. Оленников, А.Г. Падалко // Металлургия: технологии, инновации, качество: труды XIX Международной научно-практической конференции, 15–16 декабря 2015 г. – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – Ч. 1. – С. 73–80.
4. Tsymbal V.P., Mochalov S. P., Shakirov K. M. Controlling the Composition of the Metal in the Direct Reduction of Dust-Sized Materials and Waste Products in a Jet-Emulsion Reactor. Springer Journals, 2015, Vol. 59, pp 119–125: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11015-015-0070-0>
5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979. – 512 с.