

## Приложение 4.

# Основы конструкции и принципа действия струйно-эмульсионного агрегата типа СЭР

### 1. Структура технологического модуля

Базовый технологический модуль на основе струйно-эмульсионного агрегата типа СЭР состоит [1-5] из следующих основных систем (рис. 1):

1. Система шихтоподачи сыпучих материалов
  2. Основной агрегат типа СЭР включающий:
    - 2.1. Первый реактор (струйный реактор - осциллятор).
    - 2.2. Рафинирующий отстойник (эмульсионный колонный реактор) с копильником для металла.
    - 2.3. Шлакоприемник, нижняя часть которого в зависимости от целевой направленности может быть выполнена либо в виде барабанного гранулятора шлака, либо в виде второго копильника для извлечения из шлака (довосстановления) из шлака легирующих элементов.
  3. Гидравлическая система обеспечения гарнисажного охлаждения с полной утилизацией тепла, отводимого через систему охлаждения и утилизации.
  4. Система утилизации энергии отходящих газов с газоочисткой.
  5. Система контроля, диагностики и автоматического управления.
  6. Система доводки металла в потоке. (Например, индукционная печь закрытого типа).
  7. Система разлива металла.
- Рассмотрим коротко основные конструктивные особенности перечисленных систем.

#### 1. Система шихтоподачи сыпучих материалов

В зависимости от вида применяемых сыпучих материалов (грануляционного состава, влажности и т.д.) могут быть предложены различные схемы, состоящие, как правило, из системы бункеров, различного рода конвейеров, вибрационных и шнековых питателей-дозаторов и т.п. Если в шихте имеются материалы с крупностью более 5-10 мм, то в схему шихтоподачи включаются необходимые мощности для дробления, грохочения, сортировки.

В настоящее время в промышленности имеется большой набор достаточно надежно работающего оборудования такого назначения, вопрос сводится лишь к выбору конкретной оптимальной схемы и рационального подбора необходимого оборудования.

Здесь следует остановиться лишь на особенностях требований к питателю-дозатору для агрегата типа СЭР в связи с тем, что этот агрегат, особенно первый его реактор, работают при повышенном давлении.

В связи с этим в первом варианте шихтоподачи, примененном в опытном агрегате на Запсибе, использовался серийно выпускаемый бетононасос, с помощью которого шихта подается в пластифицированном виде под давлением. В качестве пластификатора используется отработанные масла или мазут. Такой способ шихтоподачи наряду с несомненными достоинствами (в омазученной шихте очень быстро идут восстановительные процессы) имеет и недостатки. В первую очередь это связано с тем, что для пластификации шихты нужно подавать мазута больше, чем это необходимо по балансу тепла. Кроме того, ограничиваются возможности управления процессом, в связи с тем, что большая часть топлива и восстановителя заключена внутри самой шихты.

В связи с этим на упомянутой опытной установке на Запсибе [6,7] была успешно испытана также система «сухой» подачи шихты с использованием вертикального шнекового питателя-дозатора. Эту схему мы считаем более перспективной, так как она позволяет использовать в качестве топлива и восстановителей не только мазут, но и природный (или другой) газ и, главное, пылеугольное топливо.

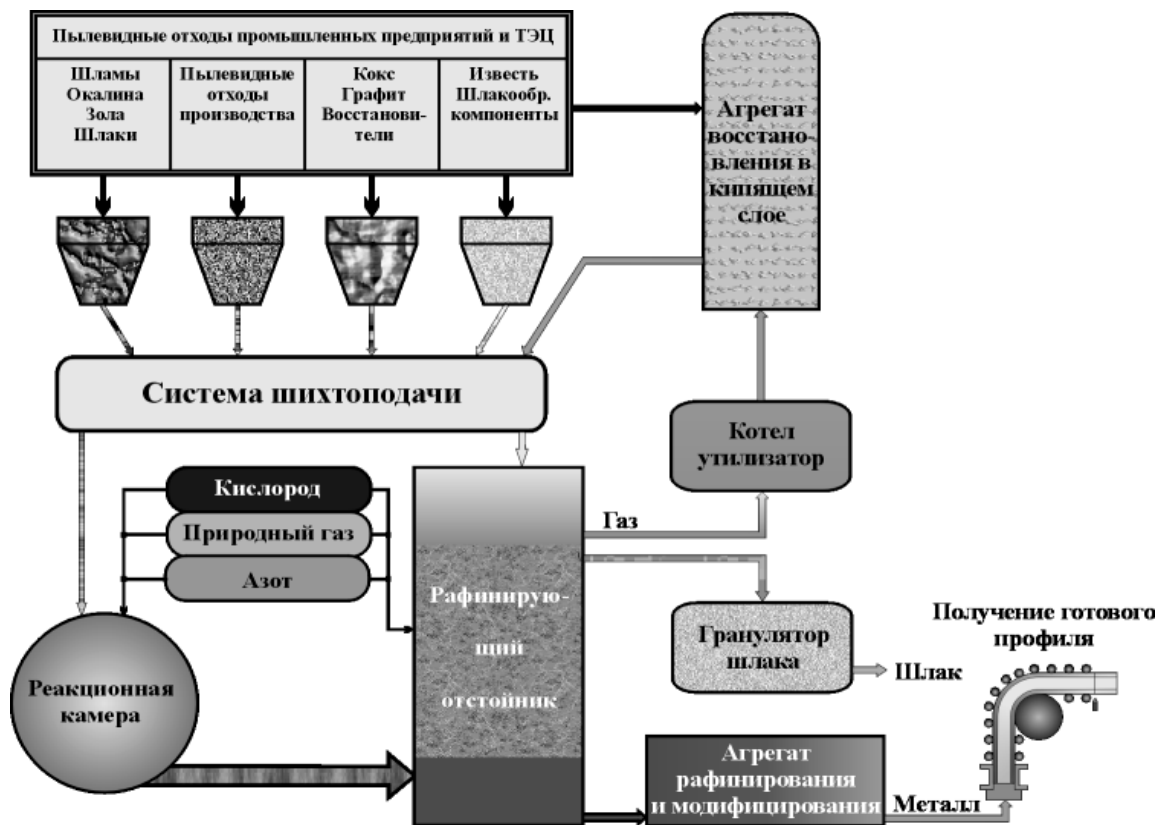


Рис.1. Общая структура технологического модуля

Для проектируемого технологического модуля на основе агрегата типа СЭР, где ставится задача резкого сокращения энергозатрат, в использовании громоздкой схемы подготовки сырья нет необходимости. Упрощение схемы подготовки и подачи сыпучих материалов применительно к рассматриваемому процессу связано с очень малой его инерционностью и в связи с этим возможностью быстрого пересчета и изменения режима продувки (в течение нескольких минут) при изменении состава шихты.

В случае переработки на этом технологическом модуле пылевидных металлосодержащих отходов текущего производства, схема подготовки сырья предельно упрощается, а для сушки сыпучих материалов (например, в кипящем слое) может быть использована тепловая и потенциальная энергия давления отходящих газов. Положительный опыт использования энергии отходящих газов имеется в агрегате типа Корекс. В агрегате типа СЭР, где газ полностью замкнут от атмосферы и находится под давлением, создаются возможности его эффективного использования по любому назначению, при этом отпадает необходимость использования дымососов или высокотемпературных побудителей движения газа.

## 2. Основной агрегат типа СЭР

На приведенном на рис. 2 фрагменте мультипликационных моделей\* наглядно показана конструктивная и технологическая компоновка основного агрегата совместно с системами шихтоподачи и эвакуации продуктов плавки. Здесь представлены: система шихтоподачи с бункерами, конвейером, смесителем и вертикальным шнековым питателем; основной агрегат в составе шарообразного реактора-осциллятора, рафинирующего отстойника (цилиндрический колонный реактор) с индукционно подогреваемым копильником; а также система эвакуации продуктов плавки: ковш или

\* Модели программно реализованы магистрантом Р. Куропаткиным

индукционная печь типа “Press pour” , шлакаприемник с гранулятором, агрегат кипящего слоя и газоочистка.

### 3. Гидравлическая система обеспечения гарнисажного охлаждения

Особенностью конструкции, в связи с высокой термохимической активностью рабочей среды (газовзвеси и эмульсии) и очень малым удельным объемом агрегата, является ориентация на гарнисажный способ защиты всех соприкасающихся с рабочей средой элементов агрегата [8].

Конструктивно гарнисажная защита решена в виде многовитковых трубчатых секций, аналогично применяемым в индукционных печах, что обеспечивает возможность контроля работоспособности и их достаточно простой замены в случае выхода из строя.

Гарнисажная защита агрегатов от воздействия высоких температур получила достаточно широкое распространение в различных областях техники (плазменные реакторы, тепловыделяющие элементы ядерных реакторов, агрегаты цветной металлургии и др.). Применительно к поставленной задаче нами разработаны статические и динамические модели формирования гарнисажа, позволяющие оценивать состояние гарнисажа в стационарном состоянии и переходных режимах. Создано также программное обеспечение для решения этой задачи.

Гидравлическая система обеспечения гарнисажного охлаждения (см. рис. 11.7) представляет собой разветвленную систему трубчатых секций [9,10], составляющих замкнутый контур, в котором с помощью насоса высокого давления обеспечиваются необходимые расходы и скорости циркуляции химически очищенной воды. Сборный трубопровод этого контура подключается к теплообменнику, что позволяет полностью утилизировать энергию гарнисажного охлаждения с получением товарной воды (возможно и получение пара).

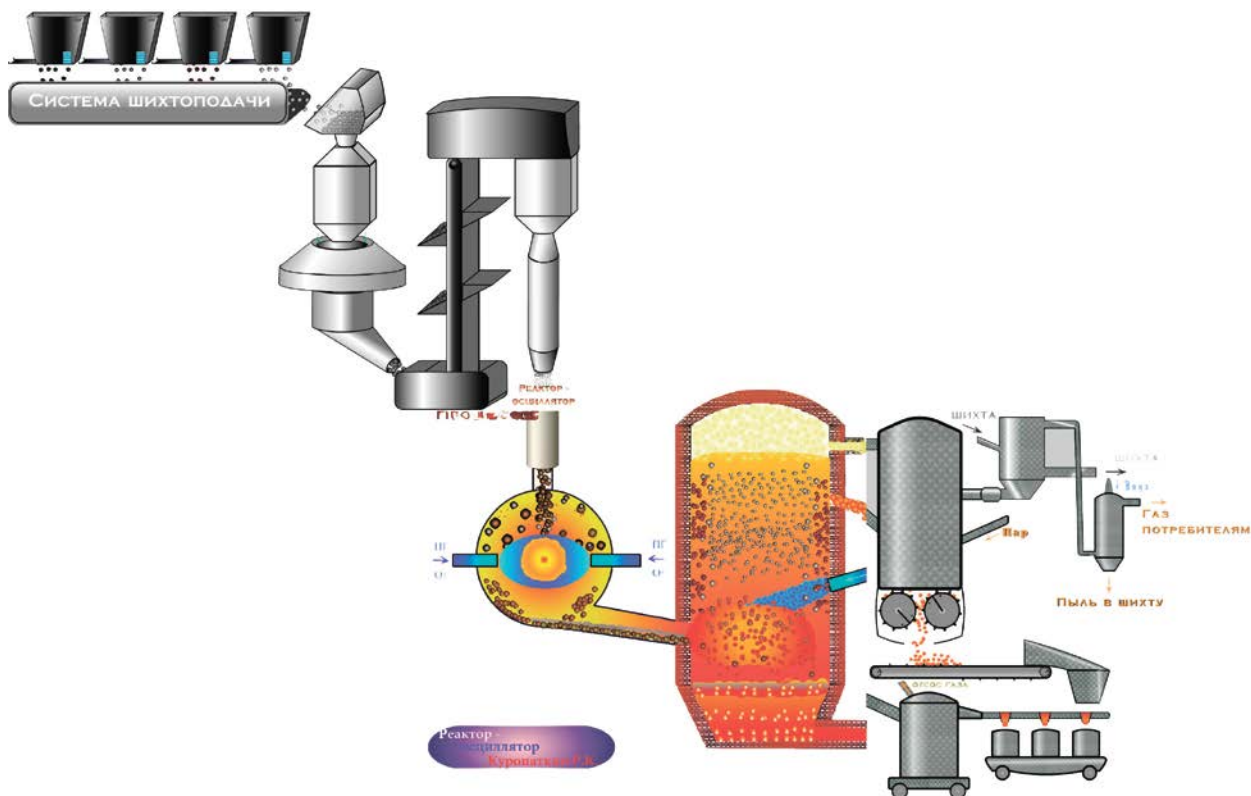


Рис. 2. Агрегат СЭР с основными подсистемами

Разработана автоматизированная система расчета теплообмена и нагрева воды в многовитковых секциях, а также имитационная модель для гидравлической системы охлаждения с соответствующим программным обеспечением, что в совокупности с датчиками давления и температуры, устанавливаемыми на каждой секции, позволяют

обеспечить надежное функционирование всей системы формирования и поддержания гарнисажа (подробнее см. в главе 11). При этом также резко снижается расход огнеупоров.

*Представленные выше технические решения по гарнисажному охлаждению позволяют устранить существовавший ранее фактор риска, связанный с возможностью обеспечения длительной работы агрегата.*

#### **4. Система утилизации энергии отходящих газов с газоочисткой.**

На первом этапе реализации технологического мини-модуля планируется установка небольшого нестандартного котла – утилизатора (или даже системы многовитковых секций и экранов) с упрощенной газоочисткой. При реализации же технологического модуля производительностью 200-250 тысяч тонн в год за основным агрегатом (по опыту, например, процесса Корекс) планируется устанавливать либо паровой котел с турбиной, либо газовую турбину с генератором и турбокомпрессором на валу.

В связи с тем, что отходящие газы находятся под давлением, возможна также установка агрегатов кипящего слоя для предварительного восстановления или сушки подаваемых в агрегат сыпучих материалов. Таким образом можно снизить температуру отходящих газов до 150-200°C и получить сквозной тепловой КПД до 70-80%.

#### **5. Система контроля, диагностики и автоматического управления.**

В связи с высокой динамичностью процесса и его полной изоляцией от атмосферы прямое визуальное наблюдение за процессом и ручное управление им практически исключено. В то же время в самой конструкции агрегата и его режимных параметрах заложен самоорганизующийся характер процесса, благодаря чему процесс самопроизвольно должен стремиться к стационарному состоянию, в районе которого обеспечивается устойчивый пульсирующий режим функционирования, что подтверждено результатами экспериментов на опытной установке [6,7]. На этой же установке была показана возможность полной автоматизации процесса, когда запуск процесса и его остановка осуществлялись нажатием одной кнопки. Это позволяет отнести процесс и агрегат в разряд наукоемких информационных технологий, что обеспечивается наличием соответствующего математического и программного обеспечения. Более подробное описание этой системы представлено в главе 7.

#### **6. Система доводки металла в потоке**

Если ставится задача получения шихтовой заготовки (особенно на первом этапе реализации), то можно обойтись без этой системы.

Если же ставится задача получения металла стабильного состава, предназначенного для получения точного литья или какой-либо иной продукции, то вслед за основным агрегатом должен быть установлен агрегат доводки, в качестве которого может быть использована индукционная печь со стержневым индуктором, например, типа «Press pour», работающая под давлением и предназначенная, в частности, для мелкофасонного литья. Возможно применение и тигельных индукционных печей или небольших внепечных агрегатов другого типа.

#### **7. Система разлива металла**

Если ставится задача получения шихтовой заготовки, то может быть предложено наиболее простое решение – конвейерная разливка, типа установок для разлива товарного чугуна.

При необходимости получения готовых изделий возможно несколько решений.

С использованием патентов Института теоретической и прикладной механики возможна и вполне реальна постановка задачи создания установки вертикальной разлива через жидкометаллический теплоноситель, что позволяет получать методом вытяжки из жидкого металла изделия небольшого сечения практически готового профиля. Наибольший интерес при этом представляет возможность непосредственного получения труб небольшого диаметра, например, сантехнического назначения. Следует также отметить, что из-за отсутствия воздушного зазора в кристаллизаторе (заполняемого

легкоплавким жидкометаллическим носителем) скорость вытяжки металла из кристаллизатора примерно в 20 раз больше, чем при обычной непрерывной разливке (подробнее см. в гл. 16).

Естественно, может быть рассмотрен и традиционный вариант установки непрерывной разливки на мелкие профили.

## 2. Технологическая схема и принцип действия

Основу технологической схемы агрегата типа СЭР (рис.3) составляют: система шихтоподдачи 1-5; реактор-осциллятор 6, соединительный канал с газодинамическим самозапирающим устройством 7, рафинирующий отстойник 8, верхняя половина которого одновременно играет роль первой ступени мокрой газоочистки, а также система гарнисажного охлаждения 10, шлакоприемник 13 с гранулятором 14, а также система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17 и система газоочистки 18. Вместо аппарата 17 может быть установлен котел-утилизатор и одна из энергетических схем утилизации. Подробнее эти схемы рассматриваются в главе 14.

Процесс осуществляется следующим образом [5]. 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 спутных потоков кислорода и природного газа, 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 реакционной камере части природного газа, угля или другого восстановителя в соответствии с долей поданного кислорода происходит нагрев и частичное восстановление оксидов.

Образовавшаяся в реакционной камере 6 газовзвесь с объемным газосодержанием порядка 0,99 через соединительный канал 7 подается в нижнюю часть рафинирующего отстойника 8 над верхним срезом копильника 9. При этом выходящая из соединительного канала двухфазная струя играет роль своеобразной динамической подушки или провальной решетки, отделяющей столб пенной газошлаковой эмульсии, играющей одновременно роль мокрой газоочистки, от металла, накапливающегося в копильнике 9 благодаря опусканию по вертикальным пристенным слоям капель металла, получающихся в результате восстановительных процессов в газошлаковой эмульсии. Таким образом, с учетом противодействия гравитационных и аэродинамических сил в рафинирующем отстойнике 8 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 7 из реакционной камеры 6.

Для лучшего понимания внутреннего механизма процессов предлагаем обратиться к шести фрагментам решений имитационной модели (рис.4), очень талантливо реализованной магистрантом Романом Куропаткиным. Особенно подробных комментариев здесь, по-видимому, не требуется, остановимся лишь на нескольких моментах. Прежде всего, необходимо обратить внимание последовательно по фрагментам на вход двухфазной струи из соединительного канала. Можно заметить пульсирующий характер процесса, который затем проявляется также по высоте колонного реактора, а также отслоение крупных частиц вблизи поверхности металла. Следует также обратить внимание на опускание вдоль стенок колонного реактора обратного потока частиц восстановленного металла. Справа от колонного реактора показаны процессы, протекающие в двух основных типах микрореакторов: твердый углерод - оболочка из

оксидов и пузырек  $CO$  - оболочка из оксидов. Какие-то другие представления о процессе наши читатели могут сделать самостоятельно.

Вернувшись снова у рисунку 3, следует заметить, что использование в качестве рафинирующего отстойника вертикального колонного реактора с нижней подачей реакционной газовой смеси в сочетании с существенным отклонением процессов от термодинамического равновесия является важнейшим фактором, который обуславливает возможность разделения потока железоуглеродистого металла, оседающего в копильнике 9, и потока обедненного железом и обогащенного легирующими элементами шлака, отводимого по наклонному каналу 11 в шлакоприемник 13. К нижней части шлакоприемника 13 пристыковываются валковый гранулятор 14 и шлак выдается в качестве конечного продукта на конвейер.

В данном агрегате реализована также идея своеобразного внутреннего пневмотранспорта промежуточных продуктов из реактора в реактор: из реакционной камеры в рафинирующий отстойник, а затем в шлакоприемник, котел-утилизатор и другие устройства для утилизации вторичных энергоресурсов [1]. Выведение процессов в газофазную область в сочетании с повышенным давлением и замкнутостью процесса от атмосферы позволили полностью использовать работу расширения реакционных газов. Это привело к значительному сокращению удельного объема агрегата и капитальных затрат, позволило избавиться от необходимости использования ряда промежуточных механических устройств (например, шнековых питателей, как в агрегате Корекс), дымососов и т.д. При этом резко снижается энергоемкость

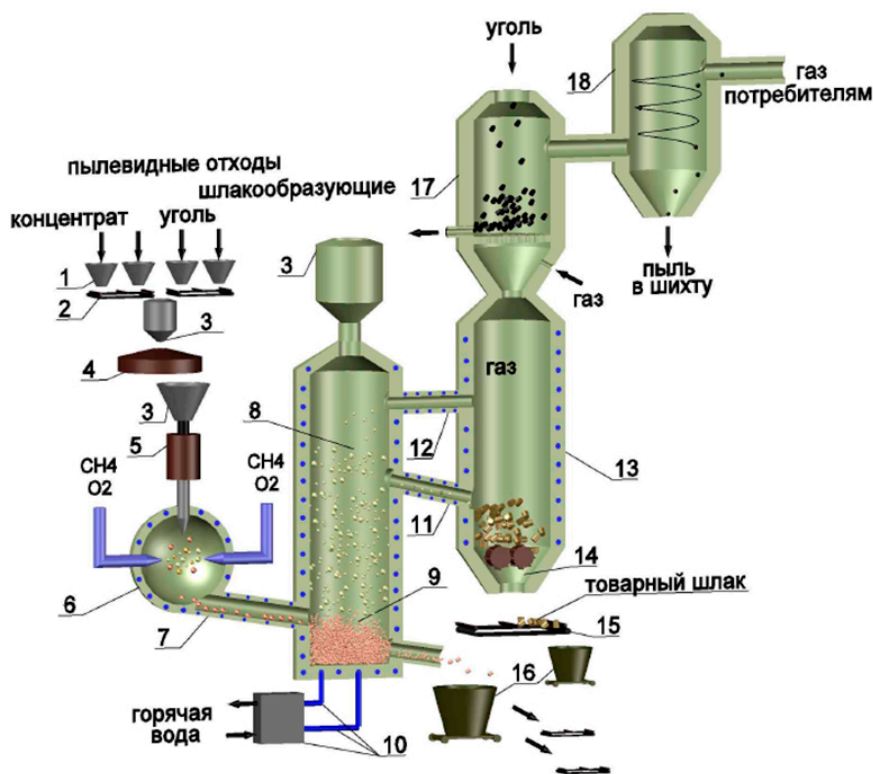
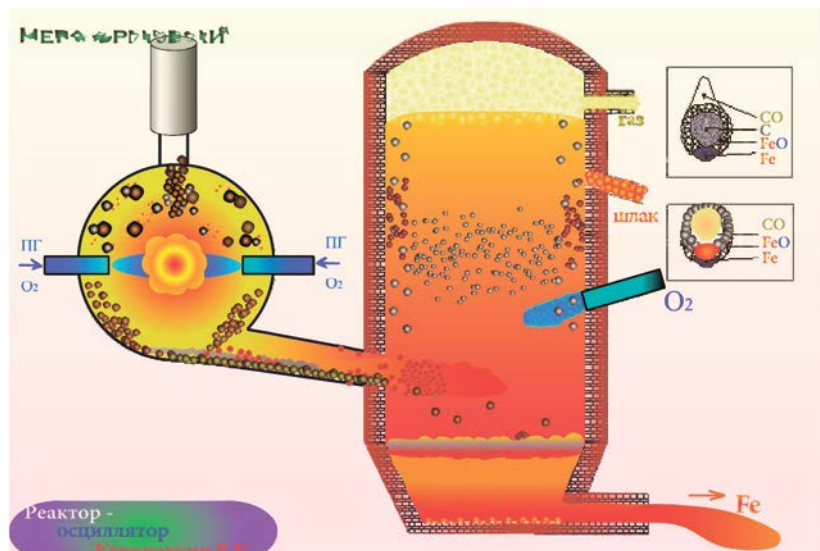
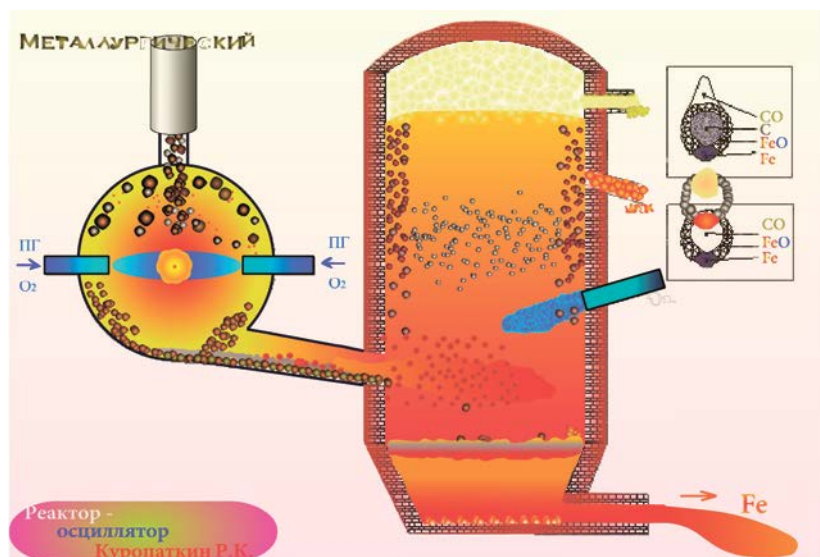


Рис. 3. Технологическая схема мини-модуля на основе процесса типа СЭР

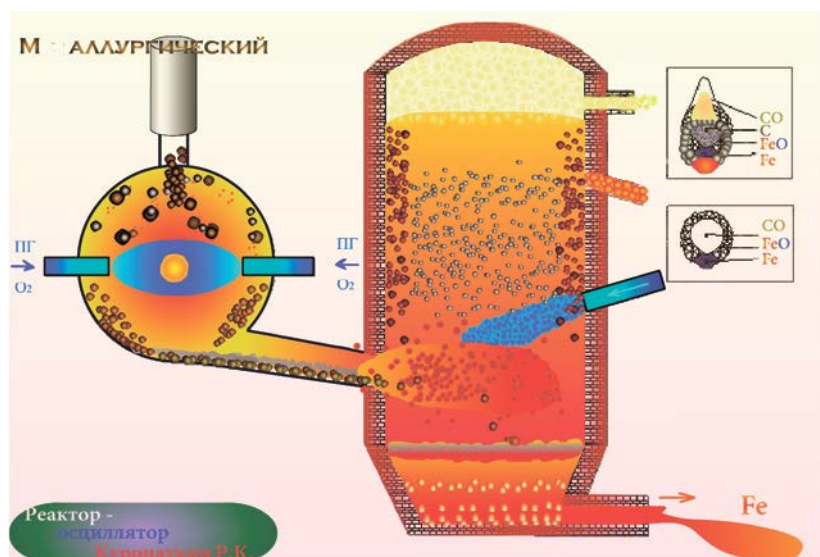
Благодаря сочетанию отмеченных эффектов агрегат обладает достаточной универсальностью, может использоваться в черной и цветной металлургии. Вместо последовательной схемы из крупномасштабных агрегатов традиционной металлургии на основе агрегата типа СЭР создаются технологические схемы из нескольких параллельно работающих модулей, не требующих тяжелого кранового и сменного оборудования.



Фрагмент 1

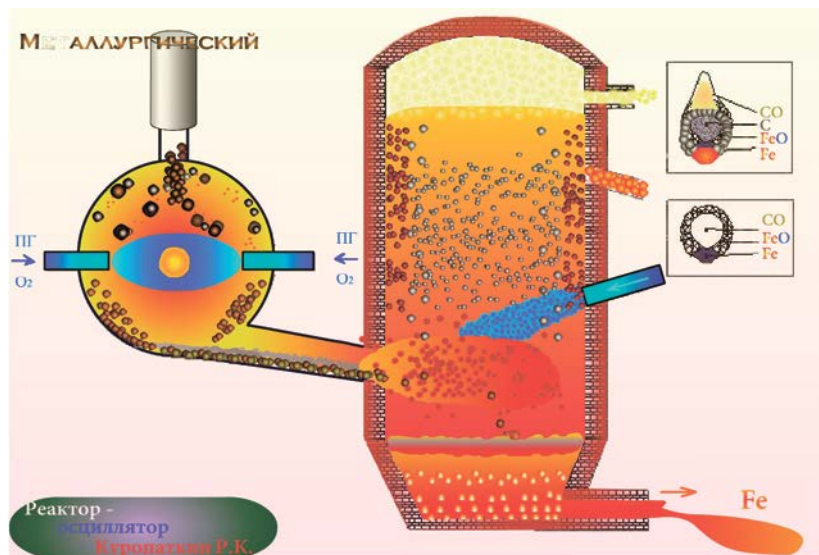


Фрагмент 2

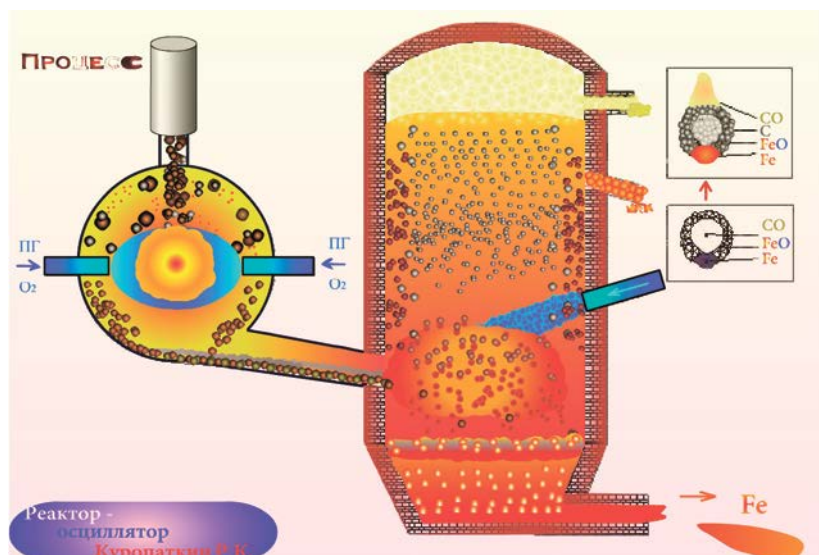


Фрагмент 3

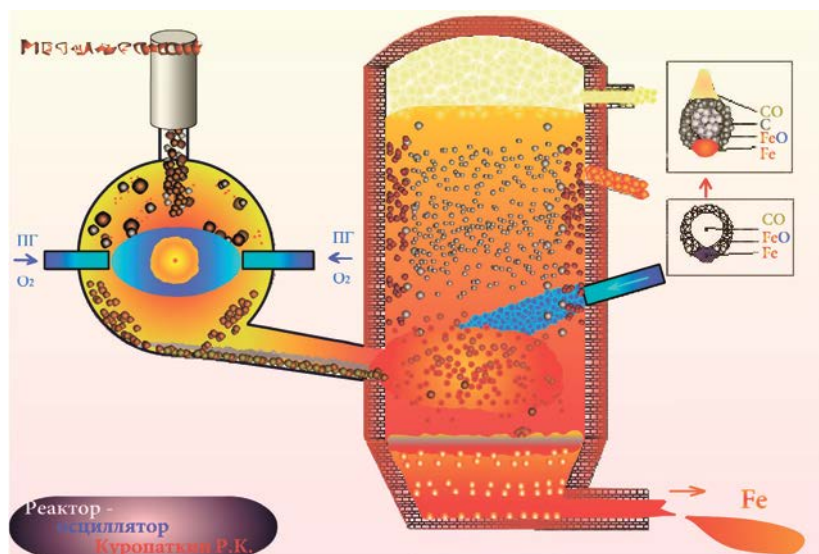
Рис. 4. Фрагменты имитационной модели



Фрагмент 4



Фрагмент 5



Фрагмент 6

Рис. 4. Фрагменты имитационной модели (продолжение)



Общий вид агрегата после очередной реконструкции, а также общий вид опытной установки СЭР на переднем плане заливочного пролета конвертерного цеха представлены на рисунках 5 и 6.

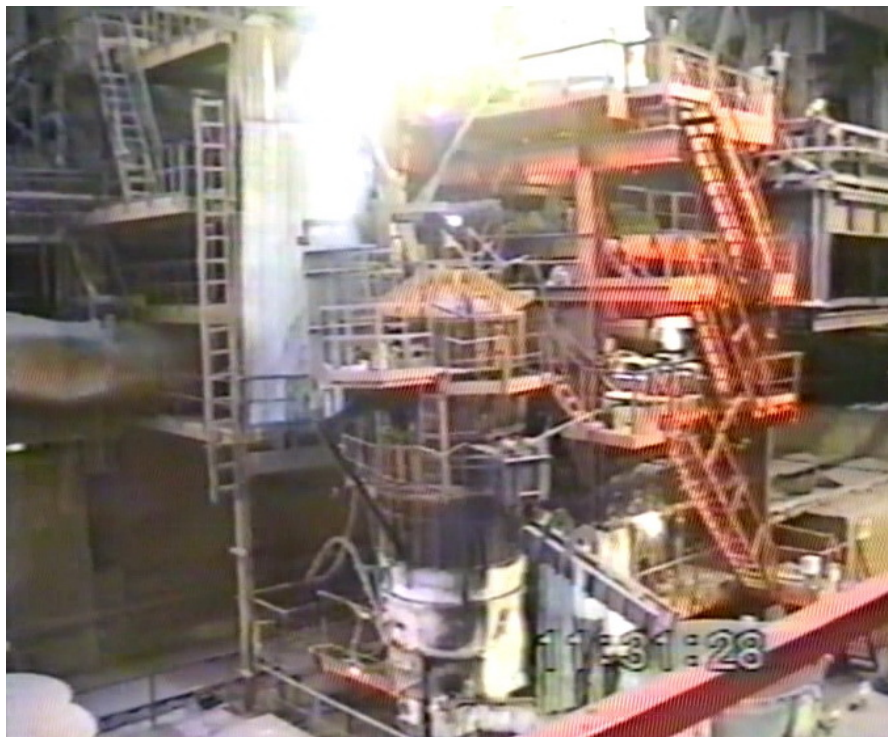


Рис. 5. Общий вид агрегата после очередной реконструкции

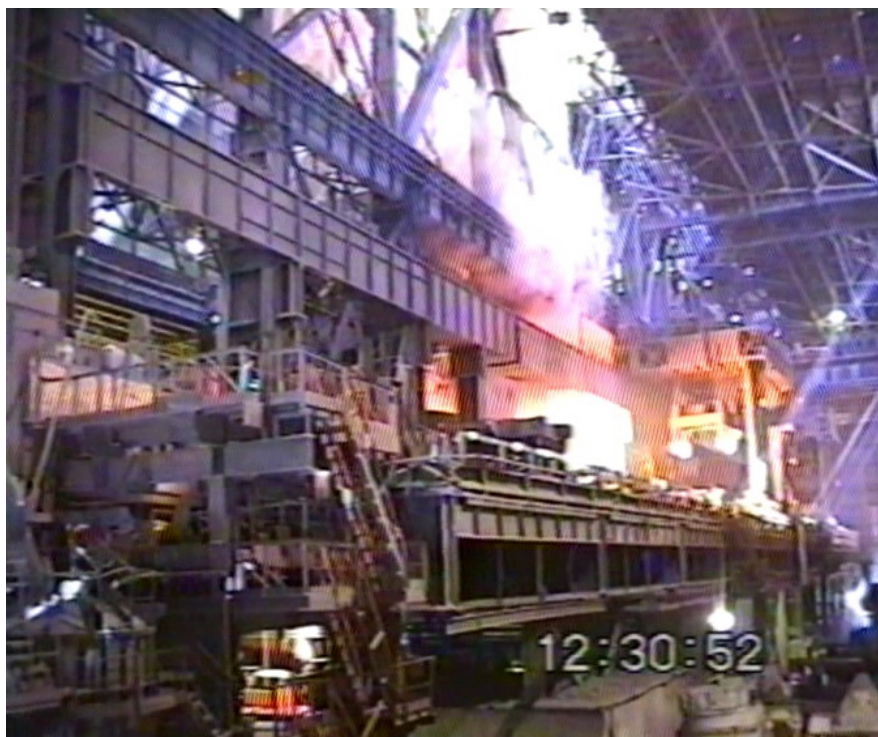


Рис. 6. Общий вид опытной установки СЭР на переднем плане заливочного пролета конвертерного цеха

**Основные преимущества процесса агрегата типа СЭР:** высокие скорости химических реакций благодаря большому отклонению системы от термодинамического равновесия, большой реакционной поверхности и повышенному давлению в агрегате, малый удельный объем агрегата (в 10-15 раз меньше известных) и в связи с этим низкие капитальные затраты (в 2-3 раза ниже), низкая сквозная энергоемкость (16-18 ГДж/т

вместо 26-29 ГДж/т в традиционных переделах) возможность прямой переработки в одном агрегате пылевидных руд и отходов (шлама, окалины, пылевидной извести, графита и т.д.) без окомкования, полная замкнутость процесса от атмосферы и возможность использования работы расширения реакционных газов, что позволяет обойтись без дымососов при проталкивании отходящих газов через котел-утилизатор, очистные сооружения и обеспечить высокую экологичность. При этом возможно достижение сквозного теплового КПД исходного топлива до 70-80%, в то время как в традиционной металлургии он составляет около 20%, а в энергетике 37% .

## Литература

1. В Сибири рождается альтернативная наукоемкая металлургия постиндустриальной эпохи. /Цымбал В., Кустов Б. , Айзатулов Р., Мочалов С., Шакиров К.//Металлы Евразии. 1996г. – №1.– С.115–117.
2. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., R.S Aizatulov a.e. // Recovery. Recycling. Re-integration Collectedpapers of the R-97, R-99 International Congress. – Geneva. – Switzerland. – 1997, Vol. 1.- P. 168 – 172. 1999. Vol. 5. – P. 162 – 167.
3. Пат. PCT/RU93/00325 European patent. Process for the continuous refining of metal and a facility for carrying out said process / V.P. Tsymbal, S.P. Mochalov, K.M. Shakirov и др.; Заявлено 1.1.2000; Оpubл. 1.1.2000, Bulletin 2000/22.-1с.
4. Пат. 5,558,695 USA. Process and unit for continuous metal refinement / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, К.М. Шакиров и др.; Заявлено 1.1.1996; Оpubл. 1.1.1996.-1с.
5. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Калашников С.Н. Модели и механизмы самоорганизации в технике и технологиях. В 3-х.: Ч. III. Примеры реализации идей и принципов синергетики: Учеб. Пособие / Под редакцией В.П. Цымбала. СибГИУ. – Новокузнецк, 2005. 264 с.
6. Айзатулов Р.С., Цымбал В.П., Мочалов С.П.и др. Создание саморганизирующегося струйно-эмульсионного реактора и направления структурных изменений в металлургии // Труды Всероссийской научно-практической конференции. “Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии” / Под общей редакцией С.П. Мочалова. СибГИУ. - Новокузнецк, 2001. – С. 42-50.
7. Айзатулов Р.С., Цымбал В.П., Мочалов С.П. и др. Результаты отладки технологии и элементов конструкции нового металлургического процесса и агрегата на опытной установке // Там же. – С. 320-321.
8. Цымбал В.П., Огнев А.М., Рыбенко И.А. Содержательная модель формирования гарнисажа в струйно – эмульсионном технологическом процессе // Труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции “Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии”/ Под общей редакцией С.П. Мочалова / СибГИУ. - Новокузнецк, 2006. – С. 107-116.
9. Огнев А.М., Цымбал В.П. Моделирование гидравлического охлаждения в агрегате типа самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор // Там же. – С. 119-125.
10. Огнев А.М., Цымбал В.П. Комплекс моделей и программ гарнисажного охлаждения металлургических агрегатов струйно-эмульсионного типа // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. - №10. - С. 48-52.
11. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Оленников А.А. От самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора до энергометаллургического комплекса // Черные металлы. – 2010. - №5. – С. 17-23.