

УДК 51.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ, ИССЛЕДОВАНИЯХ И МАЛОЭНЕРГОЕМКИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Цымбал В.П., д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (tsymbal33@mail.ru)

Буинцев В.Н., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий
и программирования

Кожмяченко В.И., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (vadim@itm.sibsiu.ru)

Калашиников С.Н., д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий
и программирования

Сеченов П.А., к.т.н., доцент кафедры прикладных информационных технологий
и программирования (sechenov.p.a.1989@gmail.com)

Сибирский государственный индустриальный университет
(6540007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Представлена ретроспектива научной и учебной деятельности творческого коллектива кафедры прикладных информационных технологий и программирования. В момент организации (в 1980 г.) коллективом кафедры была поставлена задача: создать специалистов нового плана (проблемных программистов), одновременно владеющих методами исследования и математического описания конкретных объектов (в том числе металлургических) и программирования для ЭВМ. По специальному приказу Министерства высшего образования РСФСР была создана в опытном порядке новая специализация: «Математическое обеспечение и ЭВМ в металлургии», которая после 20-летнего педагогического эксперимента переросла в специальность «Информационные системы и технологии (по отраслям)». Кафедра начала первой выпускать таких специалистов не только в регионе, но и в стране, этот опыт затем был воспринят другими вузами. Коллектив вновь созданной кафедры одним из первых в стране начал создавать математические модели металлургических процессов, а затем тренажеры и обучающие системы на их основе. В качестве педагогической концепции был принят деятельностный подход к обучению на основе математической модели конкретной предметной области, многолетний опыт применения такого подхода показал его высокую эффективность. Впервые в мировой металлургии создана концепция и комплекс моделей принципиально нового металлургического процесса и агрегата с элементами самоорганизации, отличающегося на порядок меньшим удельным объемом и в полтора раза меньшими энергозатратами. Совместно с проектировщиками и специалистами Запсибметкомбината создана крупномасштабная опытная установка процесса и агрегата СЭР, на которой подтверждена правильность выдвинутой концепции, отработаны основные конструктивные моменты, показана практическая реализуемость ряда новых разработанных технологий. В процессе создания нового процесса разработаны программно-инструментальные системы: алгоритм расчета взаимосвязанных параметров процесса и агрегата, система «Инжиниринг – Металлургия», система моделирования сложных процессов теплообмена, система имитационного моделирования от уровня частиц с использованием метода Монте-Карло.

Ключевые слова: научная деятельность, учебная деятельность, математические модели, тренажеры, обучающие системы, теория самоорганизации, новый металлургический процесс.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-389-399

ВВЕДЕНИЕ

Начало 90-х гг. совпало с ускорением процесса смены поколений электронно-вычислительных машин (ЭВМ), каждые два года быстродействие которых удваивалось. Стали появляться достаточно надежные управляющие ЭВМ, но для их эффективного применения необходимо было создавать прикладное математическое и программное обеспечения, а также готовить специалистов, владеющих этими вопросами. Особенно большой разрыв между возросшими возможностями

ЭВМ и недостаточной эффективностью их использования наблюдали в металлургии.

Научный коллектив (образовавшийся в 1980 г.) кафедры «Математическое обеспечение и применение ЭВМ в металлургии» (с 1997 г. кафедра «Информационные технологии в металлургии (ИТМ)») поставил задачу создать специалистов нового плана (проблемных программистов), одновременно владеющих методами исследования и математического описания конкретных объектов (в том числе металлургических) и программирования, и с самого начала своей деятельности ис-

поведовал принцип тесного единства науки и учебного процесса.

В результате по согласованию с Министерством черной металлургии СССР по специальному приказу Министерства высшего образования РСФСР была создана в опытный порядок в рамках специальности «Металлургия черных металлов» новая специализация – «Математическое обеспечение и ЭВМ в металлургии», которая после 20-летнего педагогического эксперимента переросла в специальность «Информационные системы и технологии (по отраслям)».

Кафедра первой начала выпускать таких специалистов не только в регионе, но и в стране, опыт затем был воспринят другими вузами (УрФУ, МИСиС, ЛПУ). Кафедра ИТМ первой в университете еще в 1999 г. лицензировала и 10 лет выпускала магистров по направлению «Металлургия», а с 2012 г. также первой начала выпускать магистров по направлению «Информационные системы и технологии». Вследствие этого в период с 1986 по 2005 гг. выпускники кафедры ИТМ заняли преимущественные позиции в подразделениях многих предприятий, так или иначе связанных с информационными технологиями. В настоящее время в г. Новокузнецк и регионе многие наши выпускники стали руководителями предприятий и подразделений по информационным технологиям и частных фирм, а также бизнесменами.

В последние годы география распространения наших выпускников расширилась, многие из них работают в различных городах России (Новосибирск, Москва, Санкт-Петербург, Воронеж и др.), а также других странах (США, Канада, Австралия, Германия), продолжают обучение в магистратуре в США, Канаде, Германии.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

И ТРЕНАЖЕРНО-ОБУЧАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Ядро научного коллектива В.П. Цымбал, В.Н. Буинцев, А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, Н.А. Калиногорский, несколько позже С.П. Мочалов, одними из первых в стране начали создавать математические модели металлургических процессов, а затем тренажеры и обучающие системы на их основе.

В качестве педагогической концепции был принят деятельностный подход к обучению на основе математической модели конкретной предметной области (рис. 1).

На первом уровне обучающийся, используя модель как заместитель объекта, самостоятельно выполняет какой-то вид деятельности (выплавку металла). При этом он ориентируется на выполнение конкретных технико-экономических показателей, например, минимизацию затрат на выполнение этой операции при условии выполнения заданных ограничений по химическому составу и температуре металла. Естественно, что прежде чем выйти на уровень самообучения, необходимо получить определенный объем концептуальных

(теоретических) знаний об этой предметной области. Второй уровень предназначен для управления самообучением по конкретным дидактическим критериям, которые позволяют путем последовательного усложнения заданий и объективного контроля их выполнения добиваться определенной степени обученности на каждом из уровней классической психолого-педагогической триады знания – умения – навыки.

Многолетний опыт применения такого подхода показал его высокую эффективность. Возможность и наглядность оценки знаний по конкретным числовым, в том числе стоимостным критериям, создает дополнительную мотивацию для обучающихся.

В 1981 – 1986 гг. только для Минчермета Украины было создано 15 тренажеров для операторов различных металлургических агрегатов, даже была создана специальная лаборатория, которая осуществляла комплектацию и монтаж тренажеров для металлургических техникумов на основе разработок творческого коллектива (В.Н. Буинцев, А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, С.П. Мочалов, С.Н. Калашников). Были также разработаны тренажеры для Западно-Сибирского, Магнитогорского и Карагандинского металлургических комбинатов. Тренажер «Сталевар» в отделе технического производства Кузнецкого металлургического комбината проработал 15 лет. На рис. 2 представлен фрагмент пульта управления первого тренажера «Сталевар» и его разработчики (А.Ф. Сакун, А.Г. Падалко, В.П. Цымбал, В.Н. Буинцев), они же организаторы новой кафедры и лаборатории тренажеров.

В период с 1986 по 1992 гг. был создан ряд тренажерно-обучающих систем, теперь уже на основе появившихся в то время персональных компьютеров, в том числе, для системы профессионального образования в Санкт-Петербурге. По этим направлениям творческий коллектив занял ведущие позиции в стране.

В последние годы коллективом создан ряд электронных учебников с тренажерными практикумами для интерактивного обучения, основным дидактическим под-

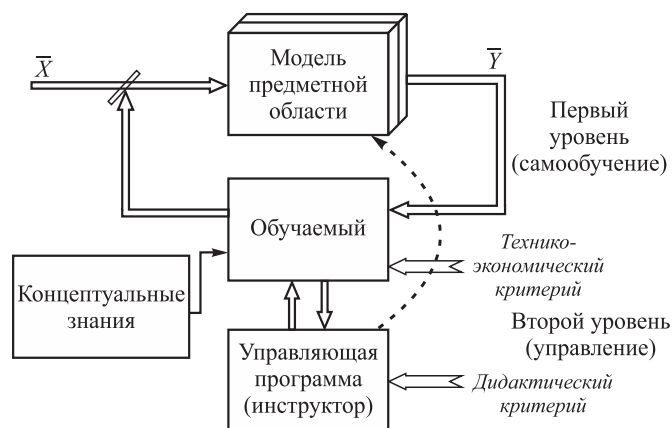


Рис. 1. Структура тренажерно-обучающей системы

Fig. 1. Structure of the training system



Рис. 2. Тренажер «Сталевар» и его создатели

Fig. 2. “Stelmaker” simulator and its designers

ходом в которых является последовательная реализация упомянутой выше триады знания – умения – навыки при условии объективного контроля степени обученности.

МЕХАНИЗМЫ И МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

Существование процессов самоорганизации в жидкой сталеплавильной ванне мартеновской печи было убедительно показано профессором М.Я. Меджибожским в его экспериментах по продувке ванны сжатым воздухом. В этих экспериментах довелось участвовать В.П. Цымбалу во время обучения в аспирантуре в 1961 г. Зрелище «самораскипающейся» мартеновской ванны, наблюдаемое при снижении расхода топлива (то есть увеличении избытка кислорода в газовой фазе над ванной), было впечатляющим и оставило глубокий след в сознании, в том числе при разработке математической модели процесса обезуглероживания.

Несколько позже (в 1970 – 1975 гг.) эффект этого явления был воплощен в жизнь благодаря тому, что коллективом (В.Н. Буинцев, А.Г. Падалко, А.Ф. Сакун, Е.Ф. Хорошавин и др.) были созданы простые аналоговые вычислительные устройства на ферродинамических датчиках для определения избытка воздуха в газовой фазе мартеновской печи над теоретически необходимым для сжигания топливом. Разработка оптимизированных тепловых инструкций к этим вычислительным устройствам [1] и обучение персонала на созданном несколько позже тренажере «Сталевар» позволили получить большой экономический эффект: от 10 до 20 тыс. т топливного мазута в год. Этот эффект был достигнут практически «из ничего» (если не считать небольших затрат на простые вычислительные устройства). При этом на 10 % был снижен расход условного топлива и на 12 % расход руды. Это было достигнуто за счет использования эффекта «раскипания» ванны, т. е. за счет поглощения ванной горячего избыточного кислорода из газовой фазы печи. Это был первый впечатляющий эффект самоорганизации.

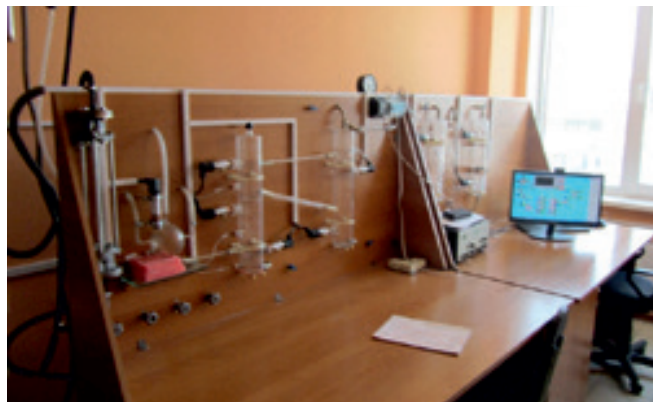


Рис. 3. Низкотемпературная физическая модель процесса СЭР

Fig. 3. Low-temperature physical model of JER process

В 1981 г. в серии «Математика, кибернетика» вышла обзорная брошюра С.П. Курдюмова и Г.Г. Малинецкого «Синергетика – наука о самоорганизации» [2] со ссылкой на появившиеся в русском переводе основополагающие труды по теории самоорганизации (синергетике) И. Пригожина [3] и Г. Хакена [4]. Появление этой теории явилось приятным сюрпризом, потому что в результате предыдущих исследований мы были подготовлены к восприятию этих идей.

В результате более глубокого изучения этих и вскоре появившихся других работ [5 – 7] этого направления возникла мысль создать принципиально новый металлургический процесс и агрегат, в котором можно было бы реализовать некоторые принципы этой теории. Была создана низкотемпературная физическая модель (рис. 3), на которой показана возможность реализации таких принципов, как большое отклонение от термодинамического равновесия, минимальное принуждение, круговая подчиненность, а также создание стационарного колебательного режима [8]. Конструктивно это достигали путем создания вынужденного движения двухфазной рабочей среды в замкнутой системе под давлением.

По результатам демонстрации этой модели руководителям Западно-Сибирского металлургического комбината Б.А. Кустову и Р.С. Айзатулову¹ было принято решение о создании опытной установки, предназначенной для переработки пылевидных отходов: омазочной окалины прокатного производства, шлама газоочисток, отработанных масел и др.

САМООРГАНИЗУЮЩИЙСЯ СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННЫЙ РЕАКТОР

При проектировании нового процесса были реализованы следующие принципы [8, 9]:

¹ В работе принимали участие И.А. Рыбенко, С.П. Мочалов, А.Б. Юрьев, В.В. Соколов, В.П. Тютюльников, С.В. Щипанов, А.А. Рыбушкин, Е.В. Суздальцев, К.М. Шакиров, А.Г. Падалко, Е.И. Ливерц, С.Ю. Красноперов.

– 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;

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

– использование нелинейной зависимости скорости течения двухфазной среды от газосодержания [10] для создания потенциала давления за счет эффекта газодинамического запирания соединительного канала;

– создание диссипативных структур, существенно отклоненных от термодинамического равновесия, что позволило получить большие возможности по управлению химическим составом металла и шлака [9].

Использование описанных выше подходов и принципов позволило создать агрегат с очень малыми удельным объемом и энергоемкостью [8, 9]. Технологическая схема агрегата СЭР (самоорганизующийся струйно-эмульсионный реактор) представлена на рис. 4.

Основу технологической схемы мини-модуля составляют [8] система подачи шихты 1 – 5, реактор-ос-

циллятор 6, соединительный канал с газодинамическим самозапиранием 7, рафинирующий отстойник 8, одновременно играющий роль первой ступени мокрой газоочистки, копильник 9, система гарнисажного охлаждения 10, канал 11 для выдачи газошлаковой эмульсии и канал 12 для перетока части газа, шлакоприемник 13 с гранулятором 14, конвейер 15, приемный ковш 16, система утилизации тепла в кипящем слое или реформации дымовых газов в синтез-газ 17, система газоочистки 18.

Созданный в реакторе-осцилляторе 6 высокий потенциал давления, а также полная изоляция процесса от атмосферы позволяют 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 реакторе-осцилляторе 6, в котором создается газовзвесь с объемной долей газа порядка 0,99. Вследствие зависимости скорости истечения двухфазной среды от газосодержания 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

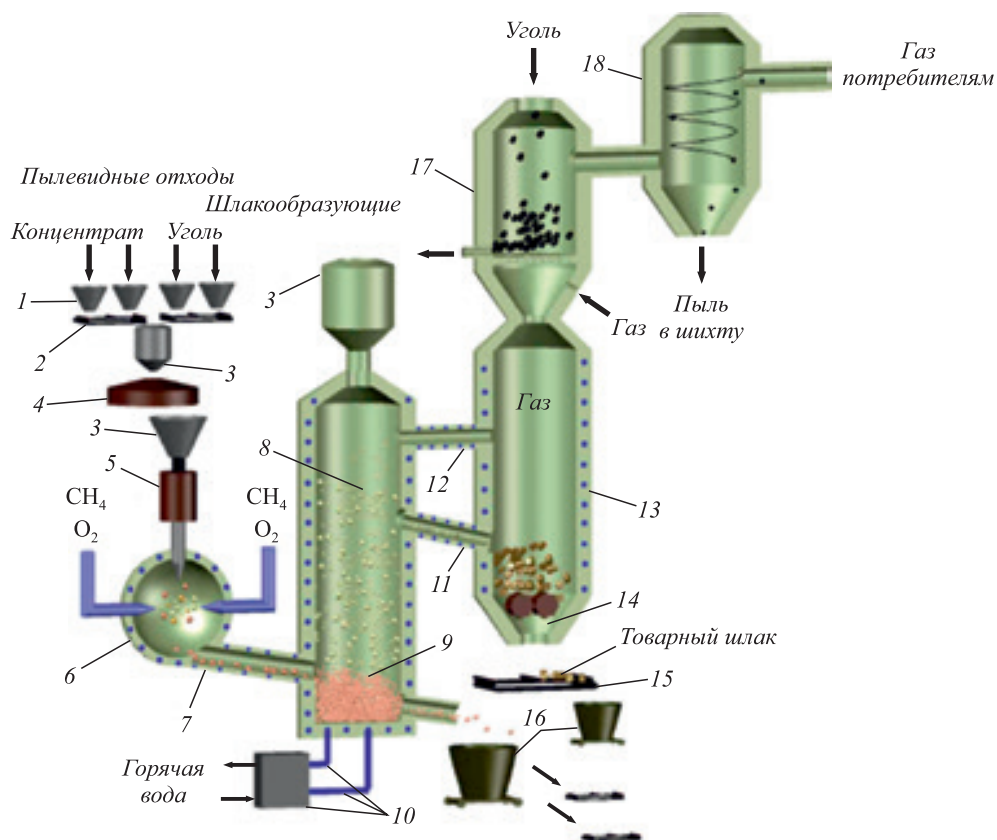


Рис.4. Технологическая схема агрегата СЭР

Fig. 4. Technological scheme of the JER unit

создавать стационарный колебательный режим (само-организующийся реактор-осциллятор) [8].

В связи с высокой интенсивностью протекающих в агрегате газодинамических процессов течения агрессивной двухфазной среды защита всех элементов агрегата осуществляется на основе циркуляционного гарнисажного охлаждения. Для решения этой задачи разработана специализированная автоматизированная система проектирования и расчета, которая может также выполнять функции диагностики при реализации такой системы охлаждения и поддержания гарнисажа [8].

СОСТОЯНИЕ, РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ

Описанный выше процесс и агрегат был реализован в виде крупномасштабной опытной установки во втором конвертерном цехе № 2 ЗСМК на освободившейся площадке перелива чугуна (рис. 5). Всего в создании установки и проведении экспериментов участвовало более 50 человек. Организация и проведение экспериментов подробно описаны в монографии [8]. Из числа опытных металлургов-практиков была создана бригада сталеваров под руководством В.П. Тютюльникова, которая сыграла важную роль в совершенствовании конструкции установки и проведении уникальных экспериментов (рис. 6). В этом эксперименте высокотемпературная двухфазная струя «выстреливалась» из шарообразного реактора на футерованную площадку, что позволило получить ценные данные о физических и химических свойствах частиц, вылетающих из первого реактора, скоростях химических реакций и др., а также идентифицировать математические модели. С 1992 по 2001 гг. на этой установке было проведено 40 серий экспериментов, которые позволили подтвердить правильность заложенных теоретических и конструктивных решений и усовершенствовать конструкцию установки.

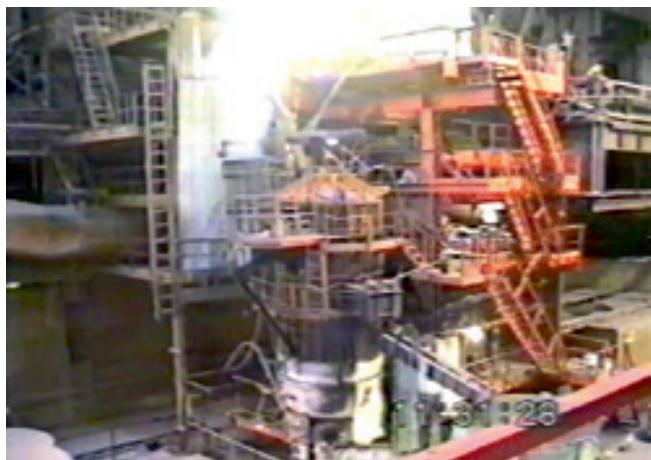


Рис. 5. Общий вид опытной установки

Fig. 5. General view of the pilot unit

Было разработано и проверено экспериментально несколько новых малоэнергоёмких технологий, в том числе прямое восстановление пылевидных руд и отходов (шламов, омазученной окалины) без агломерации, получение марганцевых сплавов из бедных пылевидных руд, разделение титано-магнетитовых концентратов на железо и кондиционный титанистый шлак. Процесс был запатентован в основных металлопроизводящих странах (США, Япония, Южная Корея, ряд Европейских стран, Россия).

ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ – ПЕРЕРАБОТКА ПЫЛЕВИДНЫХ ОТХОДОВ

Разработанный процесс и агрегат обладает определенной степенью универсальности. Имеется возможность путем изменения режима продувки и степени дожигания топлива-восстановителя перерабатывать пылевидные материалы с широким диапазоном изменения химического состава, в том числе бедные пылеватые руды и хвосты обогащения. Кроме того, агрегат СЭР можно использовать в качестве газификатора пылевидных фракций угля, но наиболее экономичным является вариант с использованием смеси угля и пылевидных железосодержащих отходов. При этом облегчается процесс поддержания стабильного слоя шлако-металлической эмульсии, внутри которой сжигается топливо, а также снижается расход газообразного кислорода за счет использования кислорода из оксидов железа.

Необходимо подчеркнуть целесообразность ориентации на первом этапе реализации производственной программы на получение первородной шихтовой заготовки для электросталеплавильных печей. Дело в том, что, несмотря на возросшие трудности реализации готового проката, рынок оборотного лома остается ненасыщенным, а стоимость лома находится на уровне себестоимости чугуна. В России в последние годы построено и планируется строительство нескольких



Рис. 6. Высокотемпературная струя из первого реактора

Fig. 6. High-temperature jet from the first reactor

мини-заводов, в связи с чем дефицит лома возрастет. Исключение составляет только Уральский регион, где имеется много старых закрытых или реконструируемых заводов [11].

Все острее становится проблема загрязнения обогатительного лома неокисляемыми примесями (медь, никель и др.), что не позволяет выплавлять некоторые марки стали или ухудшает качество металла. В связи с этим в шихту электросталеплавильных печей приходится добавлять железо прямого восстановления (окашки или брикеты), которое значительно дороже лома [12], а при дальних его перевозках существует опасность самовозгорания. Кроме того при использовании брикетов значительно возрастают затраты энергии и количество шлака [13, 14].

Этих недостатков лишена первородная шихтовая заготовка, которую планируется получать из шлама и окислы по предлагаемой технологии [8], которая отличается низкими энергетическими затратами и капиталоемкостью по сравнению с известными процессами прямого восстановления [15 – 18]. Так, например, по результатам европейских исследований и сравнительного анализа технологий, направленных на снижение выбросов углекислого газа, утверждается, что «замена технологического маршрута «доменная печь – кислородный конвертер» на процессы прямого восстановления на основе использования природного газа и выплавки стали в электродуговых печах с целью сокращения выбросов оксида углерода CO_2 , вероятно, является экономически неэффективной» [19]. Примерно такая же оценка этой ситуации дается и в работе [20].

Ниже приведено сравнение технико-экономических показателей процесса СЭР с наиболее близким и продвинутым в мире аналогом – агрегатом КОРЕКС [21]:

Показатели	КОРЕКС	СЭР	Преимущество
Энергоемкость, ГДж/т	29	15 – 17	в 1,7 раза
Удельный объем, т/м ³ ·сут.	1,1	11,0	в 10,0 раз
Капитальные затраты, \$/т год	350	120 – 150	в 2,5 раза

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате многолетних работ по созданию нового металлургического процесса разработан ряд программно-инструментальных систем моделирования, которые позволяют значительно ускорить и облегчить процесс исследований.

1. *Алгоритм расчета взаимосвязанных параметров процесса и агрегата.* Создан [8] профессором С.П. Мочаловым и доцентом В.И. Кожемяченко. В связи с тем, что важнейшей предпосылкой для реализации основных принципов самоорганизации и, в первую очередь, большого отклонения от термодинамического равновесия является создание вынужденного движения

двухфазной среды (газовзвеси) в замкнутой системе, режимные параметры процесса и основные конструктивные параметры агрегата оказываются жестко, детерминированно связанными.

При этом для стационарного состояния связь между этими параметрами в общем виде описывается фундаментальным уравнением Менделеева-Клапейрона, а скорость течения двухфазной среды в соединительном канале определяется по уравнению, полученному на основе математической модели течения такой среды в высокотемпературных условиях [8]. Фрагмент алгоритма расчета представлен на рис. 7.

На основе этого алгоритма имеется возможность расчета режимных и конструктивных параметров системы последовательно соединенных аппаратов для любых заданных условий и производительности, что значительно облегчает проектирование, особенно на стадии научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы.

2. *Система «Инжиниринг – Металлургия»*, зарегистрированная в Федеральной службе по интеллектуальной собственности [22]. Создание этой системы оказалось возможным в результате многолетнего опыта термодинамических исследований д.т.н. И.А. Рыбенко. Эта система, объединяющая математические модели, базы данных [23] и алгоритмы оптимизации, позволяет решать широкий круг задач, особенно на этапе поисковых исследований. Содержание и взаимосвязь задач достаточно понятны из рис. 8.

3. *Система моделирования сложных процессов теплообмена.* Разработана С.Н. Калашниковым, С.П. Мочаловым, С.Ю. Красноперовым.

Задача исследования температурных полей в элементах конструкций со сложной геометрической областью в двумерном приближении реализуется на основе применения алгоритмов решения задач теплообмена в табличном процессоре Excel в составе MS Office 2000 и разработки VBA-приложений для организации работы алгоритма. Отличительной особенностью разработанного проекта является организация взаимосвязи ячеек табличного процессора в соответствии с геометрическими особенностями исследуемого объекта и алгоритма решения дифференциальных уравнений математической модели таким образом, что построение объекта исследования в табличной среде реализуется в автоматизированном режиме с помощью VBA-приложений. Кроме этого путем формирования критерия оптимизации в соответствии с требуемой естественно-физической постановкой задачи и реализации поставленной оптимизационной задачи с помощью оптимизатора (Solver) табличного процессора Excel возможно автоматизированное решение задачи выбора оптимальных конструктивных параметров проектируемых агрегатов.

Описанный выше подход использован при подборе оптимальных размеров соединительных фланцев ре-

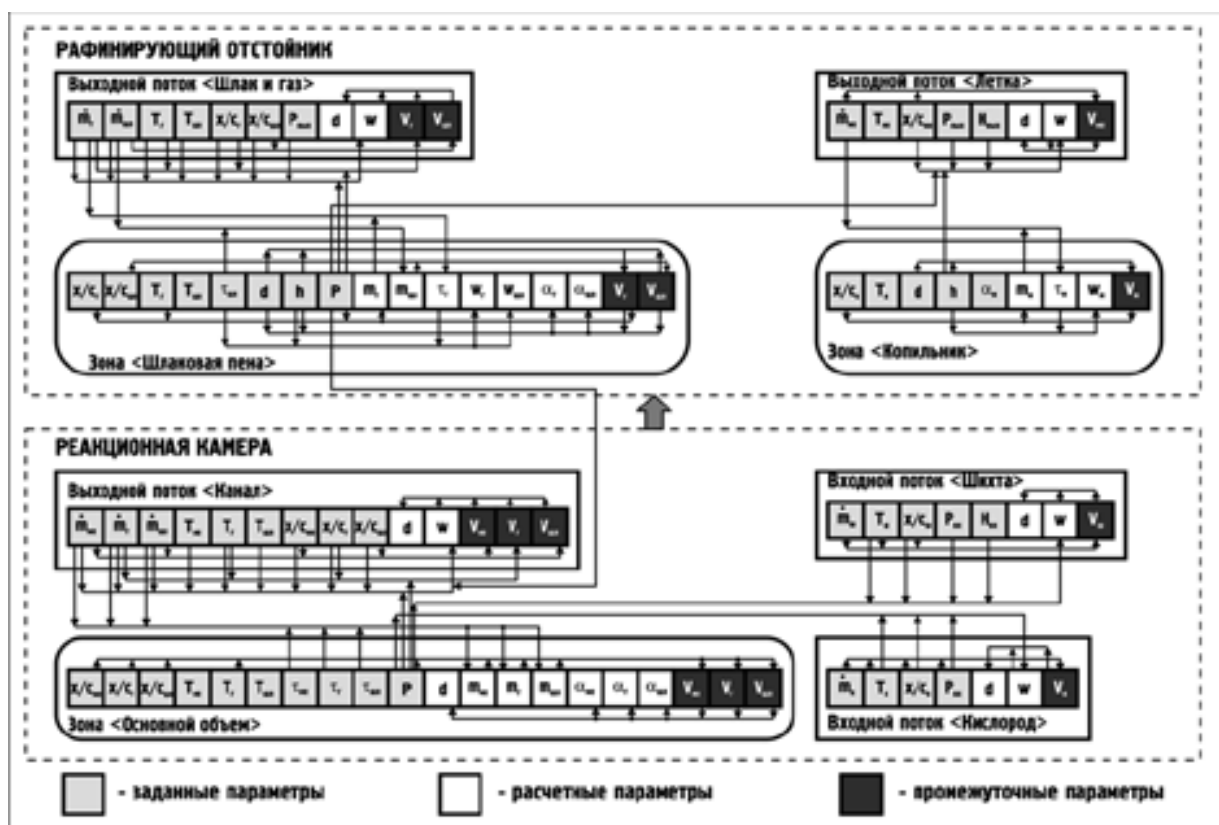


Рис. 7. Фрагмент алгоритма расчета взаимосвязанных параметров процесса и агрегата СЭР

Fig. 7. A fragment of the algorithm for calculating interrelated parameters of JER process and the unit

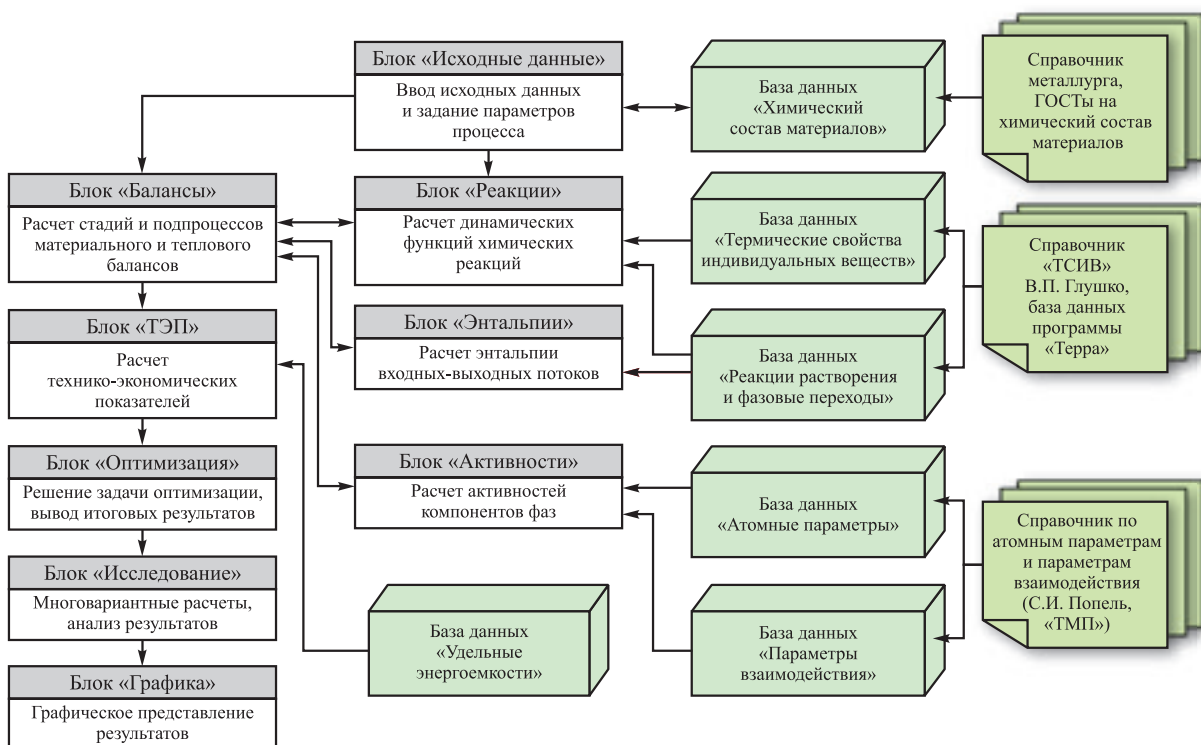


Рис. 8. Структурная схема инструментальной системы «Инжиниринг – Металлургия»

Fig. 8. Structural diagram of “Engineering – Metallurgy” instrumental system

актора и размеров каналов для движения воды в корпусе струйно-эмульсионного металлургического реактора [8]. На рис. 9 представлено температурное поле, установившееся во фланце и прилегающих к нему участках стенки реактора в одном из расчетов вычислительного эксперимента.

4. Система имитационного моделирования от уровня частиц с использованием метода Монте-Карло [24] разработана к.т.н. П.А.Сеченовым [25].

Интерфейс программы имитационного моделирования представлен на рис. 10. Ядром рассматриваемой ниже модели является процесс обтекания дисперсной частицы (шихты, продуктов реакций) вертикальным потоком газа с учетом действующих на нее сил. Учитываются также упругие и неупругие (слипание) взаимодействия и изменение состояния частиц во времени и в процессе слипания.

Алгоритм, разработанный для реализации этой модели [25], имеет развитую систему графического представления информации и интерактивный интерфейс, что позволяет проводить большой объем статистических исследований, добиваясь приближения к генеральной совокупности. Наряду с отображением результатов движения и взаимодействия частиц выводится информация об общем количестве частиц в реакторе, количестве частиц железной руды, углерода, шлака, железа, оксидов углерода CO и CO₂; средние массы

железной руды, шлака и железа за минуту; графики массового содержания соответствующих частиц. Также предусмотрена возможность изучения влияния количества подаваемых частиц железной руды, углерода и других параметров на состав металла, шлака и газа.

Тестирование показало работоспособность алгоритма и удовлетворительное совпадение конечных результатов имитационного моделирования с законом сохранения вещества. Созданная имитационная модель, являющаяся своеобразной «виртуальной реальностью», позволяет наглядно изучать механизм процессов в гравитационном сепараторе при разном гранулометрическом составе, оценивать среднее время пребывания частиц, определять средний расход частиц железа и шлака при различном заданном количестве частиц руды, углерода и др.

Развитие этого направления позволит решать широкий круг задач, связанных с моделированием существенно гетерогенных потоков, когда допущение о псевдогомогенности несостоятельно из-за широкого диапазона гранулометрического состава.

Выводы

Представлены основные результаты научных исследований авторского коллектива кафедры прикладных информационных технологий и программирова-

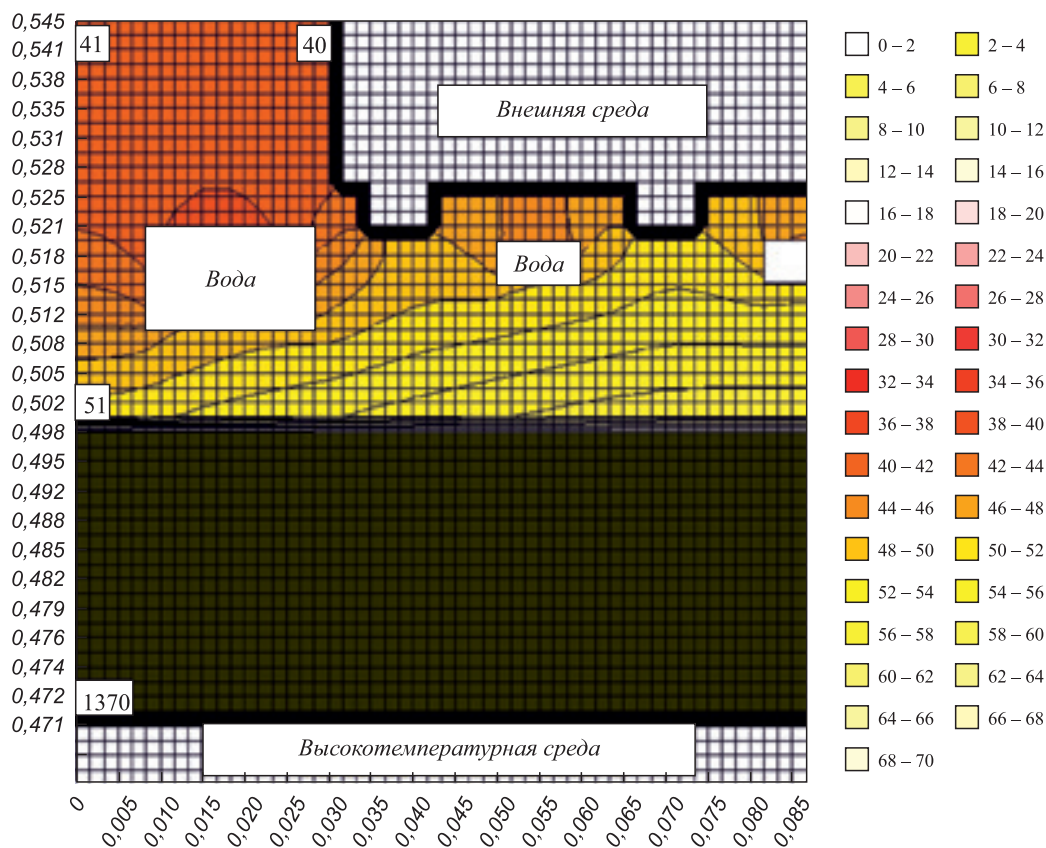


Рис. 9. Фрагмент моделирования температурных полей

Fig. 9. Fragment of temperature fields modeling

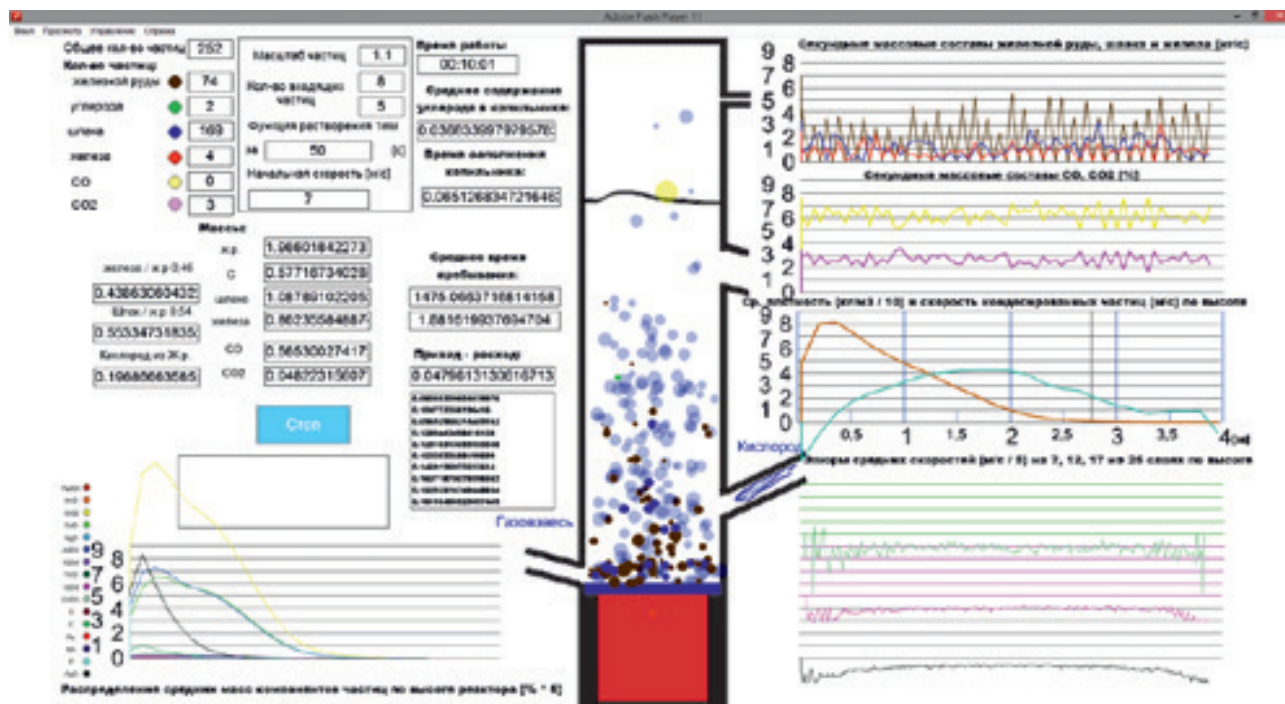


Рис. 10. Интерфейс программы имитационного моделирования

Fig. 10. Simulation program interface

ния, образованной сорок лет назад в опытном порядке по специальному разрешению Министерства образования и Министерства черной металлургии: многолетний педагогический эксперимент по созданию новой специальности, разработка тренажерно-обучающих систем и электронных учебников, создание нового струйно-эмульсионного металлургического процесса с использованием принципов самоорганизации, разработка программно-инструментальных систем моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цымбал В.П. Управление окислительной способностью мартеновской печи на основе статической модели с использованием саморегулирования кипящей ванны // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 4. С. 162 – 165.
2. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика – теория самоорганизации. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
3. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. – New York: Wiley, 1977. – 504 p.
4. Haken H. Synergetics. – Berlin: Springer, 1978. – 351 p.
5. Prigogine I., Stengers I. Order out of Chaos. Man's New Dialogue with Nature. – New York: Bantam Books, 1984. – 349 p.
6. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса. Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: Наука, 1990. – 320 с.
7. Князева Е.Н., Курдюмов С.П. Основания синергетики: Режимы с обострением, самоорганизация, темпомиры. – СПб.: Алетейя, 2002. – 414 с.
8. Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор / В.П. Цымбал, С. П. Мочалов, И.А. Рыбенко и др. – М.: Металлургиздат, 2014. – 488 с.
9. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Шакиров К.М. Управление составом получаемого металла при прямом восстановлении пылевидных материалов и отходов в агрегате СЭР // Металлург. 2015. № 2. С. 24 – 28.
10. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. Wave Propagation in Gas-Liquid Media. – Boca Raton: CRC Press, 1993. – 222 p.
11. Гордон Я.М., Спирин Н.А., Швыдкий В.С. и др. Металлический лом – важный вторичный ресурс улучшения энергоэффективности и сбережения ресурсов в черной металлургии. – В кн.: Металлургия: технологии, инновации, качество. Ч. 1. – Новокузнецк, 2017. С. 390 – 400.
12. Korostelev A.A., S'emshchikov N.S., Semin A.E., etc. Increase in EAF lining life with use of hot-briquetted iron in a charge // Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 59. No. 2. P. 107 – 114.
13. Люкхоф Я., Апфель Й., Буттлер Й. Использование различных видов металлошихты в электросталеплавильном производстве // Черные металлы. 2017. № 10. С. 28 – 33.
14. Abd Elkader M., Fathy A., Eissa M., Sayed Sh. Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of EAF steelmaking process // ISIJ International. 2016. Vol. 5. No. 2. P. 2016 – 2024.
15. Sulimova M.A., Litvinova T.E. Metallurgical production waste treatment efficiency increase // Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings, SGEM 2016. Vol. II. P. 569 – 575.
16. Дуарте П., Бесерра Х. Производство высокоуглеродистого железа прямого восстановления (DRI) по технологии Energiron DR // Черные металлы. 2016. № 6. С. 24 – 30.
17. Дорофеев Г.А., Янговский П.Р., Смирнов К.Г., Степанов Я.М. Процесс ORIEN для выплавки высококачественных сталей из рудного и энергетического сырья на принципе самоэнергообеспечения // Черные металлы. 2017. № 5. С. 17 – 23.
18. Kinaci M.E., Lichtenegger T., Schneiderbauer S. Direct reduction of iron-ore in fluidized beds // 28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Graz, AUSTRIA, 2018. Vol. 43. P. 217 – 222.
19. Шенк Й., Люнген Х.Б. Потенциал эффективного применения процессов прямого восстановления и восстановительной плавки в Европе // Черные металлы. 2017. № 2. С. 25 – 31.

20. Meijer K, van der Stel J., Zeilstra C. etc. The HIsarna ironmaking process // Proc. METEC and 2nd ESTAD, 15–19 June 2015, Düsseldorf, Germany. P. 15 – 19.
21. Basdag A., Arol A.I. Coating of iron oxide pellets for direct reduction // Scandinavian Journal of Metallurgy. 2002. Vol. 31. No. 3. P. 229 – 233.
22. Рыбенко И.А., Оленников А.А. Инжиниринг-Металлургия // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617445; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.07.2017.
23. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 353 с.
24. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z.I. Why the Monte Carlo method is so important today // Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 2014. Vol. 6. No. 6. P. 386 – 392.
25. Tsymbal V., Olennikov A., Rybenko I. etc. 2017. Mathematical Modeling of SER Jet-Emulsion Process. In: F. Kongoli, A. Conejo, M.C. Gomez-Marroquin, editors. Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition SIPS 2017. Vol. 9: Iron and Steel, Metals and Alloys. Vol. 9. Montreal (Canada): FLOGEN Star Outreach. P. 104 – 115.

Поступила в редакцию 31 января 2020 г.

После доработки 6 февраля 2020 г.

Принята к публикации 10 февраля 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 5, pp. 389–399.

MATHEMATICAL MODELING IN EDUCATION PROCESS, RESEARCH AND LOW-ENERGY METALLURGICAL TECHNOLOGIES

V.P. Tsymbal, V.N. Buintsev, V.I. Kozhemyachenko, S.N. Kalashnikov, P.A. Sechenov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The article presents a retrospective of scientific and educational activities of the Chair “Applied Information Technologies and Programming”. At the time of organization (in 1980), the Chair’s staff has set a task: to create specialists of a new plan (problem programmers) who simultaneously possess methods of research and mathematical description of specific objects (including metallurgical ones) and computer programming. By special order of the RSFSR Ministry of Higher Education, a new specialization was created in experimental order: “Computer support and computers in metallurgy”, which after 20 years of pedagogical experiment developed into the specialty “Information systems and technologies (by industry)”. The Chair was the first to produce such specialists not only in the region, but also in the country, and this experience was then adopted by other universities. The staff of the newly created Chair was one of the first in the country to create mathematical models of metallurgical processes, and then simulators and training systems based on them. An activity-based approach to learning based on a mathematical model of specific subject area was adopted as a pedagogical concept. Many years of experience in applying this approach has shown its high effectiveness. For the first time in metallurgy, a concept and a set of models of fundamentally new metallurgical process and unit with elements of self-organization was developed, characterized by an order of magnitude lower specific volume and one and a half times less energy consumption. Together with the designers and specialists of ZapSibMetKombinat (West Siberian Metallurgical Plant), a large-scale pilot installation of JER unit process was created, which confirmed the correctness of the proposed concept, worked out the main design points, and showed the practical feasibility of a number of new technologies developed. In a new process creating, software and tool systems were worked out: an algorithm for calculating the interrelated parameters of the process and the unit, the “Engineering-metallurgy” system, a system for modeling complex heat transfer processes, and a system for simulating the particle level using the Monte Carlo method.

Keywords: scientific research, educational activity, mathematical model, simulator, training system, theory of self-organization, new metallurgical process.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-389-399

REFERENCES

1. Tsymbal V.P. Control of oxidizing ability of open hearth furnace based on the static model using boiling bath self-regulating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 4, pp. 162–165. (In Russ.).
2. Kurdyumov S.P., Malinetskii G.G. *Sinergetika – teoriya samoorganizatsii* [Synergetics – Theory of self-organization]. Moscow: Znanie, 1983, 64 p. (In Russ.).
3. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Non-Equilibrium Systems*. New York: Wiley, 1977, 504 p.
4. Haken H. *Synergetics*. Berlin: Springer, 1978, 351 p.
5. Prigogine I., Stengers I. *Order out of Chaos. Man’s New Dialogue with Nature*. New York: Bantam Books, 1984, 349 p.
6. Klimontovich Yu.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa. Novyi podkhod k statisticheskoi teorii otkrytykh sistem* [Turbulent motion and chaos structure. A new approach to statistical theory of open systems]. Moscow: Nauka, 1990, 320 p. (In Russ.).
7. Knyazeva E.N., Kurdyumov S.P. *Osnovaniya sinergetiki: Rezhimy s obostreniem, samoorganizatsiya, tempomiry* [Base of synergetics: Exacerbated modes, self-organization, temp worlds]. St. Petersburg: Aleteiya, 2002, 414 p. (In Russ.).
8. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Rybenko I.A. etc. *Protsess SER – metallurgicheskii struino-emul’sionnyi reaktor* [JER process – metallurgical jet-emulsion reactor]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 488 p. (In Russ.).
9. Tsymbal V.P., Mochalov S.P., Shakhov K.M. Controlling the composition of the metal in the direct reduction of dust-sized materials and waste products in a jet-emulsion reactor. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1-2, pp. 119–125.
10. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. *Wave propagation in Gas-Liquid Media*. Boca Raton: CRC Press, 1993, 222 p.
11. Gordon Ya.M., Spirin N.A., Shvydkii V.S. etc. Scrap metal as an important secondary resource for improving energy efficiency and resource saving in steel industry. In: *Metallurgiya: tekhnologii, innovatsii, kachestvo. Ch. 1*. [Metallurgy: technology, innovation, quality. Part 1]. Novokuznetsk, 2017, pp. 390–400. (In Russ.).
12. Korostelev A.A., S’emshchikov N.S., Semin A.E. etc. Increase in EAF lining life with use of hot-briquetted iron in a charge. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018, vol. 59, no. 2, pp. 107–114.
13. Lückhoff J., Apfel J., Buttler J. Application of different kinds of metal charge materials in EAF operation. *Chernye metally*. 2017, no. 10, pp. 28–33. (In Russ.).
14. Abd Elkader M., Fathy A., Eissa M., Sayed Sh. Effect of direct reduced iron proportion in metallic charge on technological parameters of EAF steelmaking process. *ISIJ International*. 2016, vol. 5, no. 2, pp. 2016–2024.

15. Sulimova M.A., Litvinova T.E. Metallurgical production waste treatment efficiency increase. *Ecology, Economics, Education and Legislation Conference Proceedings, SGEM*. 2016, vol. II, pp. 569–575.
16. Duarte P., Beserra Kh. Production of high-carbon iron by direct carbon reduction (DRI) using Energiron DR technology. *Chernye metally*. 2016, no. 6, pp. 24–30. (In Russ.).
17. Dorofeev G.A., Yantovskii P.R., Smirnov K.G., Stepanov Ya.M. The process “orien” for smelting of high-quality steels from ore and energy raw materials based on the principle of the energy self-supplying. *Chernye metally*. 2017, no. 5, pp. 17–23. (In Russ.).
18. Kinaci M.E., Lichtenegger T., Schneiderbauer S. Direct reduction of iron-ore in fluidized beds. In: *28th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Graz, AUSTRIA*, 2018, vol. 43, pp. 217–222.
19. Schenck J., Lungen H. Review of application of DRI processes in EC countries. *Chernye metally*. 2017, no. 2, pp. 25–31. (In Russ.).
20. Meijer K., van der Stel J., Zeilstra C. etc. The HIsarna ironmaking process. In: *Proc. METEC and 2nd ESTAD, 15–19 June 2015, Düsseldorf, Germany*, pp. 15–19.
21. Basdag A., Arol, A.I. Coating of iron oxide pellets for direct reduction. *Scandinavian Journal of Metallurgy*. 2002, vol. 31, no. 3, pp. 229–233.
22. Rybenko I.A., Olennikov A.A. *Inzhiniring – Metallurgiya* [Engineering – Metallurgy]. Certificate of state registration of computer program no. 2017617445. 2017. (In Russ.).
23. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 353 p. (In Russ.).
24. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z.I. Why the Monte Carlo method is so important today. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*. 2014, vol. 6, no. 6, pp. 386–392.
25. Tsymbal V., Olennikov A., Rybenko I. etc. Mathematical Modeling of SER Jet-Emulsion Process. In: *Sustainable Industrial Processing Summit & Exhibition SIPS 2017. Vol. 9: Iron and Steel, Metals and Alloys*. Kongoli F., Conejo A., Gomez-Marroquin M.C. eds. Montreal (Canada): FLOGEN Star Outreach, pp. 104–115.

Information about the authors:

V.P. Tsymbal, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming” (tsymbal33@mail.ru)

V.N. Buintsev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming”

V.I. Kozhemyachenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming” (vadim@itm.sibsiu.ru)

S.N. Kalashnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming”

P.A. Sechenov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Applied Information Technologies and Programming” (sechenov.p.a.1989@gmail.com)

Received January 31, 2020

Revised February 6, 2020

Accepted February 10, 2020