

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.162.263

**В.В. Лавров<sup>1</sup>, Н.А. Спиринов<sup>1</sup>, А.А. Бурыкин<sup>1</sup>, О.П. Онорин<sup>2</sup>,  
И.Е. Косаченко<sup>3</sup>, А.В. Краснобаев<sup>3</sup>, В.Ю. Рыболовлев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

<sup>2</sup> ОАО «Уральский институт металлов»

<sup>3</sup> ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Аннотация.** Представлены этапы разработки информационно-моделирующей системы, позволяющей оценивать расположение и форму зоны вязкопластичных масс железорудных материалов (зону когезии) в доменной печи, осуществлять диагностику ее рациональной конфигурации по реально доступной информации о работающей печи для базового периода, а также решать комплекс задач для проектного периода при изменении режимных параметров плавки. Отражены функциональные возможности и результаты использования программного обеспечения для управления технологией доменной плавки ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Ключевые слова:** доменное производство, информационно-моделирующая система, разработка программного обеспечения, теплообмен, вязкопластичное состояние, железорудные материалы, конфигурация зоны когезии.

## THE DEVELOPMENT OF THE MODELING SYSTEM OF THE CALCULATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES AND ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE ZONE OF VISCOPLASTIC STATE OF IRON METAL MATERIALS IN BLAST FURNACE

**Abstract.** This report presents the development of cycles used by authors in the creation of the computer decision support system, allowing to size up an arrangement and the form of a zone of viscousplastic weights of iron metal materials (plastic zone) in a blast furnace, to carry out diagnostic of its rational configuration under really accessible information on the working blast furnace for the base period, and also to solve a complex of problems for the design period at change of operating conditions of fusion. The article reflects the functionality and the results of use of the software to solve technological problems in the blast-furnace process of OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works.

**Keywords:** blast furnace, the computer decision support system, software development, heat exchange stockline, technological smelting conditions, charge material distributions, liquid phase formation, plastic zone position.

Роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии MES-уровня (Manufacturing Execution Systems – системы управления технологией, производственными процессами) современных автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России в настоящее время становится все более очевидной. Это определяет потребность в разработке специализированного программного обеспечения информационно-моделирующих систем, в основу которого положен комплекс математических моделей, учитывающих как физику процесса, основы теории тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, так и особенности влияния технологических и стандартных характеристик сырья на показатели производственного процесса [1, 2]. При этом важно обеспечить высокий уровень их интеграции с су-

ществующими производственными и корпоративными системами.

Основные показатели работы доменной печи во многом определяются параметрами зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов. Форма зоны пластичности и ее расположение в профиле доменной печи определяются рядом факторов, основными из которых являются распределение рудной нагрузки по сечению колошника, а также характеристики вязкопластичного состояния железорудных материалов: температура начала и температура расплавления (появление текучего шлакового расплава). Максимально возможная производительность может быть достигнута при наилучшей форме и наименьшей толщине зоны пластичности, а также при хорошей фильтрации расплавов в зоне, расположенной ниже зоны пластичности [3, 4].

Несмотря на расширение возможностей определения положения зоны пластичности в доменной печи, в том числе и с помощью математического моделирования [5 – 12], актуальными остаются вопросы создания методов оперативного контроля ее положения и оценки изменения в процессе плавки.

В основу разработки математической модели информационно-моделирующей системы расчета теплообменных процессов и оценки параметров зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи положен известный принцип возмущенного-невозмущенного движения [13]. Модель доменного процесса условно можно разделить на две части – модель базового состояния и прогнозирующую модель (модель в малом). Модель базового состояния позволяет оценивать состояние процесса по фактическим усредненным показателям за базовый период работы печи. Прогнозирующая модель с использованием результатов, полученных с помощью модели базового состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения условий плавки. Ранее этот принцип был успешно использован при моделировании теплового, дутьевого, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки [1, 2].

Поскольку математическая модель расположения и конфигурации зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов является относительно сложной для реализации подсистемы в виде программного модуля, потребовалось проведение функционального

моделирования [14] и с детальной разработкой спецификаций отдельных блоков модели.

Функциональное моделирование выполнено по стандарту IDEF0 (Integrated computer aided manufacturing DEFinition), который является развитием методики SADT (Structural Analysis and Design Technique) [14]. Использование методики IDEF0 позволило создать функциональную структуру информационно-моделирующей системы, выявить производимые действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции, что в конечном итоге позволило на ранней стадии проектирования предотвратить возможные ошибки. Реализация выполнена с помощью CASE-средства AllFusion Process Modeler (BPwin) [15].

Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели составляет 104. Фрагмент диаграммы 1-го уровня функциональной модели подсистемы моделирования зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов, представленный на рис. 1, включает следующие функции:

– «Осуществить сбор и первичную обработку данных» (блок A1) обеспечивает автоматическое наполнение системы данными из АСУ ТП и КИС; сбор первичных данных производится в строго регламентированные моменты времени, которые установлены согласно требованиям инженерно-технологического персонала доменного цеха, выходная информация служит источником для всех других подсистем;

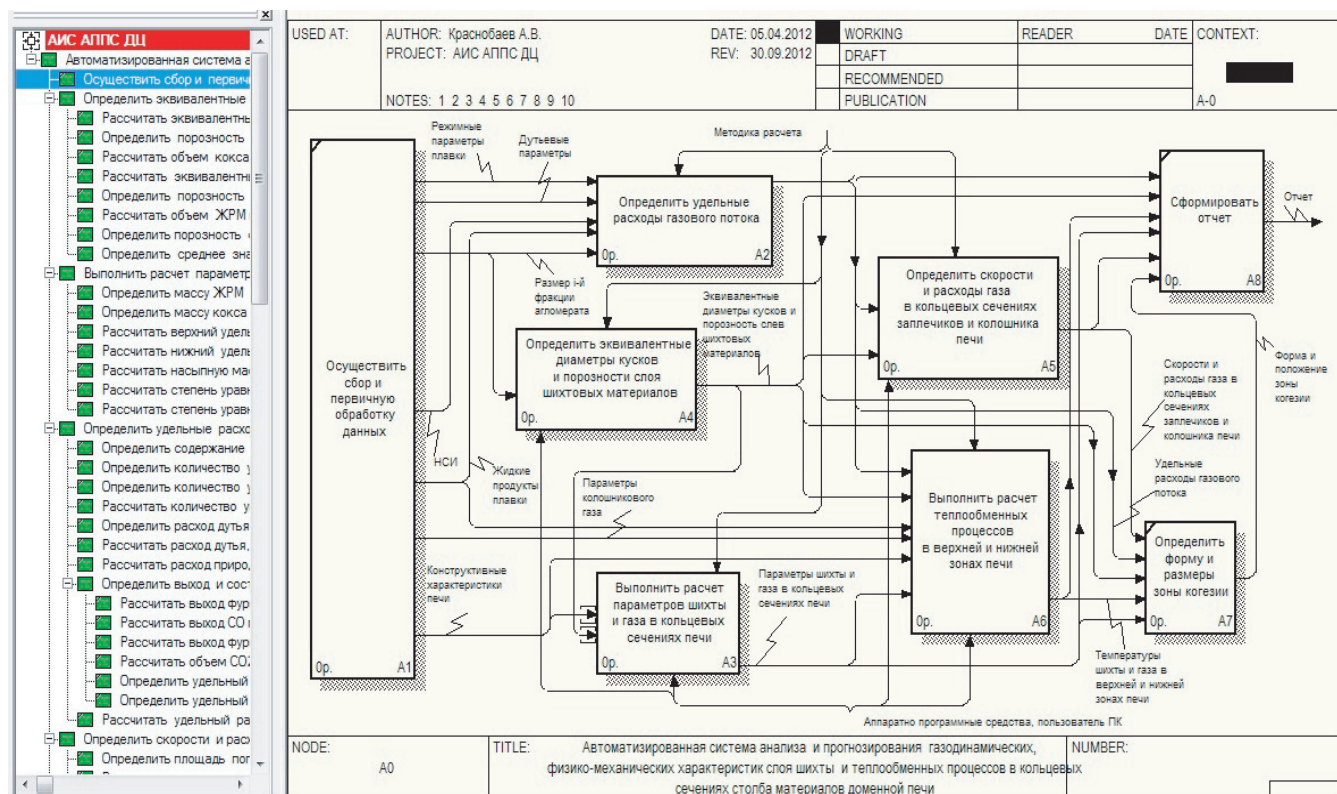


Рис. 1. Фрагмент функциональной модели подсистемы моделирования зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов

– «*Определить эквивалентные диаметры кусков и порозности слоя шихтовых материалов*» (блок А2) обеспечивает расчет эквивалентных диаметров кусков кокса и агломерата, порозности слоев кокса, агломерата и окатышей;

– «*Выполнить расчет параметров шихты и газа в кольцевых сечениях печи*» (блок А3) обеспечивает расчет массы кокса и железорудных материалов (ЖРМ) в 1 м<sup>3</sup> шихты в кольцевых сечениях; насыпной массы шихты, ЖРМ и степени уравнивания шихты в каждом кольцевом сечении в верхней и нижней зонах печи; нижний и верхний удельные перепады давления газа;

– «*Определить удельные расходы газового потока*» (блок А4) обеспечивает расчет следующих показателей: содержание «нелетучего» углерода в коксе; количество углерода кокса, пришедшего в печь; количество углерода кокса на восстановление оксидов железа и примесей чугуна прямым путем; количество углерода кокса, сгорающего у фурм; расход природного газа в расчете на 1 кг углерода кокса, сгорающего у фурм; расход дутья, необходимый для сжигания 1 кг кокса у фурм; расход дутья, необходимый для конверсии 1 м<sup>3</sup> природного газа; удельный расход дутья; выход фурменного (горнового) газа от сжигания 1 кг углерода кокса у воздушных фурм; выход фурменного (горнового) газа при конверсии 1 м<sup>3</sup> природного газа у воздушных фурм; удельный выход фурменного газа; выход СО при прямом восстановлении железа и примесей чугуна; объем СО<sub>2</sub>, получающийся при разложении известняка; удельный выход колошникового газа;

– «*Определить скорости и расходы газа в кольцевых сечениях заплечиков и колошника печи*» (блок А5) обеспечивает расчет таких показателей, как объем кокса и ЖРМ в кольцевых сечениях; порозность слоя шихты в каждом кольцевом сечении зоны когезии и зоны фильтрации расплавов; скорость газа в расчетном сечении заплечиков; объемный расход газа в кольцевых сечениях заплечиков; объемный расход газа, проходящий через расчетные кольцевые сечения на колошнике; удельный выход фурменного газа; средняя скорость фильтрации газа в заплечиках;

– «*Выполнить расчет теплообменных процессов в верхней и нижней зонах печи*» (блок А6) обеспечивает расчет отношения теплоемкостей потоков шихты и газа, их соотношение и распределение температур шихты и газа в верхней и нижней ступенях теплообмена;

– «*Определить форму и размеры зоны когезии*» (блок А7) обеспечивает расчет геометрических параметров и графическое отображение зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи.

Создание алгоритмического обеспечения, спецификаций расчетных блоков произведено на основе диаграмм потоков данных (Data Flow Diagram, DFD), адаптированных для отображения математических зависимостей (расчетных блоков) [17]. Нотация метода

DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных. Главная цель использования нотации DFD – продемонстрировать, как каждый процесс преобразует свои входные данные в выходные, а также выявить отношения между этими процессами.

На рис. 2 продемонстрирована архитектура программного обеспечения информационно-моделирующей системы, в которой выделены основные компоненты ее программной реализации. Центральным звеном является структура хранения данных, которая формируется на сервере базы данных информационно-вычислительного центра доменного производства (ИВЦ ДЦ). Источниками ее наполнения являются аппаратно-программное обеспечение АСУ доменного цеха, корпоративной информационной системы (КИС) и центральной диспетчерской комбината (ЦДК). В зависимости от требований отдельных подсистем возможно реализовать различные периоды усреднения данных в базе с помощью механизмов СУБД.

Представленная на рис. 2 архитектура обеспечивает заданную функциональность, выполнение требований предметной области, относительно простое расширение и изменение системы, возможность автономной реализации отдельных программных модулей и их независимость от структуры хранения данных.

Программа имеет модульную структуру; основным клиентским модулем является RingsFront, выполненный в виде запускаемого файла Rings.exe. Среда разработки – Microsoft Visual Studio 2010, язык программирования C# [16]. Основными компонентами расчетного модуля являются следующие программные динамически подключаемые библиотеки (dynamic-link library, dll):

– RingSolverLib.dll – математическая библиотека расчета параметров теплообменных процессов в верхней и нижней зонах печи, формы и размеров зон вязкопластичного состояния железорудных материалов;

– ForecastLib.dll – математическая библиотека расчета шлакового режима доменной плавки;

– Gazdin.dll – математическая библиотека расчета газодинамического режима доменной плавки;

– BlastFurnaceGraphics.dll – пользовательский компонент (элемент управления) для визуализации зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи.

Программное обеспечение «Расчет теплообменных процессов и параметров зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов в доменной печи» является частью системы оптимизации технологического процесса доменной плавки, выполняет расчет и отображение следующих технологических параметров, характеризующих радиальную неравномерность распределения параметров на доменных печах ОАО «ММК»:

– показателей, характеризующих прямое восстановление оксидов железа;



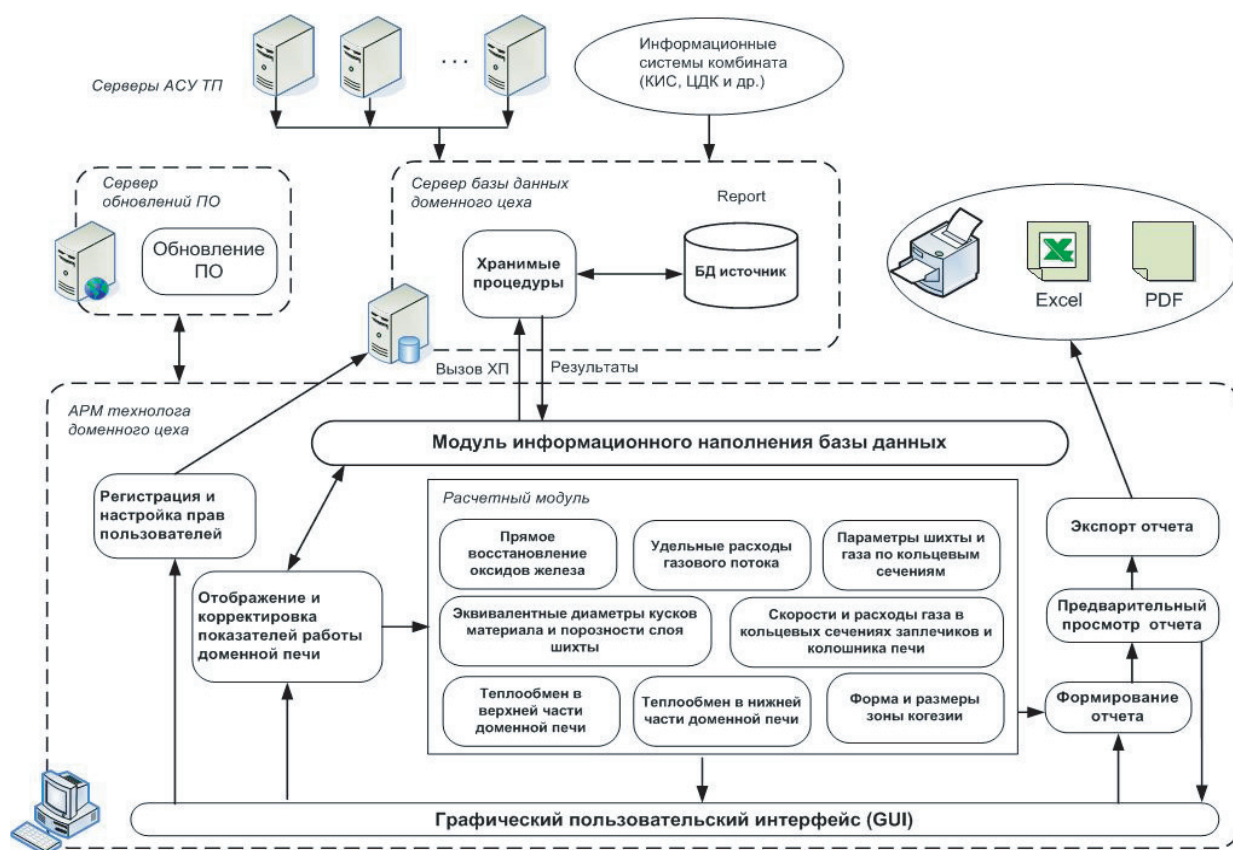


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения

- удельных расходов газового потока;
- параметров шихты и газа по кольцевым сечениям;
- эквивалентных диаметров кусков материала и порозности слоя шихты;
- скоростей и расходов газа в кольцевых сечениях заплечиков и колошника печи;
- показателей, характеризующих теплообменные процессы в верхней и нижней ступенях теплообмена доменной печи;
- формы и размеров зон вязкопластичного состояния железорудных материалов.

Программное обеспечение предназначено для инженерно-технологического персонала, входит в состав автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования доменного цеха ОАО «ММК».

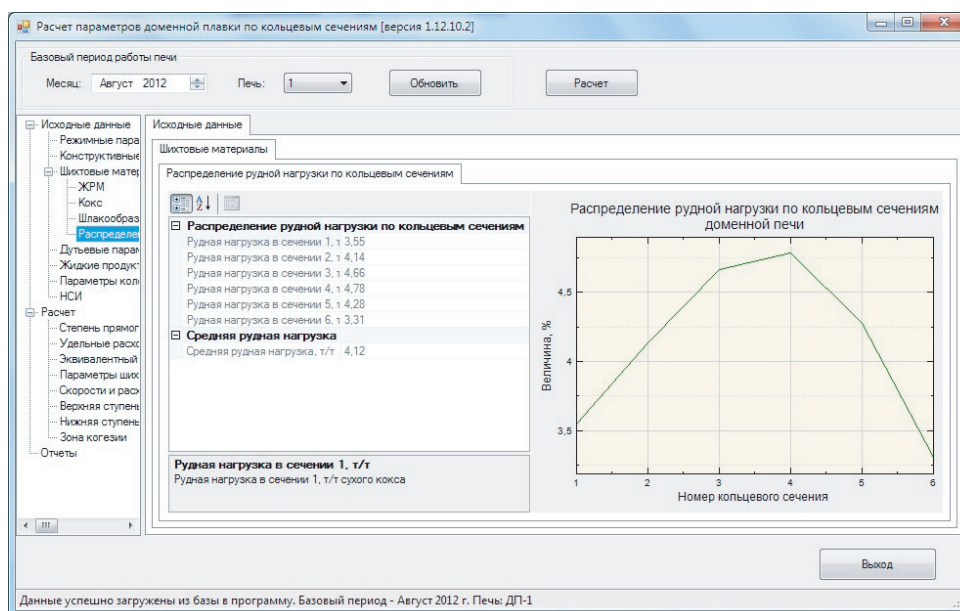
На рис. 3 представлено главное окно программы с результатами расчетного распределения рудной нагрузки по радиусу колошника и визуализацией формы и положения зоны когезии по фактическим производственным данным для ДП № 1 ОАО «ММК».

**Выводы.** Разработанная информационно-моделирующая система, внедренная в опытно-промышленную эксплуатацию доменного производства ОАО «ММК», позволяет инженерно-технологическому персоналу оценивать расположение и форму зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи по реально доступной информации о работающей печи,

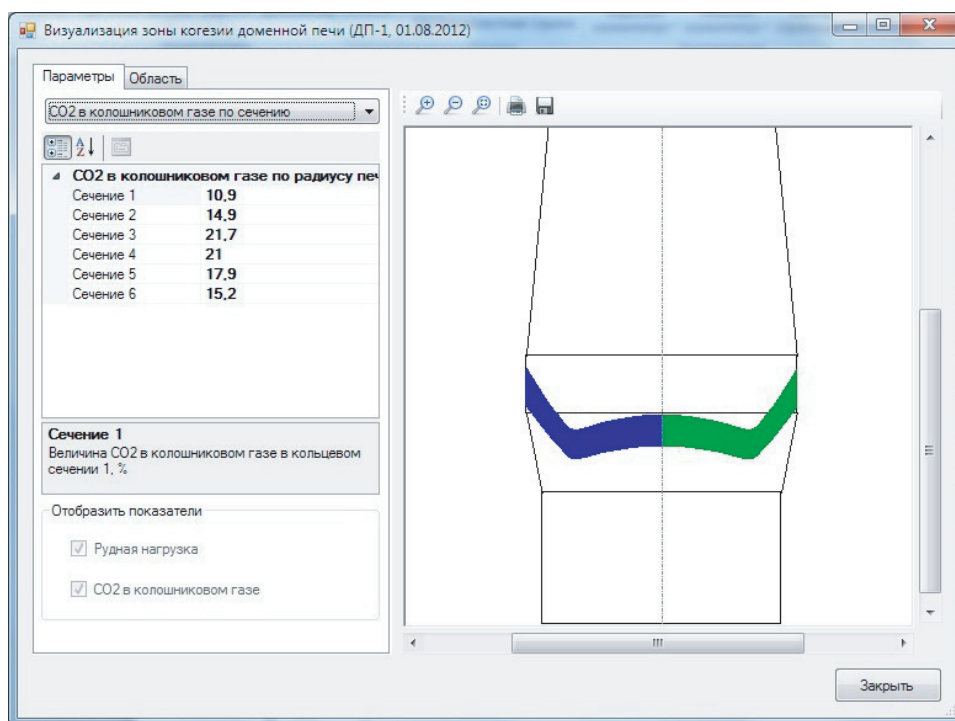
осуществлять диагностику ее рациональной конфигурации, а также решать комплекс прогнозных задач при изменении режимных параметров плавки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
2. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев и др. Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
3. Ю с ф и н Ю.С. Металлургия чугуна: – М.: ИКЦ «Академкин-га», 2004. – 774 с.
4. Blast furnace Phenomena and modelling / Ed. By Yasuo Omori. Elsevier applied science. – London and New York, 1987. – 631 p.
5. И на да С., Ка ба я си И., И са б э М. // Тэцу то хаганэ. 1984. Т. 34, № 4. С. 59 – 64.
6. Ха т и г а С. О н о Р., Фу с э К. и др. // Тэцу то хаганэ. 1986. Т. 36, № 3. С. 77 – 80.
7. Vecchida G., Giuli M. // Revue de Metallurgie – CIT. 1984. V. 81. № 5. P. 369 – 383.
8. Peters K.H., Alpeter W., Bachhofen H.Y. e.a. // Stahl und Eisen. 1984. Bd. 104. № 14. С. 59 – 62.
9. Yamamoto T., Shokyu T., Kanoshima H. e.a. // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1982. № 10. P. 774.
10. Ohno Y., Kondo K., Fukushima T. // Revue de Metallurgie. CIT. 1983. № 10. P. 809 – 825.
11. Kyle I. // Proceeding Conference, September 11–13. 1979. – London, 1980. P. 403 – 415.



а



б

Рис. 3. Скриншоты программного обеспечения информационно-моделирующей системы расчета теплообменных процессов и зоны когезии ДП № 1 ОАО «ММК»:

а – главное окно программы с отображением исходных данных; б – окно с результатами визуализации зоны когезии

12. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е. Аналитические исследования доменной плавки. – Днепропетровск: ЧМП «Экономика», 2011. – 206 с.
13. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – Кемерово; М.: Издат. объединение «Российские университеты»: Кузбассвузиздат – АСТШ, 2008. – 487 с.
14. Одинцов И.О. Профессиональное программирование. Системный подход. 2-е изд. перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
15. Дубейковский В.И. Эффективное моделирование с СА ERwin Process Modeler (BPwin; AllFusion Process Modeler) – М.: Диалог-МИФИ, 2009. – 384 с.
16. Троелсен Э. Язык программирования C# 2010 и платформа .NET 4.0. Совершите увлекательное путешествие по вселенной .NET / – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 1392 с.

© 2013 г. В.В. Лавров, Н.А. Спиринов,  
А.А. Буркин, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко,  
А.В. Краснобаев, В.Ю. Рыболовлев  
Поступила 22 января 2013 г.