



Оригинальная статья

УДК 669.184:004.942

DOI 10.17073/0368-0797-2022-5-354-364

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2310>



РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ВЕРХНЕЙ КОНВЕРТЕРНОЙ ФУРМЫ

О. А. Жульковский, С. П. Пантейков, И. И. Жульковская

Днепропетровский государственный технический университет (Украина, 51918, Каменское, Днепропетровская область, ул. Днепропетровская, 2)

Аннотация. С целью выполнения актуальной и экономически обоснованной задачи определения соответствия входных технологических параметров определенным критериям безопасности ведения конвертерной плавки на основе математического моделирования и объектно-ориентированного программирования разработана компьютерная информационно-моделирующая система прогнозирования (ИМСП) теплового режима ствола верхней фурмы (СВФ) кислородного конвертера. Программа создана в виде Windows-ориентированного приложения путем уточнения ранее разработанной математической модели температурного режима ствола верхней конвертерной фурмы с использованием объектно-ориентированного языка программирования C# в IDE Microsoft Visual Studio 2019. Математическая модель предусматривает решение дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах (двумерная постановка) с заданием начальных (распределение температур в расчетной области) и граничных условий II и III рода (соответственно на наружной и внутренней поверхности СВФ). Конечно-разностную аппроксимацию уравнения теплопроводности и граничных условий получали интегро-интерполяционным методом (методом баланса). Для расчета температурного поля использовался численный метод прогонки (модифицированный метод Гаусса) и безусловно устойчивая неявная схема. Теплофизические величины получали аппроксимацией соответствующих табличных значений. Приложение не выдвигает особых требований к компьютерной инфраструктуре, функционирует локально (без необходимости доступа к Internet), не требует специальных навыков для работы с ним, имея интуитивный пользовательский интерфейс: рабочее поле программы состоит из трех окон (разделов), в которых отображаются результаты расчета теплового режима СВФ. Разработанная ИМСП позволяет оценивать конструктивные и технологические параметры работы верхнего дутьевого устройства в качестве критерия его безопасной эксплуатации. Ее применение в режиме «советчика» создает условия для оптимального проектирования верхних кислородных фурм с рациональной системой водяного охлаждения. Целью является обеспечение надлежащего теплового режима СВФ на протяжении всего времени эксплуатации, а также безаварийной работы продувочного устройства, что особенно актуально для условий конвертерных цехов Украины, оборудованных устаревшими конструкциями верхних фурм с низкой стойкостью.

Ключевые слова: система прогнозирования, математическая модель, конвертирование, верхняя фурма, кислородный конвертер, язык программирования, процесс теплообмена, компьютерная программа

Для цитирования: Жульковский О.А., Пантейков С.П., Жульковская И.И. Разработка информационно-моделирующей системы прогнозирования теплового режима верхней конвертерной фурмы // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 5. С. 354–364.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-354-364>

Original article

INFORMATION-MODELING FORECASTING SYSTEM FOR THERMAL MODE OF TOP CONVERTER LANCE

O. A. Zhul'kovskii, S. P. Panteikov, I. I. Zhul'kovskaya

■ Dniprovsky State Technical University (2 Dneprostroevskaya Str., Kamenskoe, Dnipropetrovsk Region 51918, Ukraine)

Abstract. On basis of mathematical modeling and object-oriented programming, a computer information-modeling forecasting system (IMFS) for thermal mode of top lance barrel (TLB) of oxygen converter was developed in order to fulfill the urgent and economically feasible task of determining the compliance of input technological parameters with certain safety criteria for conducting converter melting. The program was created in the form of a Windows-oriented application by refining the previously developed mathematical model of the temperature mode of the top converter lance barrel using the object-oriented programming language C# in Microsoft Visual Studio 2019 IDE. The mathematical model provides the solution of differential heat conduction equation in cylindrical coordinates (two-dimensional formulation) with assignment of the initial (temperature distribution in the computational domain) and boundary conditions of the II and III kind (respectively, on the outer and inner surfaces of the TLB). The finite-

difference approximation of the heat conduction equation and boundary conditions was obtained by the integro-interpolation method (balance method). A numerical sweep method (modified Gauss method) and an unconditionally stable implicit scheme were used to calculate the temperature field. Thermophysical values were obtained by approximating the corresponding tabular values. The application does not put forward special requirements for the computer infrastructure, operates locally (without the need for access to Internet), does not require special skills to work with it, having an intuitive user interface: the working area of the program consists of three windows (sections), in which the results of calculating the thermal mode of the TLB are displayed. The developed IMFS allows evaluating the design and technological parameters of the top blowing device as a criterion for its safe operation. Its application in the “advisor” mode ensures the optimal design of the top oxygen lances with a rational water cooling system in order to ensure the proper thermal mode of the TLB throughout the entire operation period, as well as trouble-free operation of the blowing device, which is especially important for the conditions of converter shops in Ukraine equipped with outdated designs of top lances with low service life.

Keywords: forecasting system, mathematical model, conversion, top lance, oxygen converter, programming language, heat exchange process, computer program

For citation: Zhul'kovskii O.A., Panteikov S.P., Zhul'kovskaya I.I. Information-modeling forecasting system for thermal mode of top converter lance. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 5, pp. 354–364. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-354-364>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эффективное и безаварийное проведение конвертерной плавки осуществляется благодаря непрерывному контролю над технологическим процессом и его корректировке, что возможно только при наличии непрерывной или дискретной информации о параметрах сталеплавильной ванны и, в первую очередь, о содержании углерода и температуре металла. Знание этих параметров позволяет вносить необходимые коррективы по ходу плавки и, тем самым, получать высокую точность конечных результатов конвертерного передела.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ

КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Известные литературные источники свидетельствуют об отсутствии информации о едином программном обеспечении (ПО) систем по управлению конвертерной плавкой, хотя ПО для отдельных подсистем процесса внедряется довольно часто.

Так, на конвертерах № 1 – 3 ОАО «Северсталь» (Россия) введены в эксплуатацию измерительные зонды, осуществляющие многократные замеры температуры, окисленности, содержания углерода, уровня ванны и отбор проб металла во время продувки без повалки конвертера. В качестве SCADA-пакета для разработки ПО данной системы выбрано InTouch v.7.1 (Wonderware). Система управляется через главное рабочее окно, при этом в дополнительном рабочем окне предусмотрена возможность оперативного отслеживания заданных технологических параметров плавки [1].

Для сталеплавильных агрегатов № 1, 3 конвертерного цеха ОАО «ММК им. Ильича» (Украина) разработана и внедрена в производство система управления электроприводами конвертера с удобным пользовательским интерфейсом оператора [2]. С целью отображения информации о состоянии системы управления приводами в помещении машинного зала предусмотрено автоматизированное рабочее место (АРМ), оборудованное SCADA-системой Monitor Pro, а также системой регистрации быстрых процессов OSC.

Разработанная система [2] позволяет архивировать информацию о состоянии электроприводов с возможностью последующего ее просмотра. Для оповещения оператора конвертера о нештатных ситуациях, а также для выдачи информации о текущих значениях параметров приводов, углах поворота конвертера и местах нахождения фурм на главном пульте управления (ГПУ) предусмотрен графический терминал (панель оператора Magelis). Связь между контроллерным комплексом системы управления и терминалами электрика и оператора обеспечивается отказоустойчивой промышленной сетью RS-485 по протоколу Modbus+.

В условиях конвертерного цеха ПАО «Енакиевский металлургический завод» (Украина) на агрегате № 2 введена в эксплуатацию АСУТП «мокрой» газоочистки реконструированного газоотводящего тракта, оборудованная АРМ оператора с соответствующим ПО. Система разработана на базе Simatic WinCC v.7.0 SP2 с человеко-машинным интерфейсом, позволяющим наблюдать весь путь отходящих газов до свечи дожигания на дымовой трубе. Оператор имеет возможность при необходимости осуществлять мониторинг и управление технологическим процессом с помощью мнемосхем, представленных на соответствующей системе АРМ [3].

Дефицит на рынке подобного ПО объясняется как сложностью такого рода разработок из-за нестационарности технологического процесса плавки и нестабильности шихтовки конвертеров даже в условиях одного цеха, так и фактором коммерческой тайны.

Серьезную опасность в конвертерном производстве представляют выбросы металла и шлака, связанные с увеличением доли легковесного лома в шихте конвертеров, а также в результате неточного и, зачастую, неумелого управления процессом. Они являются одной из наиболее типичных экстремальных ситуаций при продувке, представляют опасность для персонала цеха, приводят к потерям металла и проведению дополнительных работ по устранению последствий аварии. Очевидна потребность в эффективных методах прогноза выбросов, которые до настоящего времени практически не разработаны.

Существует множество способов прогнозирования и управления режимом продувки с целью предотвращения

ния выбросов, основанных на акустическом контроле процесса, контроле вибрации верхней фурмы и состава отходящих газов, определении вязкости шлака, измерении электрического потенциала на фурме и определении некоторых других параметров плавки. Однако данные методы не нашли широкого применения ввиду их недостаточной надежности, обусловленной, в частности, использованием малого количества информации о процессе.

Зачастую более точно спрогнозировать возможный выброс способен сам оператор конвертерной установки (оператор-дистрибуторщик), используя для этого не только объективную, но и субъективную информацию о процессе, поступающую непосредственно с конвертера и не имеющую отображения на приборах. В связи с тем, что не существует специальных методов обучения дистрибуторщиков управлению продувкой и прогнозированию выбросов, а также других возможных аварийных ситуаций, эффективность деятельности каждого конкретного оператора резко отличается друг от друга в результате их различной квалификации и часто определяется опытом и человеческим фактором.

Исходя из сказанного, в данном направлении ведется работа по созданию специальных тренажерных систем для обучения и повышения квалификации операторов конвертерных установок с целью получения ими устойчивых практических навыков управления плавкой.

Так, известны тренажерные комплексы типа «Сталевар» и «Конвертерщик» [4], «Кислородно-конвертерный процесс» [5], «Sike: Выплавка стали в конвертере» [6] и др. Их основными задачами являются:

- формирование умения и навыков управления плавкой на основе теоретических знаний при различных технологических режимах процесса и их совершенствование с помощью машинного эксперимента (имитации процесса на моделях-имитаторах, входящих в состав тренажера);

- анализ плавов с нарушениями технологии и с отклонениями от оптимальных режимов и т. п.

Это позволило значительно повысить уровень квалификации операторов-дистрибуторщиков и работать у них способность принятия оперативных и правильных решений по недопущению аварийных ситуаций в цехе.

Кроме программ-тренажеров, известны также ПО и другие разработки, используемые в режиме «советчика». Таковыми являются, например, программный комплекс [7] и математические модели [8], на базе которых можно реализовать общее управление конвертерной плавкой.

Также известна математическая модель [9], основной задачей которой является прогнозирование текущего содержания углерода в ванне в процессе конвертерной плавки при различных начальных условиях. Использование данной модели в конкретном техноло-

гическом процессе в режиме «советчика сталевара» позволяет повысить качество выплавляемой стали и технико-экономические показатели конвертерного цеха в целом.

Кроме того, ведутся работы [10 – 35] по созданию различных компьютерных моделей для прогнозирования определенных параметров конвертерной плавки.

Так, разработано ПО [10], реализующее метод расчета параметров выплавки стали в кислородном конвертере с верхней подачей дутья, позволяющее прогнозировать параметры плавки при изменении ее начальных и конечных условий, а также определять значение неконтролируемых воздействий на процесс в структурированной области базы данных. Разработаны динамические математические модели, дающие возможность осуществлять такое прогнозирование [11, 12].

Для прогнозирования технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием сидерита разработана математическая модель с использованием электронных таблиц Microsoft Excel [13], позволяющая определять как контролируемые (расходы чугуна, лома, извести, доломита, кислорода и других материалов, составы металла и шлака и др.), так и неконтролируемые параметры процесса (степень окисления углерода и дожигания CO до CO₂, потери железа и теплоты и др.).

Установление прогнозных значений распределенной твердости стали стало возможным благодаря разработанной модели [14] определения зависимости твердости стали от ее химического состава в процессах выплавки стали.

Известно также множество математических моделей, позволяющих прогнозировать:

- температуру конвертерной стали в конце продувки [15, 16] и чугуна на выпуске из доменной печи [17];
- температуру и содержание углерода в металле по окончании продувки [18 – 20];
- состав расплава в конвертере по ходу продувки [21];
- содержание химических элементов в готовой стали [22];
- температуру и состав шлаковой и металлической фаз во время продувки [23, 24];
- изменение состава шлака и металла в ходе процесса [25];
- поведение фосфора в ходе продувки [26];
- химизм протекающих процессов [27];
- степень дожигания отходящего газа [28] и его состав [29];
- скорость газовых потоков [30];
- гидро- и газодинамику продуваемой конвертерной ванны [31] и ее обезуглероживание [32];
- расплавление твердых шихтовых материалов (лома) в конвертере [33, 34];
- эффективность разбрызгивания шлака в зависимости от его вязкости [35] и др.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Безопасность современного сталеплавильного производства во многом определяется техническим ресурсом применяемых тепловых агрегатов. Для надлежащей работы этих агрегатов необходим непрерывный контроль состояния их рабочих частей, механизмов и устройств: футеровки, дутьевых фурм (верхних, донных и др.), других частей, вспомогательных устройств и механизмов. Также требуется своевременное осуществление ремонтных и восстановительных работ по обеспечению длительной и безаварийной эксплуатации тепловых агрегатов в целом [36 – 40].

В этом направлении заслуживает особого внимания разработанная АСУТП для анализа состояния огнеупорной футеровки и решения задачи ресурсосберегающего управления сталеплавильным процессом при минимизации расхода огнеупоров рабочего слоя футеровки конвертера. Это позволило путем прогнозирования повысить ресурс безаварийной работы конвертеров, а также улучшить качество продукции сталеплавильного производства по химическому составу и внутренней структуре [41].

Таким образом, разработка систем прогнозирования, позволяющих на базе численных моделей технологического процесса определять соответствие входных технологических параметров определенным критериям безопасности ведения конвертерной плавки, является актуальной и экономически обоснованной задачей.

Наличие систем прогнозирования теплового режима ствола верхней продувочной фурмы в процессе плавки в кислородном конвертере предусматривает поддержание оптимального теплового режима применяемых верхних дутьевых устройств в течение всего времени продувки расплава и последующего простоя с целью повышения их стойкости и, соответственно, срока эксплуатации, а также их безаварийной работы. Особенно это актуально для условий горно-металлургической отрасли Украины, где многие конвертерные цехи оборудованы устаревшими конструкциями верхних водоохлаждаемых фурм, которые не удовлетворяют техническим и технологическим требованиям [42] и имеют сварные фурменные головки с низкой стойкостью [43].

Кроме того, такие прогнозирующие компьютерные системы позволяют еще на стадии проектирования верхнего дутьевого устройства определить оптимальные конструктивные и технологические параметры используемых фурм (параметры зазоров для подачи охладителя, толщину и материал труб, расход и температуру воды и др.).

Аналитический обзор литературных источников показывает полное отсутствие таких прогнозирующих систем, кроме единственного исследования [44], результаты которого могут быть использованы с целью проектирования конструкции погружной фурмы для осуществления барботажа жидкой стали аргоном.

Поэтому основной задачей работы является создание компьютерной информационно-моделирующей системы прогнозирования (ИМСП) теплового режима ствола верхней фурмы (СВФ) кислородного конвертера во время ее эксплуатации на основе математического моделирования и объектно-ориентированного программирования. В качестве критерия безопасной эксплуатации дутьевого устройства оцениваются конструктивные и технологические параметры его работы. Основой для создания указанной ИМСП явилась ранее разработанная [45] и уточненная математическая модель температурного режима СВФ.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Для компьютерной модели принята традиционная технологическая схема эксплуатации верхней дутьевой фурмы кислородного конвертера, когда определенную часть времени продувочное устройство находится в полости агрегата для осуществления продувки расплава, а в межплавочный период и для технологических нужд, извлекается из конвертера. На протяжении всего цикла эксплуатации фурма охлаждается водой.

Схема устройства, а также принятая в задаче система координат представлены на рис. 1. Как видно, СВФ рас-

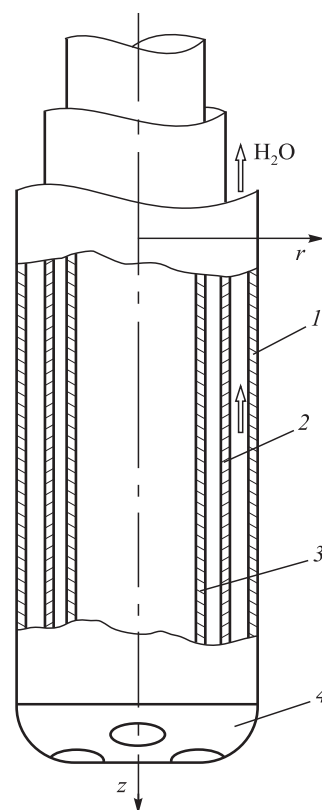


Рис. 1. Схема верхней фурмы и выбранная система координат:

1 – наружная труба; 2 – разделительная труба;
3 – внутренняя труба; 4 – наконечник (головка)

Fig. 1. Schematic of the top lance and the selected coordinate system:

1 – outer pipe; 2 – dividing pipe; 3 – inner pipe; 4 – tip (head)

смачивается как полый прямой круговой цилиндр, ось которого совпадает с осью симметрии самого устройства, что позволяет применить цилиндрическую аппроксимацию (двумерная сетка, цилиндрические координаты) по отношению к его геометрическому описанию.

При постановке задачи сделаны следующие допущения.

Процесс плавки условно разделен на два периода: продувка (нагрев устройства) и простой (охлаждение устройства). Продолжительность каждого из указанных периодов, а также количество этих циклов определяется, в основном, технологической инструкцией.

Принято, что шлако-металлический гарнисаж (настыль) на поверхности СВФ отсутствует, и на протяжении всего процесса (продувка + простой) на наружной поверхности устройства имеет место сложный радиационно-конвективный теплообмен. На внутренней поверхности СВФ учитывается теплоотдача при турбулентном режиме течения охлаждающей воды. Верхняя и нижняя торцевые части рассматриваемого цилиндра считаются условно теплоизолированными.

Модель не предусматривает изменений геометрических параметров расчетной области, связанных с износом рабочих поверхностей, а также с процессом настылеобразования.

С учетом перечисленных выше условий и в соответствии с принятой в задаче системой координат, а также ввиду отсутствия внутренних источников теплоты, температурное поле конструкции описывается следующим дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

дополненным граничными условиями:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_t = 0; \quad (2.1)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_b = 0; \quad (2.2)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_i = \bar{\alpha}_{\text{H}_2\text{O}} (T_i - T_{\text{H}_2\text{O}}); \quad (2.3)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_e = kq_\Sigma + (1-k)\alpha_\Sigma (T_e - T_0), \quad (2.4)$$

где ρ – плотность, кг/м³; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; τ – время, с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); $\bar{\alpha}_{\text{H}_2\text{O}}$ – средний коэффициент теплоотдачи воды, Вт/(м²·К); α_Σ – суммарный коэффициент теплоотдачи наружной боковой поверхности СВФ, Вт/(м²·К); T_i – температура внутренней поверхности СВФ, К; $T_{\text{H}_2\text{O}}$ – температура воды в наружном контуре фурмы, К; T_e – температура наружной поверх-

ности СВФ, К; T_0 – начальная температура набегающего потока вдали от поверхности теплообмена (здесь – температура окружающей среды у наружной боковой поверхности СВФ), К; q_Σ – суммарная плотность теплового потока для наружной боковой поверхности СВФ во время продувки ($k = 1$) или простоя ($k = 0$), Вт/м².

Присутствующие в уравнениях (2.1) – (2.4) индексы: t (от *top* – верхняя), b (от *bottom* – нижняя), i (от *internal* – внутренняя); e (от *external* – наружная) обозначают соответствующую поверхность дутьевого устройства, участвующую в теплообмене.

Теплофизические величины в приведенных уравнениях получают в результате аппроксимации температурными функциями соответствующих табличных значений.

Начальное условие реализации данной задачи:

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Конечно-разностную аппроксимацию уравнения теплопроводности (1), а также граничных условий (2.1) – (2.4) получали [45] интегро-интерполяционным методом (методом баланса), т. е. из непосредственной аппроксимации соотношений теплового баланса, записанных для элементарных объемов. При этом для тепловых потоков на границах расчетной области использовались выражения, обеспечивающие выполнение условий согласования [46].

Поскольку в задаче для расчета температурного поля используется численный метод прогонки (модифицированный метод Гаусса) и безусловно устойчивая неявная схема [46, 47], то уравнения баланса теплоты записывались в неявном, расщепленном по направлениям виде, т. е. не для отдельных характерных ячеек или областей, а для всего элемента расщепления по пространственным переменным [46].

Описание методик расчета величин и коэффициентов, присутствующих в уравнениях (2.1) – (2.4) и в их конечно-разностной аппроксимации, а также изменения значений температуры воды в наружном контуре по длине фурмы подробно описано в работе [45]. Там же показана адекватность представленного математического описания.

Общая методика численного моделирования процессов комбинированного (радиационно-конвективного) теплообмена в технологических системах представлена в работе [48].

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Для разработки ИМСП на базе описанной математической модели использован объектно-ориентированный язык программирования C# в IDE Microsoft Visual Studio 2019 – полнофункциональной, расширяемой и бесплатной интегрированной среде разработки современных приложений [49].

Разработанное Windows-ориентированное приложение к компьютерной инфраструктуре особых требований не выдвигает, функционируя локально без необходимости доступа к Internet. Программа имеет интуитивный пользовательский интерфейс и не требует специальных навыков для работы с нейю.

Общая логическая структура разработанного ПО показана на рис. 2. Основные действия программы сосредоточены в соответствующих функциях, среди которых:

- функция расчета теплофизических свойств трубной стали, охлаждающей воды и воздуха окружающей среды;
- функция расчета коэффициентов теплоотдачи;
- функция реализации метода решения систем дифференциальных уравнений и т. д.

Программа также содержит функции графического вывода полученных результатов, управления работой компьютерной модели и др.

Сценарий работы программы прост и интуитивно понятен. Программа запускается с помощью соответствующего файла, после чего в форме главного окна программы необходимо настроить требуемые исходные данные (время процесса, наружный диаметр фурмы, температуру и расход охлаждающей воды). При этом на данном этапе разработки предусмотрена возможность выбора верхних фурм двух типоразмеров – для 160-т или для большегрузных (от 250-т и выше) конвертеров с диаметром наружной трубы соответственно 219 или 426 мм.

Пример работы программы показан на рис. 3.

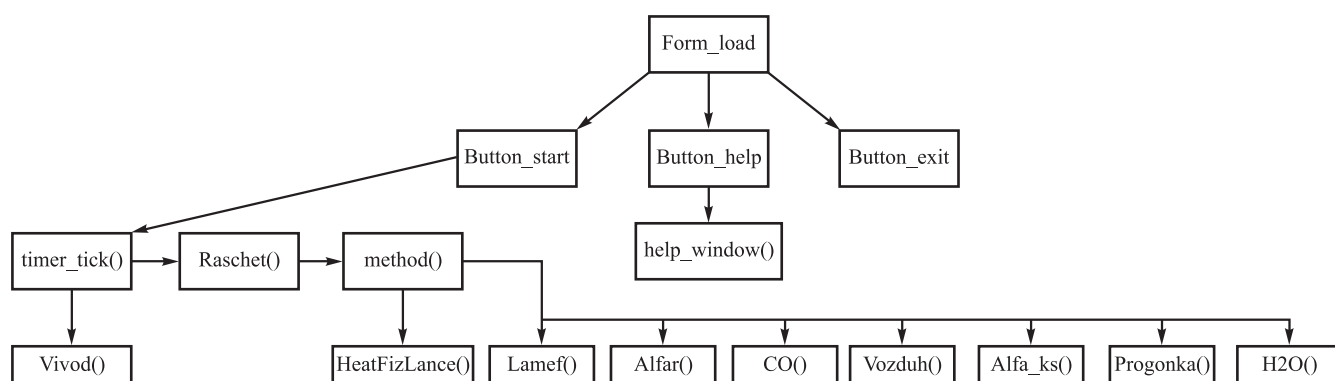


Рис. 2. Структурно-логическая схема ПО для ИМСП теплового режима СВФ

Fig. 2. Structural-logic diagram of software for IMFS of the TLB thermal mode

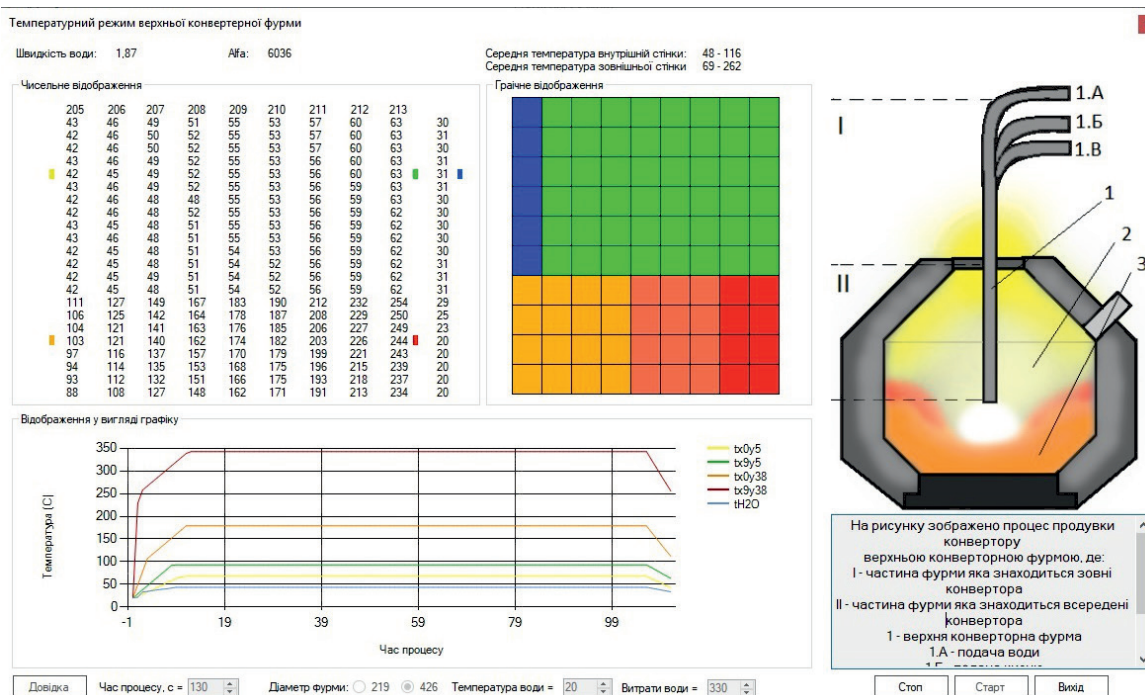


Рис. 3. Пример работы ИМСП теплового режима СВФ

Fig. 3. Example of operation of IMFS of the TLB thermal mode

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

После старта программы на экране динамически отображаются результаты расчетов в виде числовых значений, разноцветной схемы и графических зависимостей. При этом в верхней части выводятся важные сопутствующие данные (см. рис. 3).

Пункты меню «Основной расчет» и «Вывод результатов» работают синхронно с целью отражения динамики изменения температуры.

Рабочее поле программы состоит из трех окон (разделов), в которых по-разному отображаются результаты расчета теплового режима СВФ.

Первое окно отвечает за числовой вывод температуры в виде матрицы значений.

Во втором окне (справа от первого) отображаются графики изменения температуры в виде разрисованного поля, разделенного на равномерные зоны. Поле во время процесса моделирования меняет цвет в соответствии со значениями температуры: голубой цвет соответствует температуре 20 – 40 °С, зеленый – 40 – 60 °С, желтый – 60 – 80 °С, светло-оранжевый – 80 – 160 °С, светло-красный – 160 – 200 °С, красный – 200 – 250 °С и насыщенно-красный – свыше 250 °С.

Таким образом, в данных окнах программы отображается динамика распределения температуры в продольном сечении СВФ во время ее эксплуатации, т. е. тепловой режим дутьевого устройства.

В третьем окне программы (под первым и вторым окнами) можно отслеживать динамику изменения средней температуры исследуемых участков СВФ и охлаждающей воды в ходе продувки расплава и в процессе простоя агрегата с помощью пяти разноцветных графиков в координатах «время – температура». Для удобства пользователя, наглядности и понятности отображений

отметки таких же цветов присутствуют и в первом окне программы. Данные графики остаются отображенными в своем поле вплоть до нажатия кнопки выхода или начала нового расчета.

Программа моделирует три основные фазы: нагрев, стабилизацию процесса теплообмена и охлаждение СВФ, что наглядно отображается в соответствующем окне с графиками.

Для просмотра и анализа получаемых в процессе моделирования результатов предусмотрена приостановка работы программы.

По завершению численного исследования и выходу из программы полученные результаты в числовом виде сохраняются в соответствующих автоматически создаваемых файлах для дальнейшего анализа и обработки.

Выводы

На основе математического моделирования и объектно-ориентированного программирования разработана компьютерная информационно-моделирующая система прогнозирования теплового режима ствола верхней фурмы кислородного конвертера.

Разработанная ИМСП позволяет оценивать конструктивные и технологические параметры работы верхнего дутьевого устройства в качестве критерия его безопасной эксплуатации. Ее применение в режиме «советчика» обеспечивает оптимальное проектирование верхних кислородных фурм с рациональной системой водяного охлаждения с целью обеспечения надлежащего теплового режима СВФ на протяжении всего времени эксплуатации, а также безаварийной работы продувочного устройства, что особенно актуально для условий конвертерных цехов Украины, оборудованных устаревшими конструкциями верхних фурм с низкой стойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Максимов П. Измерительный зонд для автоматического определения параметров плавки в конвертере // Современные технологии автоматизации. 2007. № 4. С. 36–39.
2. Сайт отдела ОП-06 ЧАО «Тяжпромавтоматика». АСУ электроприводами конвертера. URL: <https://chao-tyazhpromavtomatika.uaprom.net/a94154-asu-elektroprivodami-konvertera.html> (дата обращения: 08.10.2021).
3. Кривонос А., Криволапов А., Каплун Ю., Пироженко А., Гурылев Е. АСУ ТП газоотводящего тракта конвертера // Современные технологии автоматизации. 2013. № 4. С. 42–46.
4. Модели-имитаторы в тренажерно-обучающих системах. URL: <https://bookaa.ru/matematicheskoe-modelirovanie/modeli-imitatory-v-trenazherno-obuchayu.html> (дата обращения: 08.10.2021).
5. Компьютерный тренажер «Sike. Выплавка стали в конвертере». URL: <https://publishernews.ru/PressRelease/PressReleaseShow.asp?id=528210> (дата обращения: 08.10.2021).
6. METAL SPASE. Компьютерные симуляторы и тренажеры. Программные комплексы. URL: <https://metalspace.ru/education-career/education/simulator/512-trenazhernyj-kompleks-kislorodno-konverternyj-protsess.html> (дата обращения: 08.10.2021).
7. Литвиненко Е.Ф., Симкин А.И., Сокол С.П. Эксплуатация системы управления конверторной плавкой в информационно-со-

1. Maksimov P. Measuring probe for automatic determination of melting parameters in converter. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*. 2007, no. 4, pp. 36–39. (In Russ.).
2. Website of the OP-06 department of the PJSC “Tyazhpromavtomatika”. ACS for converter electric drives. Available at URL: <https://chao-tyazhpromavtomatika.uaprom.net/a94154-asu-elektroprivodami-konvertera.html> (Accessed 10.08.2021). (In Russ.).
3. Krivonosov A., Krivolapov A., Kaplunov Yu., Pirozhenko A., Gurylev E. CPCS of converter gas outlet. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*. 2013, no. 4, pp. 42–46. (In Russ.).
4. Simulation models in training and training systems. Available at URL: <https://bookaa.ru/matematicheskoe-modelirovanie/modeli-imitatory-v-trenazherno-obuchayu.html> (Accessed 10.08.2021). (In Russ.).
5. Computer simulator “Sike. Steel smelting in a converter”. Available at URL: <https://publishernews.ru/PressRelease/PressReleaseShow.asp?id=528210> (Accessed 10.08.2021). (In Russ.).
6. METAL SPASE. Computer simulators and trainers. Software complexes. Available at URL: <https://metalspace.ru/education-career/education/simulator/512-trenazhernyj-kompleks-kislorodno-konverternyj-protsess.html> (Accessed 10.08.2021). (In Russ.).
7. Litvinenko E.F., Simkin A.I., Sokol S.P. Operation of converter smelting control system in information-advising mode. In: *Auto-*

- тующем режиме // Автоматизация и компьютерные технологии. Тезисы докладов участников Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры автоматизации технологических процессов и производств, 25 – 27 сентября 2012 г., Мариуполь. Мариуполь: Издательство ГВУЗ «ПГТУ», 2012. С. 34.
8. Cao L., Wang Ya., Liu Q., Feng X. Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 4. P. 573–584.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-680>
9. Морозов А.А., Шелухин С.А., Храпко С.А. Математическая модель продувки металла кислородом в конвертере // Азов-сталь-98: Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов 29 мая 1998 г., Мариуполь. Мариуполь, 1998. С. 23–24.
10. Колесников Ю.А., Бигеев В.А., Сергеев Д.С. Моделирование выплавки стали в кислородном конвертере на базе физико-химических и тепловых процессов // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 698–705.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-698-705>
11. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation // *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 4. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
12. Dering D., Swartz C., Dogan N. A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation // *Chemical Engineering Science*. 2021. Vol. 241. Article 116653.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>
13. Кабулова Е.Г., Косарева И.Н., Карпова В.А., Гриднева Г. Моделирование процесса выплавки стали в металлургическом производстве // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Актуальные проблемы управления и финансово-хозяйственной деятельности предприятия. Харьков: Издательство НТУ «ХПИ», 2015. № 53(1162). С. 14–18.
14. Бигеев В.А., Колесников Ю.А. Прогнозирование технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием сидерита // Теория и технология металлургического производства: Сборник научных трудов / Под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Издательство МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. Вып. 11. С. 30–36.
15. Feng K., Yang L., Su B., Feng W., Wang L. An integration model for converter molten steel end temperature prediction based on Bayesian formula // *Steel Research International*. 2022. Vol. 93. No. 2. Article 2100433. <https://doi.org/10.1002/srin.202100433>
16. Ruuska J. Special measurements and control models for a basic oxygen furnace (BOF): Academic dissertation. Oulu, Finland, 2012. 113 p. URL: <http://cc.oulu.fi/~kamahei/y/casr/vk/ruuska.pdf> (дата обращения: 08.10.2021).
17. Díaz J., Fernández F.J., Suárez I. Hot metal temperature prediction at basic-lined oxygen furnace (BOF) converter using IR thermometry and forecasting techniques // *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 17. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/en12173235>
18. Dogan N. Mathematical Modelling of Oxygen Steelmaking: a Thesis Presented for the Degree of Doctor of Philosophy Mathematics Discipline Faculty of Engineering and Industrial Sciences Swinburne University of Technology: Melbourne, Australia, 2011. 276 p. URL: <https://researchbank.swinburne.edu.au/file/89911698-08da-4f42-8caa-363b0a1bc6fc/1/Neslihan%20Dogan%20Thesis.pdf> (дата обращения: 08.10.2021).
19. Gao C., Shen M., Liu X., Wang L., Chu M. End-point static control of basic oxygen furnace (BOF) steelmaking based on wavelet transform weighted twin support vector regression // *Complexity*. 2019. Vol. 2019. Article 7408725. <https://doi.org/10.1155/2019/7408725>
20. Hofinger S., Hubmer R., Schütt S. Steel expert takes command – optimized performance on BOF converter // Technical contribution to the *Information and Computer Technologies. Abstracts of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 50th Anniversary of the Chair of Automation of Technological Processes and Production, September 25–27, 2012, Mariupol*. Mariupol: PSTU, 2012, p. 34. (In Russ.).
8. Cao L., Wang Ya., Liu Q., Feng X. Physical and mathematical modeling of multiphase flows in a converter. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no. 4, pp. 573–584.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-680>
9. Morozov A.A., Shelukhin S.A., Khrapko S.A. Mathematical model of metal blowing with oxygen in a converter. In: «Azovstal-98»: *Abstracts of the Sci. and Tech. Conf. of Young Specialists, May 29, 1998, Mariupol*. Mariupol, 1998, pp. 23–24. (In Russ.).
10. Kolesnikov Yu.A., Bigeev V.A., Sergeev D.S. Modeling of steel-making in BOF based on physical, chemical and thermal processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 9, pp. 698–705. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-698-705>
11. Dering D., Swartz C., Dogan N. Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*. 2020, vol. 8, no. 4, pp. 1–23. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
12. Dering D., Swartz C., Dogan N. A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation. *Chemical Engineering Science*. 2021, vol. 241, article 116653.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>
13. Kabulova E.G., Kosareva I.N., Karpova V.A., Gridneva G. Modeling of steel smelting in metallurgical production. *Vestnik Nat. Tech. University “KhPI”: Transactions. Actual Problems of Management and Financial – Economic Activities of an Enterprise*. Kharkiv: NTU KhPI, 2015, no. 53 (1162), pp. 14–18. (In Russ.).
14. Bigeev V.A., Kolesnikov Yu.A. Prediction of technological parameters of steel smelting in a converter using siderite. In: *Theory and Technology of Metallurgical Production. Transactions. Issue 11*. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: G.I. Nosov MSTU, 2011, pp. 30–36. (In Russ.).
15. Feng K., Yang L., Su B., Feng W., Wang L. An integration model for converter molten steel end temperature prediction based on Bayesian formula. *Steel Research International*. 2022, vol. 93, no. 2, article 2100433. <https://doi.org/10.1002/srin.202100433>
16. Ruuska J. *Special measurements and control models for a basic oxygen furnace (BOF): Academic dissertation*. Oulu, Finland, 2012, 113 p. Available at URL: <http://cc.oulu.fi/~kamahei/y/casr/vk/ruuska.pdf> (Accessed 10.08.2021).
17. Díaz J., Fernández F.J., Suárez I. Hot metal temperature prediction at basic-lined oxygen furnace (BOF) converter using IR thermometry and forecasting techniques. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 17, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/en12173235>
18. Dogan N. *Mathematical Modelling of Oxygen Steelmaking: a Thesis Presented for the Degree of Doctor of Philosophy Mathematics Discipline Faculty of Engineering and Industrial Sciences Swinburne University of Technology*. Melbourne, Australia, 2011, 276 p. Available at URL: <https://researchbank.swinburne.edu.au/file/89911698-08da-4f42-8caa-363b0a1bc6fc/1/Neslihan%20Dogan%20Thesis.pdf> (Accessed 10.08.2021).
19. Gao C., Shen M., Liu X., Wang L., Chu M. End-point static control of basic oxygen furnace (BOF) steelmaking based on wavelet transform weighted twin support vector regression. *Complexity*. 2019, vol. 2019, article 7408725. <https://doi.org/10.1155/2019/7408725>
20. Hofinger S., Hubmer R., Schütt S. Steel Expert takes command – optimized performance on BOF converter. In: *Technical contribution to the*

- 16th Automation and Industrial IT Seminar, September 18 – 21, 2012, Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, 2012. P. 408–420. <http://doi.org/10.5151/2594-5335-22654>
21. Kumari V. Mathematical modelling of basic oxygen steel making process: a Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Technology in Mechanical Engineering (Steel Technology). Rourkela, May 2015. 75 p. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/80148601.pdf> (дата обращения: 01.05.2022).
22. Gherfi S.K., Bendjama H., Bouhouche S., Meradi H. Neural model identification of metallurgical process in oxygen converter // Proceedings of the 12th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection (SGEM 2012), June 17 – 23, 2012, Albena, Bulgaria. Albena, 2012. Vol. 1. P. 683–690. URL: <http://toc.proceedings.com/19962webtoc.pdf> (дата обращения: 01.05.2022).
23. Kruskopf A. Multiphysical Modeling Approach for Basic Oxygen Steelmaking Process: a doctoral dissertation: Helsinki, Finland, 2018. 92 p. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/29573/isbn9789526077956.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (дата обращения: 08.10.2021).
24. Jo H., Hwang H.J., Phan D., Lee Yu., Jang H. Endpoint temperature prediction model for LD converters using machine-learning techniques // Proceedings of the 2019 IEEE 6th Int. Conf. on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), April 12–15, 2019, Tokyo, Japan. Tokyo, 2019. P. 22–26. <http://dx.doi.org/10.1109/IEA.2019.8715073>
25. Sarkar R., Gupta P., Basu S., Ballal N.B. Dynamic modeling of LD converter steelmaking: Reaction modeling using Gibbs' free energy minimization // Metallurgical and Materials Transactions B. 2015. Vol. 46. P. 961–976. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0245-2>
26. Rout B.K. Modelling of Dephosphorization in Oxygen Steelmaking: a thesis submitted in the fulfillment for the degree of Doctor of Philosophy. Melbourne, Australia, March 2018. 247 p. URL: https://researchbank.swinburne.edu.au/file/28bcd64e-5f32-45c7-8bef-ddf5063d95f5/1/bapin_rout_thesis.pdf (дата обращения: 01.05.2022).
27. Brooks G.A., Dogan N., Alam M., Naser J., Rhamdhani M.A. Developments in the modelling of oxygen steelmaking // University of Wollongong Research Online. January 2011. P. 1–15. URL: <https://ro.uow.edu.au/engpapers/1631> (дата обращения: 08.10.2021).
28. Gou H., Irons G.A., Lu W.K. Mathematical modeling of postcombustion in a KOBM converter // Metallurgical Transactions B. February 1993. Vol. 24. P. 179–188. <https://doi.org/10.1007/BF02657884>
29. Wu L., Yang N., You X., Xing K., Hu Y. A temperature prediction model of converters based on gas analysis // Procedia Earth and Planetary Science. 2011. Vol. 2. P. 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.003>
30. Tang Y., Fabritius T., Härkki J. Mathematical modeling of the argon oxygen decarburization converter exhaust gas system at the reduction stage // Applied Mathematical Modelling. 2005. Vol. 29. No. 5. P. 497–514. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2004.09.011>
31. Odenthal H.-J., Falkenreck U., Schlüter J. CFD-simulation of multiphase melt flows in steelmaking converters // Proceedings of the European Conf. on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD 2006): September 05 – 08, 2006, Delft, Netherlands. URL: https://www.researchgate.net/publication/228686820_CFD_Simulation_of_Multiphase_Melt_Flows_in_Steelmaking_Converters (дата обращения: 01.05.2022).
32. Andersson N., Tilliander A., Jonsson L.T.I., Jönsson P. Fundamental decarburisation model of AOD process // Ironmaking & Steelmaking. 2013. Vol. 40. No. 5. P. 390–397. <http://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000060>
33. Lytvynuk Y., Corus D., Schenk J., Leoben M., Hiebler M., Sormann A. Thermodynamic and kinetic model of the converter steel-
- 16th Automation and Industrial IT Seminar, September 18–21, 2012, Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, 2012, pp. 408–420. <http://doi.org/10.5151/2594-5335-22654>
21. Kumari V. Mathematical modelling of basic oxygen steel making process: a Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Technology in Mechanical Engineering (Steel Technology). Rourkela, May 2015, 75 p. Available at URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/80148601.pdf> (Accessed 01.05.2022).
22. Gherfi S.K., Bendjama H., Bouhouche S., Meradi H. Neural model identification of metallurgical process in oxygen converter. In: Proceedings of the 12th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection (SGEM 2012), June 17–23, 2012, Albena, Bulgaria. Albena, 2012, vol. 1, pp. 683–690. Available at URL: <http://toc.proceedings.com/19962webtoc.pdf> (Accessed 01.05.2022).
23. Kruskopf A. Multiphysical Modeling Approach for Basic Oxygen Steelmaking Process: a doctoral dissertation. Helsinki, Finland, 2018, 92 p. Available at URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/29573/isbn9789526077956.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (Accessed 10.08.2021).
24. Jo H., Hwang H.J., Phan D., Lee Yu., Jang H. Endpoint temperature prediction model for LD converters using machine-learning techniques. In: Proceedings of the 2019 IEEE 6th Int. Conf. on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), April 12–15, 2019, Tokyo, Japan. Tokyo, 2019, pp. 22–26. <http://dx.doi.org/10.1109/IEA.2019.8715073>
25. Sarkar R., Gupta P., Basu S., Ballal N.B. Dynamic Modeling of LD converter steelmaking: Reaction modeling using Gibbs' free energy minimization. Metallurgical and Materials Transactions B. 2015, vol. 46, pp. 961–976. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0245-2>
26. Rout B.K. Modelling of Dephosphorization in Oxygen Steelmaking: a thesis submitted in the fulfillment for the degree of Doctor of Philosophy. Melbourne, Australia, March 2018, 247 p. Available at URL: https://researchbank.swinburne.edu.au/file/28bcd64e-5f32-45c7-8bef-ddf5063d95f5/1/bapin_rout_thesis.pdf (Accessed 01.05.2022).
27. Brooks G.A., Dogan N., Alam M., Naser J., Rhamdhani M.A. Developments in the modelling of oxygen steelmaking. University of Wollongong Research Online. January 2011, pp. 1–15. Available at URL: <https://ro.uow.edu.au/engpapers/1631> (Accessed 10.08.2021).
28. Gou H., Irons G.A., Lu W.K. Mathematical modeling of postcombustion in a KOBM converter. Metallurgical Transactions B. February 1993, vol. 24, pp. 179–188. <https://doi.org/10.1007/BF02657884>
29. Wu L., Yang N., You X., Xing K., Hu Y. A temperature prediction model of converters based on gas analysis. Procedia Earth and Planetary Science. 2011, vol. 2, pp. 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.003>
30. Tang Y., Fabritius T., Härkki J. Mathematical modeling of the argon oxygen decarburization converter exhaust gas system at the reduction stage. Applied Mathematical Modelling. 2005, vol. 29, no. 5, pp. 497–514. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2004.09.011>
31. Odenthal H.-J., Falkenreck U., Schlüter J. CFD-simulation of multiphase melt flows in steelmaking converters. In: Proceedings of the European Conf. on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD 2006): September 05–08, 2006, Delft, Netherlands. Available at URL: https://www.researchgate.net/publication/228686820_CFD_Simulation_of_Multiphase_Melt_Flows_in_Steelmaking_Converters (Accessed 01.05.2022).
32. Andersson N., Tilliander A., Jonsson L.T.I., Jönsson P. Fundamental decarburisation model of AOD process. Ironmaking & Steelmaking. 2013, vol. 40, no. 5, pp. 390–397. <http://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000060>
33. Lytvynuk Y., Corus D., Schenk J., Leoben M., Hiebler M., Sormann A. Thermodynamic and kinetic model of the converter steel-

- making process. Part 1: The description of the BOF model // *Steel Research International*. 2014. Vol. 85. No. 4. P. 537–543.
<https://doi.org/10.1002/srin.201300272>
34. Penz F.M. Experimental research and mathematical modelling of the melting and dissolution behaviour of scrap in liquid hot metal: Doctoral Thesis. Leoben, Austria, August 2019. 206 p. URL: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/4335151/AC15512656n01.pdf> (дата обращения: 01.05.2022).
35. Barron M.A., Medina D.Y., Hilerio I. CFD analysis of influence of slag viscosity on the splashing process in an oxygen steelmaking converter // *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2013. Vol. 3. No. 3. P. 90–93.
<http://doi.org/10.4236/mnsms.2013.33012>
36. Ярошенко А.В., Синельников В.А., Лавров А.С., Копылов А.Ф. Практика конвертерного производства стали. Липецк: ОАО «НЛМК», 2012. 154 с.
37. Зборщик А.М. Теоретические основы металлургического производства: Конспект лекций. Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2008. 189 с.
38. Кольман Т., Яндл Х. Сравнительный анализ кислородных конвертеров. Оценка технического обслуживания и технологического процесса // *Черные металлы*. 2014. № 5. С. 43–49.
39. Суворов С.А., Козлов В.В. Эксплуатация футеровок и конструкций, выполненных из огнеупорных материалов. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2011. 147 с.
40. Суворов С.А., Козлов В.В. Научные принципы технологии огнеупоров: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2009. 177 с.
41. Чистякова Т.Б., Кудлай В.А., Новожилова И.В. Система поддержки принятия решений по эксплуатации огнеупорной футеровки сталеплавильных конвертеров // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2016. № 37(63). С. 60–66.
42. Пантейков С.П. Верхние дутьевые устройства кислородных конвертеров Украины: состояние, проблемы, перспективы разработки // *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*. Днепропетровский: ДГТУ, 2005. С. 22–32.
43. Пантейков С.П. Этапы совершенствования сварных конструкций пятииспловых фурменных головок в конвертерном цехе ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 10. С. 815–822.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-815-822>
44. De la Cruz S., Barron M.A., Medina D.Y., Reyes J. Lance Design for Argon Bubbling in Molten Steel // *World Journal of Engineering and Technology*. August 2020. Vol. 8. No. 3. P. 317–328.
<https://doi.org/10.4236/wjet.2020.83025>
45. Жульковский О.А. Численное исследование температурного режима работы ствола верхней конвертерной фурмы // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998. № 1. С. 16–19.
46. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. Москва: Высшая школа, 1990. 207 с.
47. Самарский А.А. Теория разностных схем. Москва: Наука, 1989. 616 с.
48. Жульковский О.А., Жульковская И.И., Бабенко М.В. Особенности математического моделирования процессов комбинированного теплообмена в технологических системах // *Математическое моделирование*. 2016. № 1(34). С. 7–10.
49. Microsoft. Документация по C#. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/> (дата обращения: 01.05.2022).
- making process. Part 1: The description of the BOF model. *Steel Research International*. 2014, vol. 85, no. 4, pp. 537–543.
<https://doi.org/10.1002/srin.201300272>
34. Penz F.M. *Experimental research and mathematical modelling of the melting and dissolution behaviour of scrap in liquid hot metal: Doctoral Thesis*. Leoben, Austria, August 2019, 206 p. Available at URL: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/4335151/AC15512656n01.pdf> (Accessed 01.05.2022).
35. Barron M.A., Medina D.Y., Hilerio I. CFD analysis of influence of slag viscosity on the splashing process in an oxygen steelmaking converter. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*. 2013, vol. 3, no 3. pp. 90–93.
<http://doi.org/10.4236/mnsms.2013.33012>
36. Yaroshenko A.V., Sinel'nikov V.A., Lavrov A.S., Kopylov A.F. *BOF Steelmaking Practice*. Lipetsk: OJSC “NLMK”, 2012, 154 p (In Russ.).
37. Zborshchik A.M. *Theoretical Foundations of Metallurgical Production: Lecture Notes*. Donetsk: DonNTU, 2008, 189 p. (In Russ.).
38. Kol'man T., Yandl Kh. Comparative analysis of oxygen converters. Assessment of technical service and technological process. *Chernyye metally*. 2014, no. 5, pp. 43–49. (In Russ.).
39. Suvorov S.A., Kozlov V.V. *Operation of Linings and Structures Made of Refractory Materials*. St. Petersburg: Publ. of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), 2011, 147 p. (In Russ.).
40. Suvorov S.A., Kozlov V.V. *Scientific Principles of Refractory Technology: Textbook*. SPb: SPbSTI (TU), 2009, 177 p. (In Russ.).
41. Chistyakova T.B., Kudlai V.A., Novozhilova I.V. Decision support system for the operation of refractory lining of steelmaking converters. *Izvestiya SPbSTI (TU)*. 2016, no. 37(63), pp. 60–66. (In Russ.).
42. Panteikov S.P. Upper blowing devices of oxygen converters in Ukraine: State, problems, development prospects. In: *Transactions of DSTU (technical sciences)*. Dneprodzerzhinsk: DSTU, 2005, pp. 22–32. (In Russ.).
43. Panteikov S.P. Development of welded structure of 5-nozzle lance heads in converter shop of PJSC “Dneprovsky Metallurgical Combine”. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 10, pp. 815–822. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-815-822>
44. De la Cruz S., Barron M.A., Medina D.Y., Reyes J. Lance design for argon bubbling in molten steel. *World Journal of Engineering and Technology*. 2020, vol. 8, no. 3, pp. 317–328.
<https://doi.org/10.4236/wjet.2020.83025>
45. Zhul'kovskii O.A. Numerical study of operating temperature of top converter lance barrel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, no. 1, pp. 16–19. (In Russ.).
46. Dul'nev G.N., Parfenov V.G., Sigalov A.V. *Computer Application for Solving Heat Transfer Problems*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990, 207 p. (In Russ.).
47. Samarskii A.A. *Theory of Difference Schemes*. Moscow: Nauka, 1989, 616 p. (In Russ.).
48. Zhul'kovskii O.A., Zhul'kovskaya I.I., Babenko M.V. Features of mathematical modeling of combined heat transfer processes in technological systems. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016, no. 1(34), pp. 7–10. (In Russ.).
49. *Microsoft. C# Documentation*. Available at URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/csharp/> (Accessed 01.05.2022). (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Олег Александрович Жульковский, к.т.н., доцент кафедры программного обеспечения систем, Днепровский государственный технический университет

ORCID: 0000-0003-0910-1150

E-mail: olalzh@ukr.net

Сергей Петрович Пантейков, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов и обработки металлов давлением, Днепровский государственный технический университет

ORCID: 0000-0002-0385-7603

E-mail: ser_pant_in@ukr.net

Инна Ивановна Жульковская, к.т.н., доцент кафедры программного обеспечения систем, Днепровский государственный технический университет

ORCID: 0000-0002-6462-4299

E-mail: inivzh@gmail.com

Oleg A. Zhul'kovskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Systems Software, Dniprovsky State Technical University

ORCID: 0000-0003-0910-1150

E-mail: olalzh@ukr.net

Sergei P. Panteikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Metal Forming, Dniprovsky State Technical University

ORCID: 0000-0002-0385-7603

E-mail: ser_pant_in@ukr.net

Inna I. Zhul'kovskaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Systems Software, Dniprovsky State Technical University

ORCID: 0000-0002-6462-4299

E-mail: inivzh@gmail.com

Поступила в редакцию 21.10.2021

После доработки 23.03.2022

Принята к публикации 25.04.2022

Received 21.10.2021

Revised 23.03.2022

Accepted 25.04.2022