ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНИНГОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ

*С. В. ФИЛАТОВ¹, управляющий директор; А. И. ДАГМАН¹, канд. техн. наук, технический директор;
С. В. МЯСОЕДОВ¹, начальник доменного цеха № 1; С. А. ЗАГАЙНОВ², д-р техн. наук,
заведующий кафедрой “Металлургия железа и сплавов”, zagainovsky@mail.ru;
Л. Ю. ГИЛЕВА², канд. техн. наук, доцент кафедры “Металлургия железа и сплавов”
(¹ ПАО “Новолипецкий металлургический комбинат”, Россия, г. Липецк;
² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, г. Екатеринбург)*

Аннотация. Эффективное управление тепловым состоянием доменной печи, в значительной мере зависящее от квалификации технологического персонала, является важным условием выплавки чугуна заданного состава. Одним из способов повышения уровня профессиональных знаний и навыков технологического персонала доменных цехов является использование в процессе обучения компьютерных тренинговых систем (КТС). В основу КТС, внедренной в ПАО НЛМК, положена модель теплового состояния доменной печи, разработанная в Уральском федеральном университете и дополненная моделями действующих возмущений. Настройка динамических характеристик реализована на основе закономерностей тепло- и массообмена. В соответствии с содержанием задач оперативного управления доменной плавкой при обучении на данной КТС изучаются переходные процессы по каналам воздействия на тепловое состояние доменной печи, осваиваются навыки по распознаванию тенденций изменения теплового состояния доменной печи при действии неконтролируемых возмущений и реализации адекватных решений для компенсации отклонений теплового состояния доменной печи от заданного уровня. Внедренная в ПАО НЛМК КТС реализована в режимах обучения и тестирования. Основные параметры работы доменной печи для каждого конкретного сценария отображаются на мнемосхеме, которая в полной мере соответствует мнемосхеме конкретной доменной печи. В рамках изучения динамики переходных процессов предусматриваются задачи изменения теплового состояния печи путем применения программы управления. При реализации сценария управления тепловым состоянием доменной печи при действии неконтролируемых возмущений в ходе сеанса на мнемосхеме имитируется изменение параметров процесса при действии одного из неконтролируемых возмущений: изменение качества кокса, восстановимости или гранулометрического состава железорудного материала, распределение рудной нагрузки по радиусу. Данная КТС включает модуль администрирования, позволяющий накапливать статистику выполнения заданий обучаемыми и в соответствии с принятым алгоритмом оценивать результаты. Использование КТС позволило повысить компетенции технологического персонала, что выразилось в снижении доли некондиционного чугуна.

Ключевые слова: тепловое состояние доменной печи, управление ходом доменной плавки, квалификация технологического персонала, компьютерная тренинговая система, снижение доли некондиционного чугуна.

Ссылка для цитирования. Филатов С.В., Дагман А.И., Мясоедов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю. Использование компьютерных тренинговых систем для повышения квалификации технологического персонала доменных цехов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 4. С. 448–453.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-448-453

APPLICATION OF COMPUTER TRAINING SYSTEMS FOR QUALIFICATION PERFECTION OF TECHNOLOGICAL PERSONAL OF BLAST FURNACE SHOPS

*S. V. FILATOV¹, Managing Director; A. I. DAGMAN¹, PhD (Tech), Technical Director;
S. V. MYASOEDOV¹, Head of BF shop No. 1; S. A. ZAGAINOV², HD (Tech),
Head of Dpt “Metallurgy of iron and alloys”, zagainovsky@mail.ru;
L. YU. GILEVA², PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt “Metallurgy of iron and alloys”
(¹ PAO “Novolipetsky metallurgical works”, Russia, Lipetsk;
² Ural Federal University after the first President of Russia B.N. El'tsin, Russia, Ekaterinburg)*

Abstract. Effective control of thermal state of a blast furnace (BF), considerably depending on the qualification of the technological personal, is an important condition for smelting of hot metal of required composition. Application of computer training systems (CTS) in the process of education of technological personal of BF shops is one of the effective methods of professional knowledge and skill perfection. The CTS, implemented at PAO NLMK, based on a model of thermal state of BF, elaborated in Ural Federal University and supplemented with the models of existing disturbances. Adjusting of dynamic characteristics accomplished on the base of regularity of heat- and mass exchange. According to the tasks of BF heat operative control, during the training at the CTS transient processes are studied through channels of BF thermal state control, skill is mastered to identify the tendencies of BF thermal

state change in case of non-controlled disturbances action. Most important stage of the training – implementation of adequate solutions to compensate declination of BF thermal state parameters from the set-up level. The CTS implemented at PAO NLMK is operating in the mode of training and testing. The main parameters of BF operation for every particular scenario are displayed at a mnemonic diagram, which completely corresponds to the mnemonic diagram of particular BF. Within the frame of transient processes dynamics studies, tasks are stipulated to modify a BF thermal state by application of control programs. When a scenario of BF thermal state control in case of non-controlled disturbances action is realized, the process parameters change is imitated at the mnemonic diagram. It will be done in case of one of the following parameters change: coke quality change, reducibility change, iron ore material grain size change, distribution of ore by radius change. The CTS includes a module of administration, which allows collecting the statistics of tasks fulfilment by pupils and estimating the results according to accepted algorithm. The application of CTS enabled to perfect the competence of technological personal, which was expressed by declining of off-grade hot metal share.

Key words: thermal state of blast furnace, blast furnace running control, qualification of technological personal, computer training system, declining of off-grade hot metal share.

For citation. Filatov S.V., Dagman A.I., Myasoedov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu. Application of computer training systems for qualification perfection of technological personal of blast furnace shops. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 448–453. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-4-448-453

В рамках концепции развития доменного производства ПАО “Новолипецкий металлургический комбинат” (НЛМК) сформулировано, что эффективность работы доменных печей определяется качеством кокса и железорудного сырья, квалификацией технологического персонала.

Среди многообразия форм повышения квалификации технологического персонала на комбинате принято стратегическое направление на создание компьютерных тренинговых систем, основанных на современных методах математического моделирования. Преимуществом такого подхода является то, что наряду с общими принципами управления доменным процессом появляется возможность изучать особенности конкретной доменной печи.

В соответствии с содержанием задач оперативного управления доменной плавкой тренажер должен обеспечивать повышение уровня компетенций в области:

- знания переходных процессов по каналам воздействия на тепловое состояние доменной печи;
- умения распознавать тенденции изменения теплового состояния доменной печи при действии неконтролируемых возмущений;
- приобретения навыков принятия и реализации адекватных решений для компенсации отклонений теплового состояния доменной печи от заданного уровня и минимизации числа выпусков с некондиционным по химическому составу и температуре чугуном.

В основу тренажера положена модель теплового состояния доменной печи, разработанная в Уральском федеральном университете [1, 2] с учетом имеющейся в литературе информации. Модель учитывает взаимосвязи между развитием основных физико-химических процессов, определяющих тепловое состояние доменной печи. В качестве основных возмущений, вызывающих изменение теплового состояния доменной печи, рассматриваются изменения:

- качества железорудного сырья;
- качества кокса;

– распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

Влияние изменения распределения рудной нагрузки по радиусу печи моделировалось на основе данных [3–5], восстановления оксидов железа [6–10], образования чугуна и шлака [11, 12], теплообмена между встречными потоками шихты и газов [12, 13].

Учитывая сложный нелинейный характер взаимосвязи между основными процессами доменной плавки и его зависимость от текущего состояния процесса, задача создания математической модели для тренажера рассматривалась как системная задача.

Декомпозиция модели доменного процесса на основе современных представлений об основных физико-химических процессах плавки и принятом допущении о возможности описания переходных процессов типовыми динамическими звеньями позволила разработать структуру динамической модели в виде совокупности взаимосвязанных апериодических звеньев первого порядка с запаздыванием, описывающих элементарные процессы. Модель строилась для такого диапазона изменения теплового состояния, при котором изменение содержания кремния в чугуне составляет $\pm 0,3\%$.

Для определения динамических характеристик звеньев использован метод натурно-математического моделирования [1, 2]. Схема моделирования переходных процессов при действии как возмущений, так и управлений приведена на рис. 1.

Модель базового режима служит для расчета коэффициентов настройки динамической модели. Рассчитываются температурные поля по высоте печи, что позволяет определить протяженность зон развития основных физико-химических процессов и время пребывания шихты в этих зонах. В результате этих расчетов находят базовые значения коэффициентов передачи, времени запаздывания τ_z и постоянной времени $T_{об}$ по основным каналам управления и возмущений. Принято, что постоянная времени

составляет одну третью часть от времени пребывания шихты в зоне развития соответствующего процесса, а время запаздывания определяется как время движения шихты до соответствующего горизонта.

Рис. 1. Схема моделирования переходных процессов при действии возмущений и управлений

Fig. 1. Diagram of transient processes simulation in case of disturbances action and control

Модуль адаптации динамических характеристик к текущим условиям работы печи. Моделирование осуществляется путем учета изменения времени пребывания шихты в зонах развития основных физико-химических реакций для конкретных (текущих) условий работы доменной печи ($\Delta\tau_{zi}/\tau_{zi}$), которое учитывается через относительное изменение производительности печи

($\Delta P/P$). Изменение температурного поля учитывается через относительное изменение отношения теплоемкостей потоков шихты и газов ($\Delta m/m$):

$$\frac{\Delta\tau_{zi}}{\tau_{zi}} = -\frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta m}{m}.$$

Модели динамики показателей процесса при использовании управляющих воздействий и действии возмущений. Модели построены на теоретических представлениях о влиянии управляющих воздействий и возмущений на тепловое состояние печи [3–10]. Эмпирические коэффициенты, используемые в теоретических зависимостях, уточняются на основе анализа характерных периодов работы печей.

Компьютерная тренинговая система “Управление тепловым состоянием доменной печи” внедрена в процесс обучения технологического персонала доменных цехов ПАО НЛМК.

На рис. 2 приведен слайд с основными задачами, реализуемыми в режиме как обучения, так и тестирования. Каждая из задач обучения реализуется с использованием множества сценариев, выбираемых случайным образом. Число обращений к каждому сценарию в режиме обучения неограниченно. В режиме тестирования после каждого обращения к сценарию тестируемому выставляется оценка, которая хранится в базе результатов обучения.

Рис. 2. Окно приветствия компьютерной тренинговой системы

Fig. 2. Window of greeting of the computer training system

Основные параметры работы доменной печи для каждого конкретного сценария отображаются на мнемосхеме, которая в полной мере соответствует мнемосхеме конкретной печи.

В рамках изучения динамики переходных процессов предусматриваются задачи измене-

ния теплового состояния печи путем применения программы управления. Пример реализации задачи снижения нагрева печи только за счет изменения массы кокса в подаче и при одновременном временном снижении температуры дутья приводится на рис. 3 и 4.

Рис. 3. Программа управления при снижении нагрева печи за счет изменения массы кокса в подаче и динамика изменения содержания кремния в чугуне

Fig. 3. Program of control in case of furnace heating decrease at coke mass in the charge change and dynamics of silicon content change in the hot metal

Рис. 4. Программа управления при снижении нагрева печи за счет изменения как массы кокса в подаче, так и временного снижения температуры дутья и динамика изменения содержания кремния в чугуне

Fig. 4. Program of control in case of furnace heating decrease at coke mass in the charge change and temporary decrease of blow temperature; dynamics of silicon content change in the hot metal

При реализации сценария управления тепловым состоянием печи при действии неконтролируемых возмущений в ходе сеанса на мнемосхеме (рис. 5) имитируется изменение параметров процесса при действии одного из неконтролируемых возмущений: изменение качества кокса, восстановимости или гранулометрического состава железорудных материалов, распределение рудной нагрузки по радиусу.

Анализируя изменения индикаторов процесса, обучаемый принимает решение о направлении изменения теплового состояния печи, имеет возможность приостановить процесс моделирования и ввести программу управления.

При остановке программы моделирования основные индикаторы (давление дутья и перепады давления по высоте печи; температуры колошниковых и периферийных газов; состав колошниковых газа и степень использования CO) могут быть просмотрены в виде диаграмм.

При вводе программы управления указывается вид управляющего воздействия, изменение величины параметра и время нанесения воздействия. В качестве управляющих параметров предусмотрены параметры комбинированного дутья и масса кокса в подаче. Применение программы управления приводит к отображению результирующей динамики изменения теплового состояния печи (рис. 6).

Рис. 5. Мнемосхема, отображающая в цифровом формате изменение параметров работы печи (индикаторов)

Fig. 5. Mnemonic diagram displaying furnace operating parameters (indicators) change in digital format

Рис. 6. Результаты моделирования динамики теплового состояния печи

Fig. 6. Results of furnace thermal state dynamics simulation

При реализации сценария управления тепловым состоянием доменной печи при вынужденных перешихтовках на мнемосхеме отражено текущее состояние процесса. В соответствии с заданием обучаемый меняет состав подачи, определяя виды шихтовых материалов, их количество в подаче, устанавливает и применяет программу управления параметрами комбинированного дутья для сохранения теплового режима доменной плавки. По результатам моделирования динамики процесса обучаемый имеет возможность оценить эффективность принятой программы управления и скорректировать ее.

Компьютерная тренинговая система включает модуль администрирования, позволяющий накапливать статистику выполнения заданий обучаемым и в соответствии с принятым алгоритмом оценивать результаты.

Внедрение компьютерной тренинговой системы в процесс обучения в ПАО НЛМК позволило повысить уровень компетенций технологического персонала в области управления тепло-

вым состоянием доменной печи. Анализ результатов работы доменного цеха показал наличие зависимости эффективности обучения на тренажере на выход несоответствующей продукции как по [S], так и по [Si], с сохранением соответствующего влияния на общий выход несоответствующей продукции (рис. 7).

Рис. 7. Влияние количества зачетов на общий выход несоответствующей продукции

Fig. 7. Influence of the number of pupil passed the test on the total outcome of off-grade products

Наиболее сильно эффективность прохождения тестирования на тренажере влияет на выход несоответствующей продукции по [Si] на ДП № 3 и 4. Данный факт на ДП № 4 может быть обусловлен использованием технологии вдувания пылеугольного топлива, что подразумевает более "жесткий" технологический режим. На ДП № 5 влияние носит качественный характер, что может быть обусловлено низким выходом несоответствующей продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.Н. Лобанов и др. — Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. — 617 с.
3. Большаков В.И. Научное обоснование стратегии управления распределением шихты при использовании БЗУ // *Сталь*. 2002. № 4. С. 37–42.
4. Бугаев К.М. Распределение газов в доменных печах. — М.: Металлургия, 1974. — 176 с.
5. Загайнов С.А., Филатов С.В., Гилева Л.Ю. и др. Оценка возможности управления тепловым состоянием верха доменной печи в периферийной области // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2016. № 6. Т. 59. С. 371–377.
6. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. — М.: Металлургия, 1982. — 224 с.
7. Курунов И.Ф., Филатов С.В., Тихонов Д.Н., Басов В.И. Интенсивность доменной плавки и эффективность косвенного восстановления // *Сталь*. 2016. № 8. С. 26–31.
8. Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2015. № 9. С. 658–661.
9. Драничников Н.А., Китаев Б.И., Суханов Е.Л. и др. Определение параметров восстановления доменного процесса аналитическим методом // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1982. № 6. С. 22–25.
10. Коршиков Г.В., Титов В.Н., Михайлов В.Г., Карпов А.В. Влияние интенсивности доменной плавки на расход топлива и кинетику химических реакций восстановительного процесса // *Сталь*. 2016. № 2. С. 9–15.
11. Гиммельфарб А.А., Котов К.И. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах. — М.: Металлургия, 1982. — 328 с.
12. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. — М.: Металлургия, 1978. — 248 с.
13. Доменное производство: справочное издание. В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана. — М.: Металлургия, 1989. — 486 с.

Поступила 1 марта 2019 г.

REFERENCES

1. Onorin O.P., Spirin N.A., Teren'ev V.L. etc. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsesssa* [Computer methods of blast furnace process simulation]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
2. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.N., Krasnobaev V.I., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Informatsionnye sistemy v metallurgii* [Information systems in steel industry]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg, UGTU-UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
3. Bol'shakov V.I. Scientific basing strategy of control by burden distribution at application of bell-less charging unit. *Stal'*, 2002, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
4. Bugaev K.M. *Raspredelenie gazov v domennykh pechakh* [Distribution of gases in blast furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 176 p. (In Russ.).
5. Zagainov S.A., Filatov S.V., Gileva L.Yu., Lozovich A.V., Dzhimo S.O. Estimation of a possibility to control the thermal state of BF top in peripheral area. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 371–377. (In Russ.).
6. Tarasov V.P. *Gazodinamika domennogo protsesssa* [Gas dynamics of BF process]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 224 p. (In Russ.).
7. Kurunov I.F., Filatov S.V., Tikhonov D.N., Basov V.I. Intensity of BF heat and efficiency of non-direct reduction. *Stal'*, 2016, no. 8, pp. 26–31. (In Russ.).
8. Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Pykhteeva K.B. Elaboration of analysis methodology of iron oxides reduction processes. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2015, no. 9, pp. 658–661. (In Russ.).
9. Dranichnikov N.A., Kitaev B.I., Sukhanov E.L. etc. Determination of BF process reduction parameters by an analytical method. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 1982, no. 6, pp. 22–25. (In Russ.).
10. Korshikov G.V., Titov V.N., Mikhailov V.G., Karpov A.V. Influence of BF heat intensity on fuel rate and cynetics of reduction process chemical reactions. *Stal'*, 2016, no. 2, pp. 9–15. (In Russ.).
11. Gimmel'farb A.A., Kotov K.I. *Protsessy vosstanovleniya i shlakooobrazovaniya v domennykh pechakh* [Processes of reduction and slag formation in blast furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 328 p. (In Russ.).
12. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu. N., Shvydkii V.S. *Teplotekhnika domennogo protsesssa* [Heat engineering of BF process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
13. *Domennoe proizvodstvo. V 2-kh t. T. 1. Podgotovka rud i domennyi protsess* [Blast furnace production. In 2 volumes. Vol. 1. Preparation of ore and BF process]. Vegman E.F. ed. Moscow: Metallurgiya, 1989, 486 p. (In Russ.).

Received 1 March 2019