6. Bandman O.L. Cell-automatic models of spatial dynamics. *System informatics. Collection of works edited by A.G. Marchuk.* Novosibirsk: SB RAS. 2006, pp. 59–113. (In Russian).

7. Bandman O.L. Invariants of cellular automata models for reaction-diffusion processes. *Applied Discrete Mathematics*. 2012. No 3, pp. 108–118.

8. Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA): Lessons learned. *Journal Control and Cybernetics*. 1995. No 25, pp. 33–54.

9. Lopatin A.S. The method of agitation. *Stochastic optimization in computer science*. 2005. V. 1. No 1, pp. 133–139. (In Russian).

10. Newman J.P. Maier H.R., Riddell G.A., Zecchin A.C., Daniell J.E., Schaefer A.M., Newland C.P. Review of literature on decision support systems for natural hazard risk reduction: Current status and future research directions. *Environmental Modelling & Software*. 2017. V. 96, pp. 378–409.

11. Martin D., Nickless G., Price C.S., Britter R.E., Neophytou M.K., Cheng H., Shallcross D.E. Urban tracer dispersion experiment in London (DAPPLE) 2003: field study and comparison with empirical prediction. *Atmospheric Science Letters.* 2010. V. 11. No 4, pp. 241–248.

12. Finardi S., Morselli M. G., Jeannet P. Wind flow models over complex terrain for dispersion calculations. *Cost Action*. 1997. V. 710, pp. 51.

Поступила в редакцию/received: 29.04.2022; после рецензирования/revised: 11.05.2022; принята/accepted: 16.06.2022

УДК 658.588.2

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПРОГАРЕ ФУРМЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

М.Ю. РЯБЧИКОВ, канд. техн. наук, Е.С. РЯБЧИКОВА, канд. техн. наук, Е.С. МУХИНА, ст. препод., М.А. ТАРАСОВ, студ.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38, e-mail: mr_mgn@mail.ru

© Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Мухина Е.С., Тарасов М.А., 2022

Статья посвящена совершенствованию существующих способов прогноза прогара фурмы с применением хорошо известного технологического параметра, характеризующего перепад расхода охлаждающей воды на входе и выходе фурмы. Отличительной чертой предложенной системы является двухуровневый прогноз в виде сигнала тревоги и предупреждения о прогаре. Прогноз выполняется на основе автоматизированного анализа по ретроспективным данным статистических свойств перепада расхода охлаждающей воды. Приведены примеры динамики изменения перепада расхода охлаждающей воды на фурме перед прогаром и непосредственно при прогаре. Представлена структура системы предупреждения, а также показаны примеры ее работы в ситуациях, когда прогар развивается постепенно и лавинообразно.

Ключевые слова: прогар фурмы, доменная печь, прогноз, диспетчерское управление, обработка ретроспективных данных.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-3-91-103

ВВЕДЕНИЕ

К металлургическому производству предъявляются высокие требования в области качества продукции, охраны труда и экономических показателей. Поэтому часто на первый план выходит задача предупреждения различных нештатных ситуаций, приводящих к различным неблагоприятным последствиям, таким как нарушение хода технологического процесса, разрушение технологического оборудования вследствие аварий, нанесение вреда здоровью персонала и т.д.

Так, в условиях доменного производства своевременная реакция технологов на выход из строя оборудования доменной печи позволяет заблаговременно скорректировать режимы работы и уменьшить время простоев при выполнении ремонтных мероприятий.

Прогар фурмы относится к разряду значительных аварийных ситуаций, при которых требуется незамедлительная, а нередко и аварийная остановка доменной печи для замены сгоревшей фурмы. Причины прогара могут быть различны. Согласно [1] при попадании на фурму жидкого чугуна в зоне контакта на водоохлаждаемой поверхности образуется паровая подушка, которая создает не охлаждаемый водой очаг. Автором [2] установлено, что прогар может быть связан с попаданием капель перегретого чугуна на обнаженную часть фурмы при разрушении гарнисажа над ней. Прогар фурмы приводит к различным негативным последствиям для эксплуатации доменной печи, оборудования печи, а также влечет серьезные риски для жизни и здоровья технологического и обслуживающего доменную печь персонала. В [3] указывается, что наиболее травмоопасными являются доменное и сталеплавильное производства, причем большая часть аварий происходит из-за взрывов и прогара фурм.

Несмотря на важность оперативной диагностики прогара фурмы, факт возникновения прогара по-прежнему часто определяется несвоевременно вследствие человеческого фактора. В то же время значительные объемы накопленных технологических данных могут послужить основой для разработки системы автоматического предупреждения о прогаре. Подобная система должна позволить снизить, например, риск таких серьезных последствий прогара, как вынос фурменного прибора из печи.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ ПРОГАРА

Самым распространенным способом диагностики прогара является наблюдение за состоянием фурм по разности расходов воды на входе и выходе фурмы и по разности температур, подходящей к фурме и отходящей от нее охлаждающей воды. В то же время значения данных технологических параметров неодинаковы для разных фурм одной и той же доменной печи и меняются с течением времени вследствие различных технологических возмущений. Это приводит к тому, что персонал, как правило, диагностирует уже явный факт прогара при отсутствии существенного запаса времени на принятие мер по предотвращению и устранению возможной аварийной ситуации.

Первые предложения по разработке и установке систем сигнализации прогара фурмы относятся к началу прошлого века. Так, в [2] предложена разработка, направленная на определение факта и места прогара. Достигается это включением в трубу, подающую воду, полого тела с находящимся внутри него поплавком, сопряженным с контактным приспособлением, которое при опускании поплавка в случае увеличенного расхода воды замыкает электрическую цепь соответствующей лампочки в световой сигнализации и дает тревожный звонок. Алгоритм предполагает срабатывание сигнализации при сильном изменении уровня воды, обусловленном резким изменением ее расхода. Недостатком способа является то, что индивидуальные особенности работы отдельных фурм требуют определения некоторого порога

нечувствительности. Как следствие, сигнализация сработает уже при наличии явного факта прогара.

Развитие систем дистанционного контроля с применением вычислительной техники позволяет операторам решить задачу дистанционного наблюдения за состоянием фурмы напрямую, путем контроля расходов и температуры подходящей и отходящей от фурмы воды. Подобные решения предложены в [4, 5].

Основой системы [4] является предложение по использованию электромагнитных расходомеров, обеспечивающих контроль расхода воды в исходящих и напорных трубопроводах системы охлаждения воздушных фурм. В [5] описано использование малоинерционных и достаточно чувствительных датчиков для измерения температуры воды на входе и выходе теплового агрегата. В качестве подобных датчиков предлагается применять малоинерционные генераторы, где скважность импульсов является функцией температуры. Предлагается измерять температуру на входном и выходном трубопроводах фурменного хладагента и следить за разностью этих температур во времени. В случае прогара фурмы или разрыва ее по сварочному шву происходит резкое возрастание температуры исходящего из теплового агрегата потока воды, а также повышение регистрируемой разности температур до критического значения. Причем критическое значение разности температур, соответствующей прогару, определяется заранее на основе данных о конструкции фурмы. Недостаток способов [4, 5] связан с отсутствием учета возможного постепенного изменения характеристик фурм и их отклонения от исходных проектных уровней. Однако фурма может при этом прослужить еще достаточно много времени.

Дальнейшее развитие идеи использования данных о расходах и температуре воды на входе и выходе фурмы представлено в работе [6]. Применяемые алгоритмы предполагают интеллектуальную обработку данных. В этом методе определяют разность расходов входящего и выходящего потоков охлаждающей фурму воды и вычисляют среднее значение разности температур входящего и выходящего потоков. В случае увеличения среднего значения разности температур при значении разности упомянутых расходов потоков воды в пределах суммарной погрешности измерения расходомерами регистрируют начало разрушения теплоизоляции. В случае если разность упомянутых расходов больше погрешности измерения расхода расходомерами, регистрируют прогар теплоизоляции фурмы. Метод позволяет определить начало разрушения теплоизоляции со стороны дутьевого канала воздушной фурмы доменной печи и, соответственно, начало либо приближение прогара самой воздушной фурмы доменной печи. Использование расчета среднего значения технологического показателя и данных о погрешности измерения делает способ более универсальным. Однако неясно, как связана степень оперативности формирования предупреждения с достоверностью прогноза.

В целом контроль перепада расхода воды на охлаждение фурмы является одним из важных параметров контроля безопасности процесса. Следует отметить, что прогар фурмы не всегда сопровождается утечкой воды, подаваемой на охлаждение фурмы. Однако именно утечка воды создает одну из наиболее опасных ситуаций. Согласно [7] особенно опасна встреча газов с воздухом дутья в присутствии воды вследствие течи фурм. Температура газов и дутья в фурменном приборе может оказаться ниже температуры их воспламенения вследствие потери тепла на испарение воды. В результате образуются взрывоопасные газовоздушные смеси.

Получение достоверного прогноза состояния фурмы с использованием данных о температуре воды связано с моделированием теплообмена в элементах конструкции фурмы. Данное направление развивается [1, 8, 9], и, вероятно, в будущем следует ожидать интеграции подобных моделей в состав комплексных моделей доменного

процесса. Это позволит в полной мере извлечь пользу из контроля температуры воды, охлаждающей фурму.

Кроме контроля расхода и температуры воды, охлаждающей фурму, известны и другие методы диагностики прогара.

Например, в работе [10] рассматриваются преимущества визуального контроля работы фурм через смотровое отверстие воздушной фурмы. Авторы указывают, что такой контроль более универсален и позволяет оценить физическое состояние различных элементов конструкции фурмы, процесс подачи природного газа и утечку воды.

Так, в условиях одного из предприятий металлургической промышленности предусмотрен визуальный контроль работы фурм через смотровое отверстие воздушной фурмы доменной печи, снабженного интеллектуальным видеодатчиком [11]. При этом возможны видеосъемка, отображение, сохранение и воспроизведение архивной видеоинформации работы фурменных зон. Программное обеспечение позволяет отображать характер протекающих процессов на экране монитора. В то же время движение материалов в области фурменных очагов происходит чрезмерно интенсивно для визуального наблюдения человеком (рис. 1). Как правило, оператор способен оценить яркость свечения, но и это может осложняться разным исходным нормальным уровнем свечения для различных фурм. Как следствие, визуально оператор-человек способен диагностировать таким способом относительно ограниченный набор ситуаций (например, когда часть видеоизображения перекрыта статичными и неподвижными массами материалов). Данное перспективное направление, вероятно, получит развитие в будущем, при разработке способов автоматического интеллектуального анализа видеоизображения, что соответствует выводам, сделанным в [10].

Рис. 1. Изображения с камеры смотрового отверстия фурмы доменной печи № 10 с интервалом в 1 с

Известен также предложенный в [12] способ контроля прогара воздушных фурм доменной печи, основанный на измерении разности электрических потенциалов на кожухе доменной печи. Измеряют разность электрических потенциалов на фурмах, общую разность потенциалов между кольцевым воздухопроводом и кожухом печи в районе лещади, частные разности потенциалов между каждой фурмой и кольцевым воздухопроводом или кожухом печи в районе лещади. Определяют отношение частных разностей потенциалов к общей и о прогаре фурм судят по росту этого отношения до уровня от четырех до восьми, а также по изменению полярности электрического потенциала на фурме. К недостаткам данного способа можно отнести использование при диагностике косвенного показателя, который может изменяться в достаточно широком

диапазоне. Это требует подстройки такой системы к условиям работы отдельной печи и фурмы с участием человека – специалиста по настройке подобных систем.

Исходя из отмеченных особенностей, следует подчеркнуть, что в настоящее время целесообразно дальнейшее совершенствование диагностики прогара с участием технологических переменных, хорошо знакомых персоналу предприятия и доказавших свою надежность, для совершенствования системы диагностики прогара с использованием данных контроля расхода воды на охлаждение фурмы. Именно этот технологический параметр дает наиболее достоверную информацию об утечке воды.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЯЕМОГО НА ПРЕДПРИЯТИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СПОСОБА ДИАГНОСТИКИ

В настоящее время основным параметром контроля состояния фурмы и обнаружения наступления прогара фурм изначально является разность расходов охлаждающей воды на подводе к фурме и на отводе от нее. Для сигнализации о прогаре фурм в существующих системах диспетчерского контроля принято значение разности расходов, равное 1 м³/ч, сигнал о превышении которого выводится на экран монитора. Таким образом, оператор получает информацию о факте прогара фурмы.

На рис. 2 приведен сравнительный график разности расходов воды на подводе и на отводе от фурмы № 9 доменной печи (ДП) № 10, исправной в течение рассматриваемого интервала времени, и фурмы № 10, у которой произошел прогар. Видно, что перепады расходов для разных фурм могут существенно различаться. Кроме того, анализ данных за значительные интервалы времени показал значительный дрейф нормальных значений перепадов расхода на фурму в течение периода ее эксплуатации. Именно поэтому для того, чтобы избежать ложных тревог о прогаре, критический уровень перепада расхода принят на достаточно высоком уровне в 1 м³/ч.

Рис. 2. Сравнительный график разности расходов воды на подводе и на отводе исправной фурмы № 9 и прогоревшей фурмы № 10 ДП 10

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ПРОГАРА ФУРМЫ

Значительные объемы накопленных данных по работе разных фурм позволяют оценить статистические особенности динамики изменения перепада расхода воды на фурме. Динамика оценивалась по скорости изменения перепада расхода охлаждающей воды на фурме. Скорость изменения переменной «разность расходов охлаждающей воды на подводе и отводе от фурмы» при нормальной работе фурмы с высокой вероятностью находится в определенном диапазоне. Появление существенно отличающихся скоростей, т.е. маловероятных скоростей изменения параметра, – признак приближающегося прогара. Для проверки этого факта предварительно были изучены данные, полученные при нормальной работе различных фурм в разные периоды времени и непосредственно незадолго до их прогара.

По данным о нормальной работе фурм были определены усредненные критические значения фильтрованной скорости V изменения перепада расхода на фурме, превышение которых маловероятно. Параметры фильтра в виде апериодического звена второго порядка подбирались путем вычислительных экспериментов. Для определения критических значений была получена функция плотности распределения значений V по данным о нормальной работе фурм. Была произведена аппроксимация полученной функции плотности распределения нормальным законом распределения (рис. 3).

Полученную усредненную функцию интегрального распределения использовали для определения критических значений V. На рис. 4 в качестве примера показано критическое значение V, превышение которого возможно с вероятностью $\alpha = 0{,}02$ ($P = 1 - \alpha = 0{,}98$).

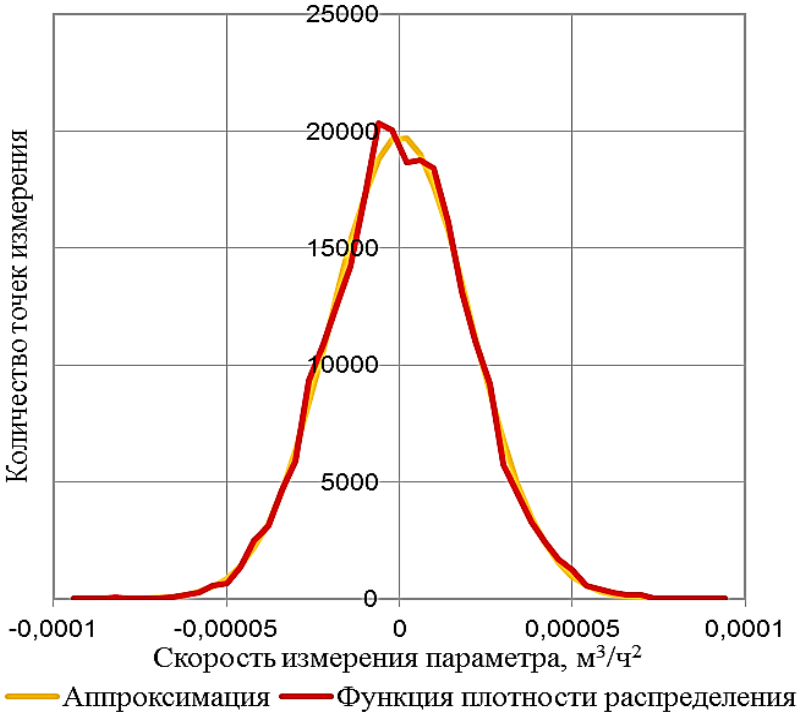

Рис. 3. Функция плотности распределения значений V

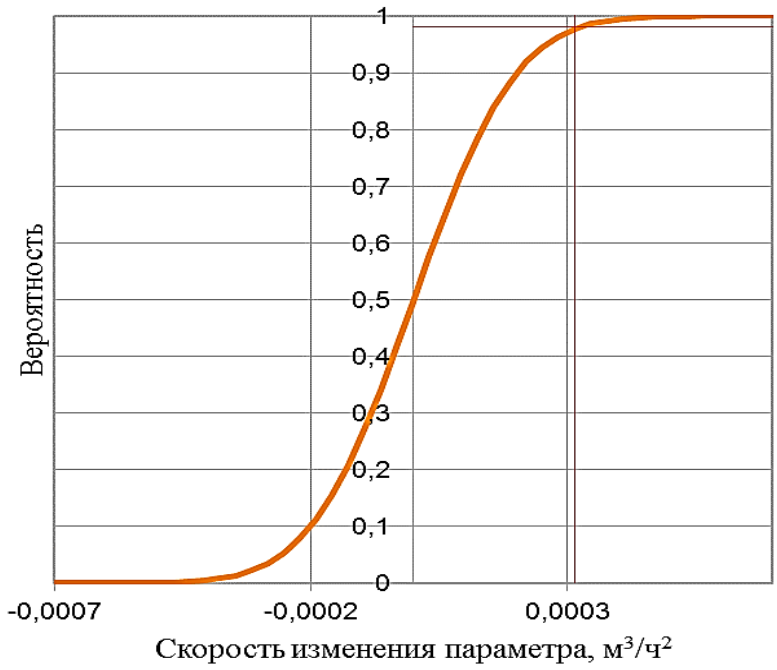

Рис. 4. Интегральная функция распределения и критическое значение V = 0,000 32, превышение которого возможно с вероятностью 0,02

Очевидно, что критическое значение скорости V будет периодически превышаться и при нормальной работе фурмы. В основе предлагаемого способа диагностики прогара лежит гипотеза о том, что по мере приближения состояния фурмы к активному развитию прогара, критические значения скорости V будут превышаться более часто и на большую величину. В качестве примера рассмотрим (рис. 5), как соотносятся значения модуля V с критическим значением V. С учетом модуля превышение критического значения при нормальном режиме работы возможно с вероятностью $2\alpha = 0{,}04$.

Для формирования сигнала предупреждения о прогаре фурмы интегрировали величины ΔV, которые определяются моментами превышения V критического уровня $V_{крит}$:

$$\Delta V = \begin{cases} 0 \text{ при } V \le V_{крит}, \\ V - V_{крит} \text{ при } V > V_{крит}. \end{cases}$$

Интегрирование значений ΔV осуществляется за ограниченный интервал времени. Для полученного интеграла S производится дополнительное сглаживание значений путем расчета скользящего среднего значения $S_{ср}$. Полученный показатель $S_{ср}$ сравнивается с подобранным граничным уровнем для формирования дискретного сигнала $D_п$ предупреждения о вероятном приближении прогара. Далее дискретный сигнал предупреждения $D_п$ также сглаживается путем расчета скользящего среднего $S_{п\ ср\ знач}$ и сравнивается с критическим уровнем $K_{пт}$. При превышении критического уровня формируется сигнал тревоги о прогаре фурмы $D_т$.

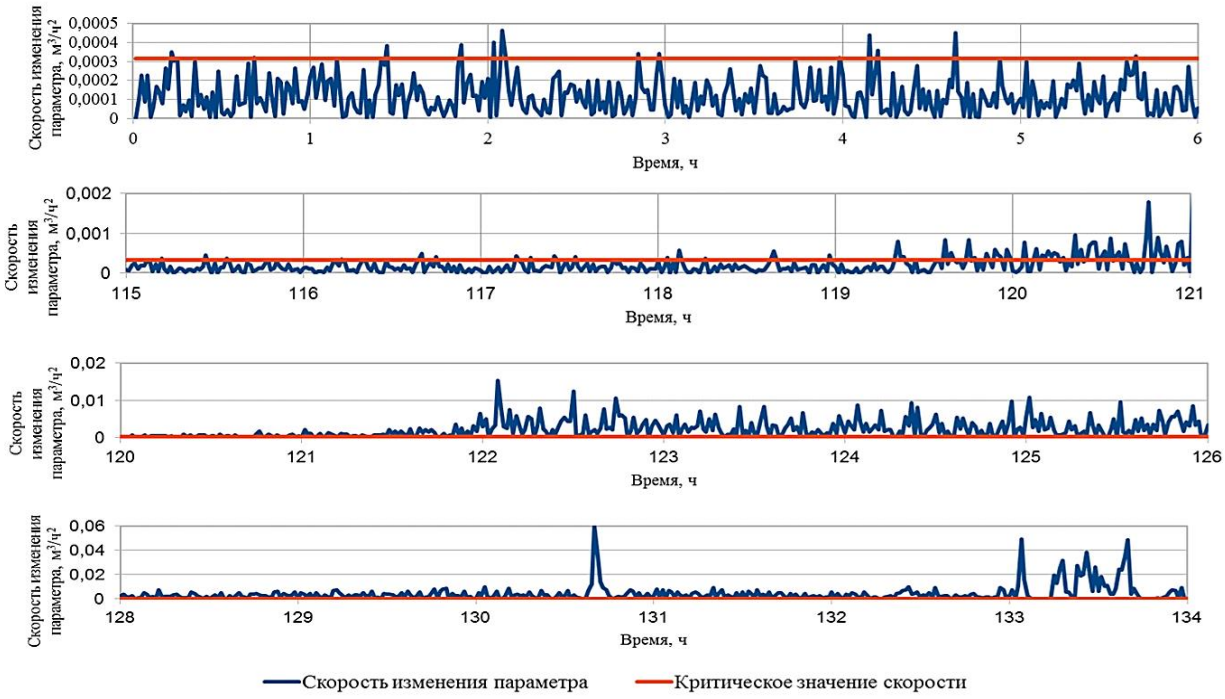

Рис. 5. Динамика изменения abs(V) перед и после прогара фурмы № 10 ДП 10 и критическое значение V при α = 0,02

На рис. 6 представлен пример формирования импульсов предупреждения и тревоги. Видно, что по мере приближения к моменту возникновения прогара чаще срабатывают сигналы предупреждений и в итоге включается сигнал тревоги.

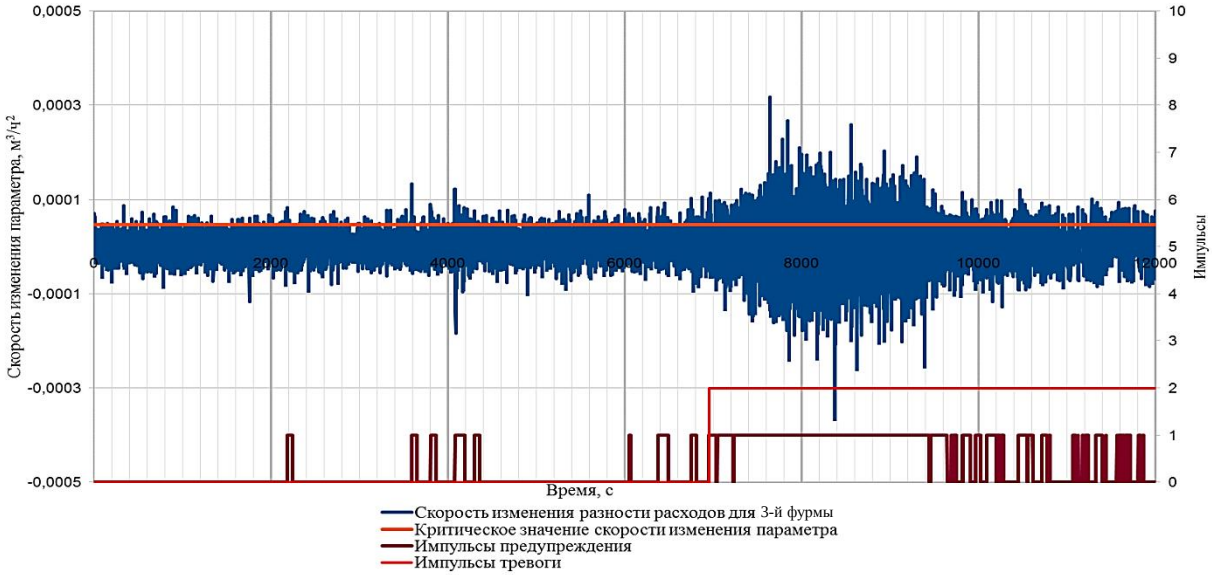

Рис. 6. Формирование импульсов предупреждения и тревоги (α = 0,01) перед прогаром фурмы № 3 ДП 10

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ПРОГАРЕ ФУРМЫ

Структурная схема разработанной системы двухуровневого предупреждения о прогаре фурмы ДП представлена на рис. 7.

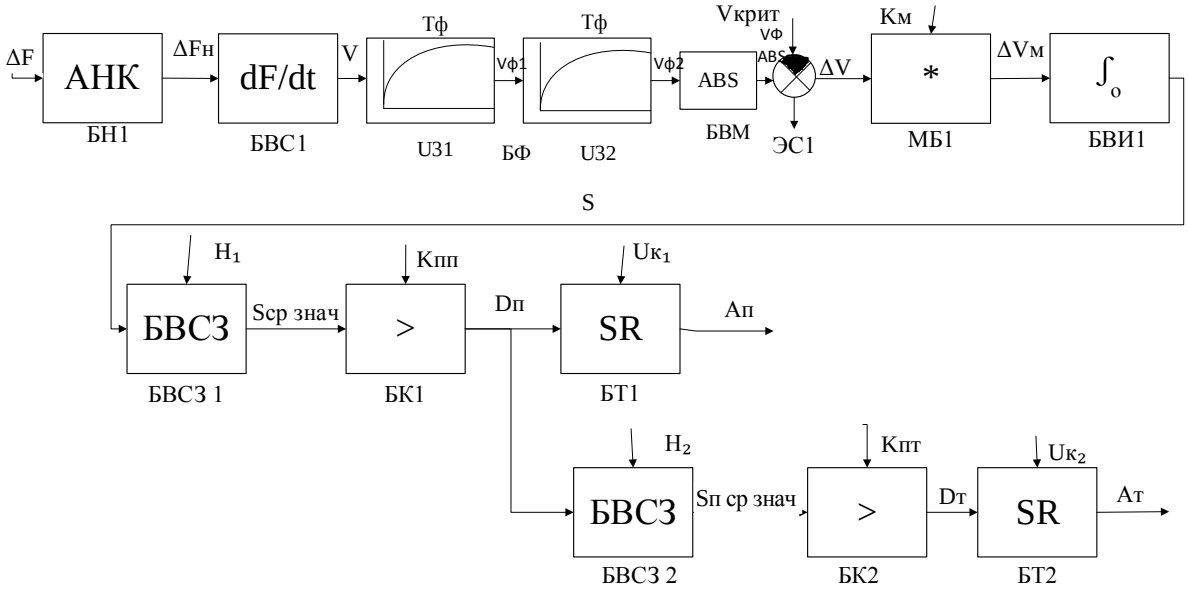

Рис. 7. Структурная схема системы предупреждения о приближении прогара: АНК – алгоритм нормализации и компактирования; БВСЗ – блок вычисления среднего значения; SR – триггер включения сигнала для системы оповещения; БВС – блок вычисления скорости; МБ – блок масштабирования; ЭС – элемент сравнения; БК – блок компаратора; БТ – блок триггера; БН – блок нормализации; БВИ – блок вычисления интеграла

Данные поступают на блок нормализации БН1, после чего вычисляется скорость V в блоке БВС1 по величине $\Delta F_н$ (нормализованный массив данных разности расходов). Значения вычисленной скорости фильтруются в блоках фильтрации БФ (U31 и U32), вычисляются модули скоростей в блоке БВМ, после чего они сравниваются с критической скоростью на элементе сравнения.

Элемент сравнения ЭС1 вычитает из полученных значений фильтрованной скорости изменения расходов $V_{ф2}$ критическое значение скорости $V_{крит}$. Полученные значения ΔV масштабируются блоком масштабирования МБ1, который является блоком умножения входной величины на коэффициент $K_м$.

Блок БВИ1 обрабатывает данные согласно вышеприведенному выражению и рассчитывает интеграл $\Delta V_м$. По полученному набору значений интегратора вычисляется скользящее среднее значение в блоке БВСЗ1. Вычисленное среднее значение поступает на блок компаратора БК1, формирующий внутрисистемные импульсы. Эти импульсы поступают на триггер БТ1, формирующий сигнал предупреждения, и по ним вычисляется среднее значение в блоке БВСЗ2. Усредненные импульсы поступают также на компаратор БК2, сигнал которого взводит триггер сигнала тревоги БТ2. Сигналы $U_{к1}$ и $U_{к2}$ предназначены для сброса состояния триггеров.

ПРИМЕР РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАСТРОЙКАХ

Поиск оптимальных настроек системы предупреждения показал, что применение единых универсальных настроек снижает оперативность и достоверность прогноза. Целесообразно индивидуально вести мониторинг плотности распределений значений V при работе фурмы в нормальных условиях. Это вполне реализуемо в современных условиях. Также целесообразно установление связи коэффициента нормирования $K_м$ величин ΔV с параметрами закона распределения.

Оптимизация настроек системы прогноза по данным разных фурм необходима, поскольку в противном случае система может давать предупреждение задолго, а иногда практически перед самым прогаром. Кроме того, постоянные предупреждения о тенденции к скорому прогару могут раздражать операторов и привести к тому, что предупреждения будут проигнорированы. Работа системы при наилучших настройках представлена на рис. 8 и 9.

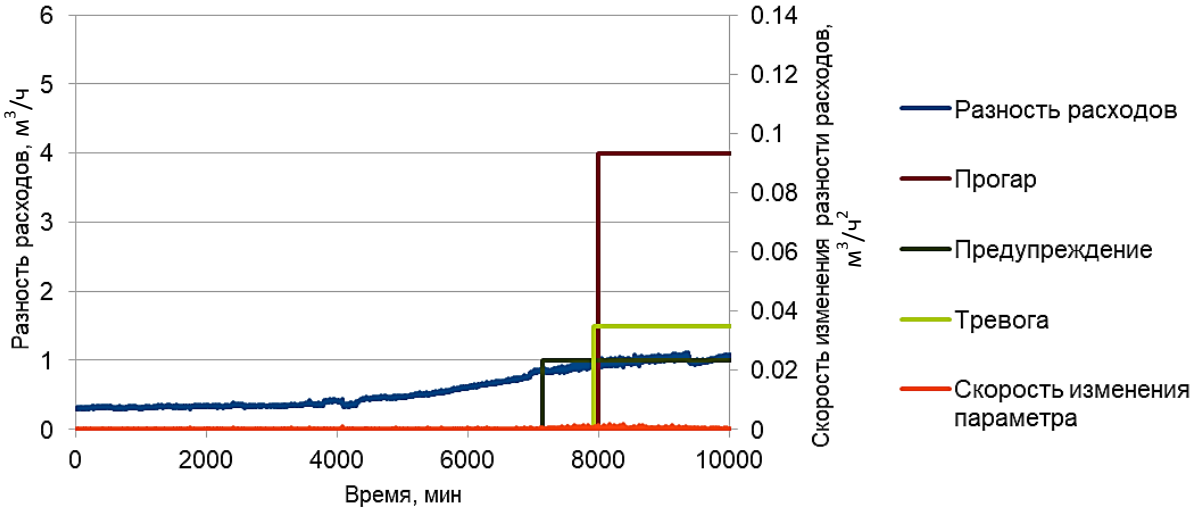

Рис. 8. Работа системы по данным от фурмы № 3 ДП 10

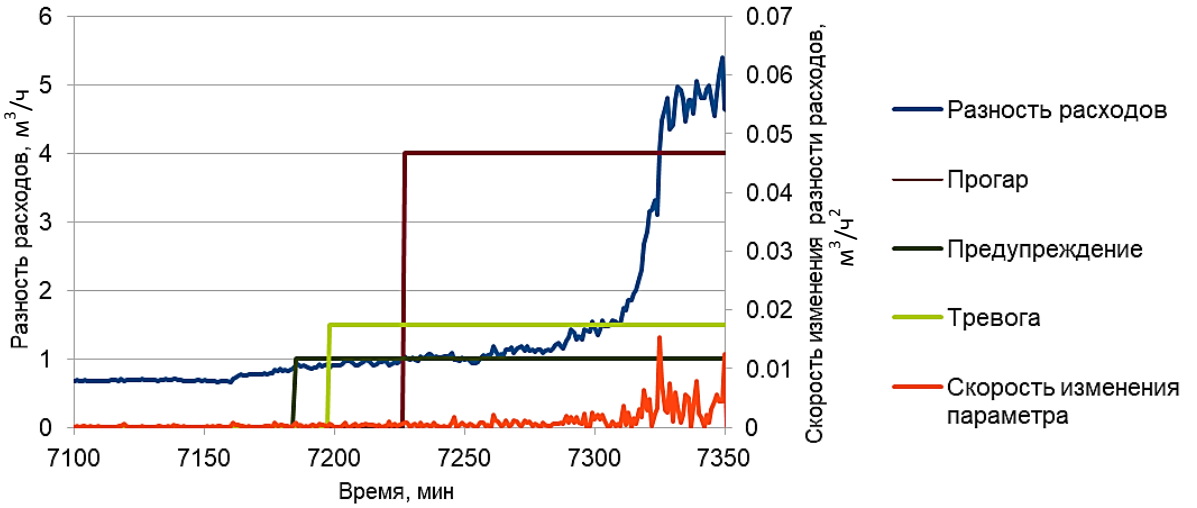

Рис. 9. Работа системы по данным от фурмы № 10 ДП 10

Фурмы № 3 и 10 выбраны как показательные по той причине, что характер прогара у них кардинально отличается. Фурма № 3 прогорала плавно и долго (это

благоприятные условия для системы), фурма № 10 – сравнительно быстро и лавинообразно, с максимально неблагоприятными условиями для прогнозирования прогара.

Для фурмы № 3 предупреждение было сформировано за 371 мин до прогара, а тревога – за 69 мин. Для фурмы № 10 предупреждение было сформировано за 42 мин до прогара, а тревога – за 29 мин. Подобные временные пределы оставляют персоналу достаточно времени для принятия решений.

Отметим, что оптимизация системы для ситуаций постепенного развития прогара позволяет сформировать предупреждение существенно раньше (в рассматриваемых случаях прогара фурм до трех суток).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система предварительного предупреждения о прогарах фурм доменной печи является перспективным направлением развития и усовершенствования автоматизации доменного процесса. Система основана на вовлечении накопленных технологических ретроспективных данных в решение задачи прогноза прогара. Система направлена на снижение числа аварийных остановок доменной печи. Это обеспечит более ровный ход печи, снизит возможности повреждения оборудования цеха при прогаре фурмы, максимально исключит риски для здоровья персонала. При этом не требуется внедрение нового оборудования или новых косвенных методов контроля, которые могут потребовать сложной адаптации к условиям работы конкретной печи или фурмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапитов Е.Б., Болкунова В.А., Шутов К.В. Численное моделирование теплового состояния водоохлаждаемой доменной фурмы при налипании расплава шлака на ее поверхность // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2011. № 4 (36). С. 73–74.

2. Патент СССР 29846. *Устройства для обнаружения прогара фурм и амбразур доменных печей* / Лопатин Н.В. Заявл. 25.04.1930. Опубл. 30.04.1933.

3. Смирнякова В.В. Анализ производственной безопасности предприятий металлургической отрасли // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* 2015. № S7. С. 669–675.

4. Патент СССР 1122703 *Система сигнализации автоматического контроля и контроля прогара воздушных фурм* / Муканов Д., Ткачук Е.И., Шелухин Н.И., Миникес Э.Э., Гамалей Э.И., Лысенков С.Н. Заявл. 22.08.1983. Опубл. 07.11.1984.

5. Патент РФ 2243265 *Способ обнаружения прогара охлаждаемого теплового агрегата* / Толпа В.А., Нецветов В.И., Туник О.А., Зосимова В.Г. Заявл. 04.11.2002. Опубл. 27.05.2004, Бюл. № 15.

6. Патент РФ 2613834 *Способ контроля работы воздушной фурмы доменной печи с теплоизоляцией со стороны дутьевого канала* / Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Заявл. 22.10.2017. Опубл. 21.03.2017, Бюл. № 9.

7. Бринза В.Н., Зеньковский М.М. Охрана труда в черной металлургии. М.: Металлургия. 1982. 336 с.

8. Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Скрипаленко М.М. Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей с помощью DEFORM 2D // *Металлург*. 2016. № 10. С. 14–17.

9. Титов В.Н., Сайфуллаев С.Д., Скрипаленко М.М., Терновых А.И., Сидоров А.А. Исследование теплоизолирующих материалов в качестве защиты от прогара воздушной фурмы доменной печи моделированием в среде DEFORM-2D // *Металлург*. 2020. № 5. С. 15–20.

10. Мешков К.В., Белокопытов Р.Н. Тенденции развития систем автоматизированного контроля прогара воздушных фурм доменных печей // *Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности*: *сборник научных статей V Международной научной конференции*. М.: ООО «Конверт», 2021. С. 25–28.

11. Рябчиков М.Ю., Тарасов М.А. Система предупреждения о прогарах фурм доменных печей // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. *Тезисы докладов 79-й Международной научно-технической конференции*. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2021. С. 360.

12. Патент СССР 1234437 *Способ контроля прогара воздушных фурм доменной печи* / Козодеров В.И., Рвдилов С.В., Пухов А.В., Сакиров А.Ф., Чернобривцев Б.Ф. Заявл. 22.02.1984. Опубл. 30.05.1986.

Для цитирования: Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Мухина Е.С., Тарасов М.А. Система оперативного предупреждения о прогаре фурмы доменной печи // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 3 (15). С. 91–103.

RAPID ALERT SYSTEM FOR BLAST FURNACE TUYERE BURNOUT

M.Yu. RYABCHIKOV, Cand. Sc., E.S. RYABCHIKOVA, Cand. Sc.,
E.S. MUKHINA, Senior Lecturer, M.A. TARASOV, Student

Nosov Magnitogorsk State Technical University, 38, Lenin Street,
455000, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: mr_mgn@mail.ru

The work is aimed at improving the existing methods for predicting tuyere burnout using a well-known technological parameter characterizing the drop in cooling water flow at the tuyere inlet and outlet. A distinctive feature of the proposed system is a two-level forecast in the form of an alert and a burnout warning. The forecast is based on an automated analysis of the retrospective data on the statistical properties of the drop in the cooling water flow rate. The paper gives examples of the changes dynamics in the difference of the of cooling water flow rate on the tuyere prior and directly during the burnout. We presented the structure of the alert system and examples of its operation in cases of gradual and avalanche-like development of the burnout.

Keywords: tuyere burnout, blast furnace, forecast, dispatch control, processing of retrospective data.

REFERENCES

1. Agapitov E.B., Bolkunova V.A., Shutov K.V. Numerical modeling of the thermal state of a water-cooled blast-furnace lance when molten slag adheres to its surface. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova.* 2011. No 4 (36), pp. 73–74.

2. Patent USSR 29846. *Ustroystva dlya obnaruzheniya progara furm i ambrazur domennykh pechey* [Devices for detecting burnout of lances and embrasures of blast furnaces]. Lopatin N.V. Declared 25.04.1930. Published 30.04.1933.

3. Smirnyakova V.V. Industrial safety analysis of enterprises of the metallurgical industry. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal).* 2015. No S7, pp. 669–675.

4. Patent USSR 1122703. *Sistema signalizatsii avtomaticheskogo kontrolya i kontrolya progara vozdushnykh furm* [Alarm system for automatic control and control of burnout of air lances]. Mukanov D., Tkachuk E.I., Shelukhin N.I., Minikes E.E., Gamaley E.I., Lysenkov S.N. Declared 22.08.1983. Published 07.11.1984.

5. Patent RF 2243265. *Sposob obnaruzheniya progara okhlazhdayemogo teplovogo agregata* [Method for detecting burnout of a cooled thermal unit]. Tolpa V.A., Netsvetov V.I., Tunik O.A., Zosimova V.G. Declared 04.11.2002. Published 27.05.2004, Bulletin No 15.

6. Patent RF 2613834. *Sposob kontrolya raboty vozdushnoy furmy domennoy pechi s teploizolyatsiyey so storony dutyevogo kanala* [Method for controlling the operation of the air lance of a blast furnace with thermal insulation from the side of the blast channel]. Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Declared 22.10.2017. Published 21.03.2017, Bulletin No 9.

7. Brinza V.N., Zenkovsky M.M. Okhrana truda v chernoy metallurgii [Occupational safety in ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 336 p.

8. Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Skripalenko M.M. Modeling the temperature field of blast furnace air tuyeres using DEFORM 2D. *Metallurg*. 2016. No 10, pp. 14–17.

9. Titov V.N., Saifullaev S.D., Skripalenko M.M., Ternovykh A.I., Sidorov A.A. Investigation of heat-insulating materials as protection against burnout of the air tuyere of a blast furnace by modeling in the DEFORM-2D environment. *Metallurg*. 2020. No 5, pp. 15–20.

10. Meshkov K.V., Belokopytov R.N. Trends in the development of systems for automated control of burnout of air tuyeres of blast furnaces. *Prioritetnyye napravleniya innovatsionnoy deyatelnosti v promyshlennosti: sbornik nauchnykh statey V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Moscow: OOO «Konvert», 2021, pp. 25–28.

11. Ryabchikov M.Yu., Tarasov M.A. Warning system about burnouts of blast furnace tuyeres. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya. Tezisy dokladov 79 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Magnitogorsk: Magnitogorskiy gosudarstvennyi tekhnicheskiy universitet im. G.I. Nosova 2021, p. 360.

12. Patent USSR 1234437. *Sposob kontrolya progara vozdushnykh furm domennoy pechi* [Method for controlling the burnout of air tuyeres of a blast furnace]. Kozoderov V.I., Rvdilov S.V., Pukhov A.V., Sakirov A.F., Chernobrivtsev B.F. Declared 22.02.1984. Published 30.05.1986.

Поступила в редакцию/received: 14.05.2022; после рецензирования/revised: 01.06.2022; принята/accepted: 16.06.2022