

**Библиографические ссылки**

1. Reghunadhan Nair C. P., Mathew D., Ninan K. N. Cyanate Ester Resins, Recent Developments // *Advances in Polymer Science*. 2001. Vol. 155. P. 84–87.
2. Hamerton I. Chemistry and technology of cyanate ester resins // Springer. 1994. Pp. 30–31, 116–117, 241–245.
3. Щербаченко Л. А., Карнаков В. А., Марчук С. Д. Исследование комплексной диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков при радиочастотах : метод. рекомендации. Иркутск, 2005. Иркут. гос. ун-т.
4. JEC Composites. Overview of the worldwide composites industry, 2010–2015. Source JEC Composites.
5. EX-1515 Resin System Technical Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: [www.tencate.com](http://www.tencate.com) (по состоянию на апрель 2013 г.).
6. Attarwala Shabbir. US Patent. No. 7,537,839 B1 (May 26th 2009).
7. Shimp D. A., Craig W. M. Jr. 34<sup>th</sup> Int. SAMPE Symp. 34. 1989. Pp. 1336–1346.
8. Pascault P. J., Williams R. J. J. Polym. Sci. 1990. Pp. 28–85. (Polym. Phys.).
9. Cheng Stiven Z. D. Handbook of thermal analysis and calorimetry // Elsevier Science. 2002. Vol. 3. Pp. 297.

**References**

1. Reghunadhan Nair C. P., Mathew D., Ninan K. N., Cyanate Ester Resins, Recent Developments, *Advances in Polymer Science*, 2001, vol. 155, pp. 84–87.
2. Hamerton I. Chemistry and technology of cyanate ester resins, Springer, 1994, pp. 30–31, 116–117, 241–245.
3. Shcherbachenko L. A., Karnakov V. A., Marchuk S. D. *Issledovanie kompleksnoi dijelektricheskoi pronicaemosti tverdykh dielektrikov pri radiochastotakh* (The study of complex permittivity of solid dielectrics at radio frequencies). GOU VPO IGU, Irkutsk, 2005.
4. JEC Composites, Overview of the worldwide composites industry, 2010–2015. Source JEC Composites.
5. EX-1515 Resin System Technical Data Sheet, available at [www.tencate.com](http://www.tencate.com) (accessed april 2013).
6. Attarwala Shabbir, US Patent. No. 7,537,839 B1 (May 26th 2009).
7. Shimp D. A., and Craig W. M. Jr., 34<sup>th</sup> Int. SAMPE Symp., 34, 1989, pp. 1336–1346.
8. Pascault P. J., Williams R. J., J. Polym. Sci., Polym. Phys, 1990, pp. 28–85.
9. Cheng Stiven Z. D., Handbook of thermal analysis and calorimetry. Elsevier Science, 2002, vol. 3, 297 p.

© Аристов В. Ф., Халиманович В. И., Миронович В. В., Ислентьева Т. А., Гуров Д. А., 2013

УДК 004.896(06)

**АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПЛАВИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ**

К. Н. Бискуб

Норильский индустриальный институт  
Россия, 663310, Норильск, ул. 50 лет Октября, 7. E-mail: [apissarev@yandex.ru](mailto:apissarev@yandex.ru)

*Описан алгоритм постоянной адаптации параметров математической модели объекта газоочистки с использованием наблюдающего устройства, который позволяет повысить точность управления объектом. При этом адаптируются исключительно те параметры математической модели, которые позволяют в первую очередь снизить ошибку прогнозирования, учитывая наличие шумов в сигналах входных факторов ММ объекта газоочистки.*

*Ключевые слова: технологические газы, прогнозирующая система управления, скруббер-охладитель, адаптивное управление.*

**ADAPTIVE OBSERVER OF PREDICTING SYSTEM OF PROCESS CONTROL FOR COOLING GASES OF MELTING FURNACE**

K. N. Biskub

Norilsk industrial institute  
7 50 years of October, Norilsk, 663310, Russia. E-mail: [apissarev@yandex.ru](mailto:apissarev@yandex.ru)

*The article describes an algorithm that continuously adapt parameters of the mathematical model of the object using a scrubbing observing device that improves the accuracy of object control. In this case only those parameters of the mathematical model are adapted which allow, first of all, to reduce the prediction error, taking into account the noise in the signals of input factors MM gas treatment facility.*

*Keywords: process gases, the predictive control system, scrubber-cooler, adaptive control.*

Процесс плавки медно-никелевого материала в плавильных электропечах на Надеждинском металлургическом заводе имени Колесникова Б. И. (ЗФ ОАО «Норильский никель») сопровождается выделением технологического газа, содержащего  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  и пыль цветных металлов. Для исключения выбросов неочищенного газа в атмосферу предусмотрена газоочистка, которая осуществляется в два этапа. Первый этап происходит в мокром механическом пылеуловителе – скруббере-охладителе, в котором улавливается крупная фракция пыли. Второй этап очистки осуществляется в сухом механическом пылеуловителе – рукавном фильтре, в котором улавливается более мелкая фракция пыли.

Многочисленные наблюдения, проводимые в области эксплуатации систем управления процессом охлаждения технологический газ плавильных электропечей, показывают, что, несмотря на постоянно совершенствующиеся принципы и методы управления, не решена задача предотвращения аварийных отключений технологического оборудования очистки технологического (отходящего) газа [1].

В ходе исследований были выявлены следующие наиболее вероятные причины аварийных отключений технологических систем охлаждения и очистки газов из-за превышения критических значений температуры технологических газов  $260\text{ }^\circ\text{C}$ :

1. Резкий рост температуры технологических газов в результате заливки конвертерного шлака, сопровождающегося стремительным ростом температуры в плавильной электропечи.

2. Включение системы очистки газов после останова, при которой возникает тепловой удар по рукавным фильтрам вследствие неточной первичной установки управляющих воздействий.

Снижение количества аварийных отключений возможно за счет прогнозирующей системы управления, основной целью которой является поддержание постоянного значения температуры технологических газов плавильных электропечей. Поэтому целью управления является минимизация среднеквадратической ошибки:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ПЛ}}} \int_0^{T_{\text{ПЛ}}} (T_3 - T_{\text{Ф}})^2 dt} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $T_{\text{Ф}}$  – фактическое значение температуры технологических газов;  $T_3$  – заданное значение температуры технологических газов;  $\sigma$  – целевая функция оптимизации;  $T_{\text{ПЛ}}$  – продолжительность плавки медно-никелевого материала в плавильной печи.

При этом система должна адаптироваться к изменяющимся характеристикам объекта управления за счет использования современных методов адаптивного управления.

Решается поставленная задача путем математического моделирования и экспериментальным тестированием на реальном объекте.

Для получения математических моделей системы управления процессом охлаждения технологических газов при их очистке использовались данные факторного эксперимента. Обработка экспериментальных данных проводилась методами корреляционного анализа. При идентификации математических моделей использовался градиентный спуск первого порядка. Разработанные модели представлены в виде нелинейных регрессионных моделей с элементами динамики.

Разработанные автором модели объекта управления и регулятора позволили реализовать прогнозирующую систему управления (рис. 1) [2].

Прогнозирующая система управления состоит из четырех блоков. Блок «Адаптивный наблюдатель» представляет собой устройство наблюдения, адаптирующее все параметры математической модели скруббера-охладителя (ММСО) к требуемым значениям для оптимального качества управления. К таким параметрам относятся регулируемая величина, возмущения и управляющие воздействия.

Блок «Прогнозатор» – устройство прогнозирования температуры технологических газов скруббера-охладителя на 15 мин, использующее его математическую модель.

Блок «Регулятор» – прогнозирующий регулятор, использующий математическую модель прогнозирующего регулятора, при этом может иметь различное количество управляющих воздействий в зависимости от режима управления.

Блок «Скруббер-охладитель» – объект управления.

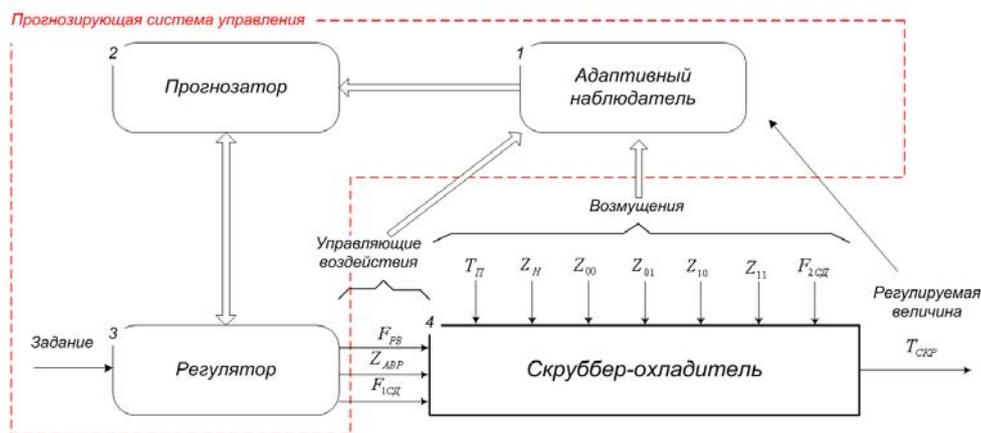


Рис. 1. Структурная схема прогнозирующей системы управления

Важной особенностью прогнозирующей системы управления является наличие в структуре системы блока адаптивного «наблюдателя», который позволяет компенсировать, кроме вышеуказанных возмущений, следующие возмущения:

- 1) нестабильность параметров модели объекта управления и характеристик датчиков;
- 2) снижение герметичности установки очистки газов во время ее отключения из-за изнашивания запирающих клапанов рукавных фильтров и направляющей задвижки перед дымососом.

Для точной оценки параметров математической модели (ММ) объекта управления  $K_0, K_1, \dots, K_6, T_0, T_1, \tau_0, \tau_1$  был использован метод наименьших квадратов (МНК – идентификация), т. е. метод оценки параметров математической модели путем минимизации квадратической ошибки:

$$J(M) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (T(M)_i - T_{i\ominus})^2 \rightarrow \min,$$

где  $M = \{K_0, K_1, \dots, K_6, T_0, T_1, \tau_0, \tau_1\}$  – точка многомерного пространства (параметры ММ скруббера-охладителя),  $T(M)_i$  – рассчитанное значение температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя на  $i$ -шаге;  $T_{i\ominus}$  – экспериментальное значение температуры технологических газов на выходе скруббера-охладителя на  $i$ -шаге.

В качестве алгоритма МНК-идентификации математической модели используется градиентный спуск

первого порядка [3]. На рис. 2 указаны параметры ММ, участвующие в адаптации.

Алгоритм адаптации запускается в каждом цикле управления скруббером-охладителем (1 раз в секунду). Сначала рассчитываются статистические показатели всех факторов за последние 1 000 с:  $T_{\Pi}, F_{PB}, Z_{ABP}, Z_{00}, Z_{01}, Z_{10}, Z_{11}, Z_H, F_{1CD}, F_{2CD}$ .

Статистические показатели следующие:

– математическое ожидание

$$M[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество элементов в выборке (равное 1000 элементам),  $x_i$  –  $i$ -й элемент выборки;

– дисперсия

$$D[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M[X])^2; \quad (2)$$

– среднеквадратическое отклонение

$$\sigma[X] = \sqrt{D[X]}; \quad (3)$$

– коэффициент изменения

$$R[X] = \frac{\sigma[X] - \sigma_{\min}[X]}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\min}[X]$  – уровень шума фактора,  $X_{\max}$  – максимальный диапазон варьирования фактора,  $X_{\min}$  – минимальный диапазон варьирования фактора.

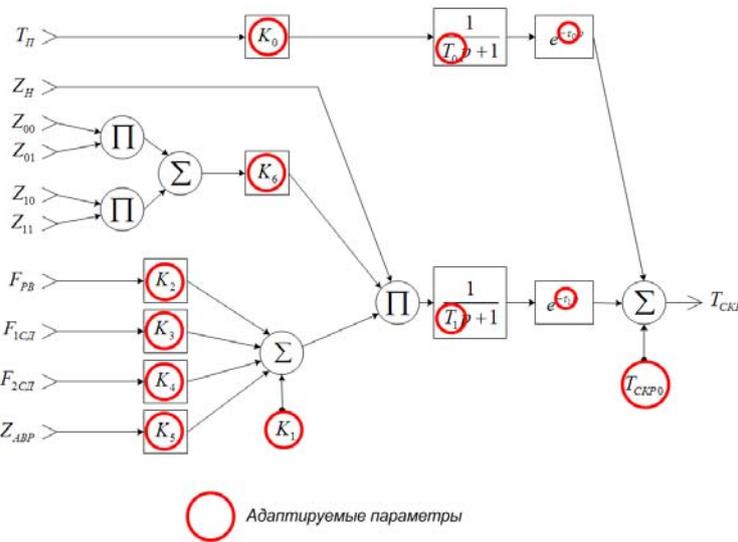


Рис. 2. Параметры математической модели скруббера-охладителя, поддающиеся адаптации:

- $T_{\Pi}(t)$  – переменная температура в печи;  $T_0, T_1$  – постоянные времена;  $\tau_0, \tau_1$  – время запаздывания;  
 $Z_{00}, Z_{01}, Z_{10}, Z_{11}$  – относительные положения входных и выходных запирающих клапанов первого и второго рукавных фильтров соответственно;  $Z_H(t)$  – переменное положение направляющей задвижки;  $Z_{ABP}$  – относительное положение аварийной задвижки;  $F_{PB}(t)$  – переменный расход распылительной воды, подаваемой в скруббер;  $F_{1CD}, F_{2CD}$  – расход воздуха на первой и второй ступени дожига CO;  $K_0, \dots, K_5$  – коэффициенты регрессии;  $K_6$  – нормирующий коэффициент;  $T_{CKP}(t)$  – переменная температура технологических газов на выходе скруббера-охладителя;  
 $T_{CKP0}$  – начальная температура технологических газов в скруббере-охладителе

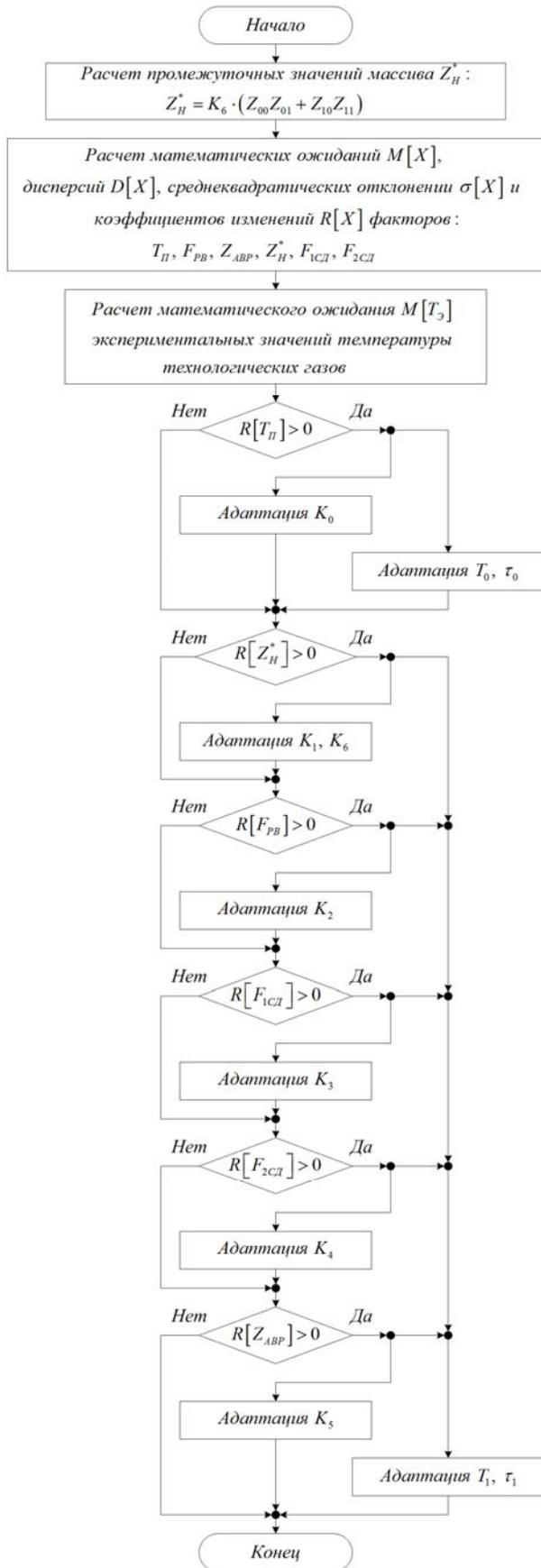


Рис. 3. Блок-схема алгоритма параметрической адаптации

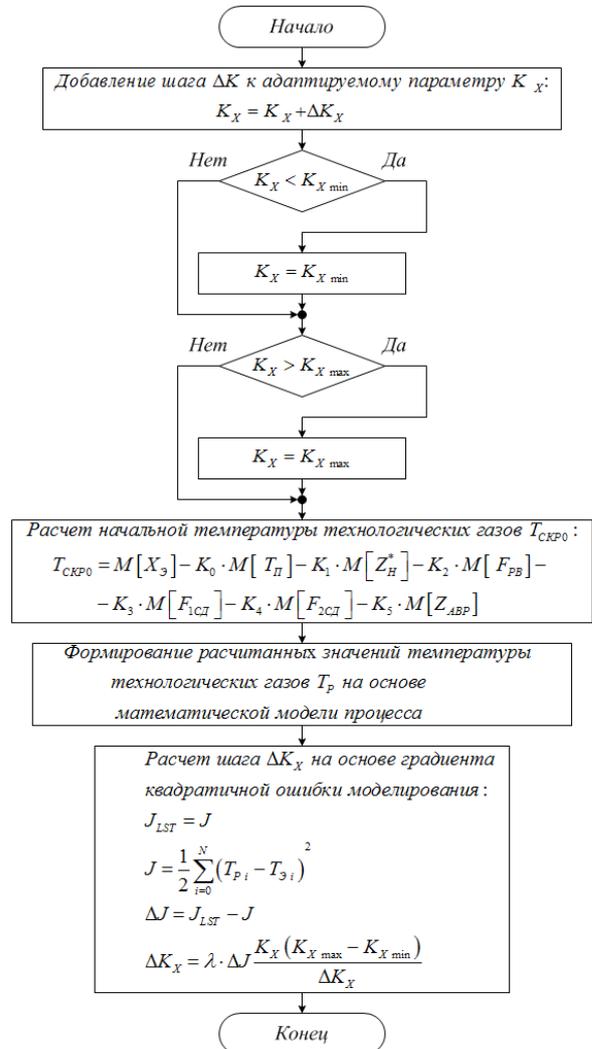


Рис. 4. Блок-схема алгоритма адаптации отдельного параметра ММ:

$\lambda$  – коэффициент адаптации, влияющий на скорость поиска локального минимума в многомерном пространстве  $J(M)$

Коэффициент изменения  $R[X]$  был разработан автором с целью отображения степени изменения фактора относительно своего диапазона варьирования с учетом наличия шума у фактора  $\sigma_{\min}[X]$ , т. е. коэффициент изменения становится больше нуля, когда уровень среднеквадратического отклонения превышает уровень шума. В дальнейшем этот коэффициент используется для определения параметров ММ, которые необходимо оптимизировать с целью снижения ошибки прогнозирования.

Алгоритм параметрической адаптации ММ процесса охлаждения технологических газов в скруббере-охладителе представлен блок-схемой (рис. 3).

Особенность данного алгоритма заключается в том, что он применяется для оптимизации всех адаптируемых параметров ММ: коэффициентов регрессии  $K_0 \dots K_5$ , постоянных времени  $T_0, T_1$  и величин времени запаздывания  $\tau_0, \tau_1$ . Также в алгоритме присутствует проверка на их граничные условия.

Алгоритм адаптации отдельного параметра  $K_X$  ММ процесса охлаждения технологических газов в скруббере-охладителе представлен блок-схемой на рис. 4.

Для проверки работоспособности алгоритма адаптации параметров ММ во время управления объектом был проведен эксперимент, в ходе которого создавались циклические контролируемые возмущения. В качестве возмущения был принят расход 1-й ступени дожига CO, а в качестве управляющего воздействия,

которое должно компенсировать это возмущение – расход распылительной воды (рис. 5).

Как видим, первые импульсы вызывали большие отклонения температуры технологических газов от задания, чем последние. И каждый последующий импульс вызывал все меньшие отклонения. Это связано с тем, что ПСУ во время управления скруббером следила за адекватностью ММ и подстраивала ее параметры, чтобы повысить прогнозирующую способность (рис. 6). В начале этого эксперимента параметры ММ были равны  $K_2 = -20$  и  $K_3 = -50 \cdot 10^{-3}$ , при этом среднеквадратическая ошибка была равна  $J(M) = 27$ . Но в ходе проведения эксперимента параметры ММ изменились и стали равны  $K_2 = -39,7$  и  $K_3 = -24,3 \cdot 10^{-3}$ , тем самым ошибка прогнозирования  $J(M) = 5$  в итоге снизилась.

Для сравнения, подобный эксперимент с контролируемым циклическим возмущением опасен для ПИ-регулятора, так как вызывает колебания температуры технологических газов, близких к критическим значениям (рис. 7).

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Разработан алгоритм для адаптации параметров математической модели скруббера-охладила с целью минимизации среднеквадратической ошибки.

2. Экспериментальные исследования разработанной системы управления с адаптивным наблюдателем показали существенное улучшение качественных показателей управления по сравнению с типовой системой, работающей по ПИ-алгоритму.

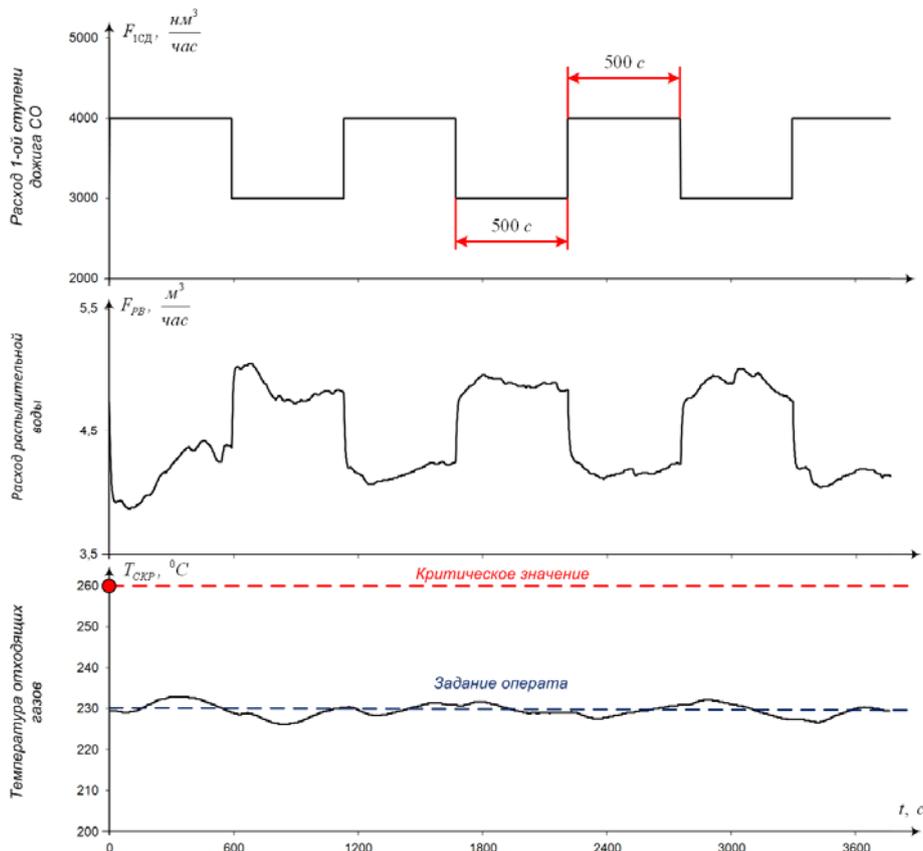


Рис. 5. Графики эксперимента с циклическим возмущением во время управления ПСУ

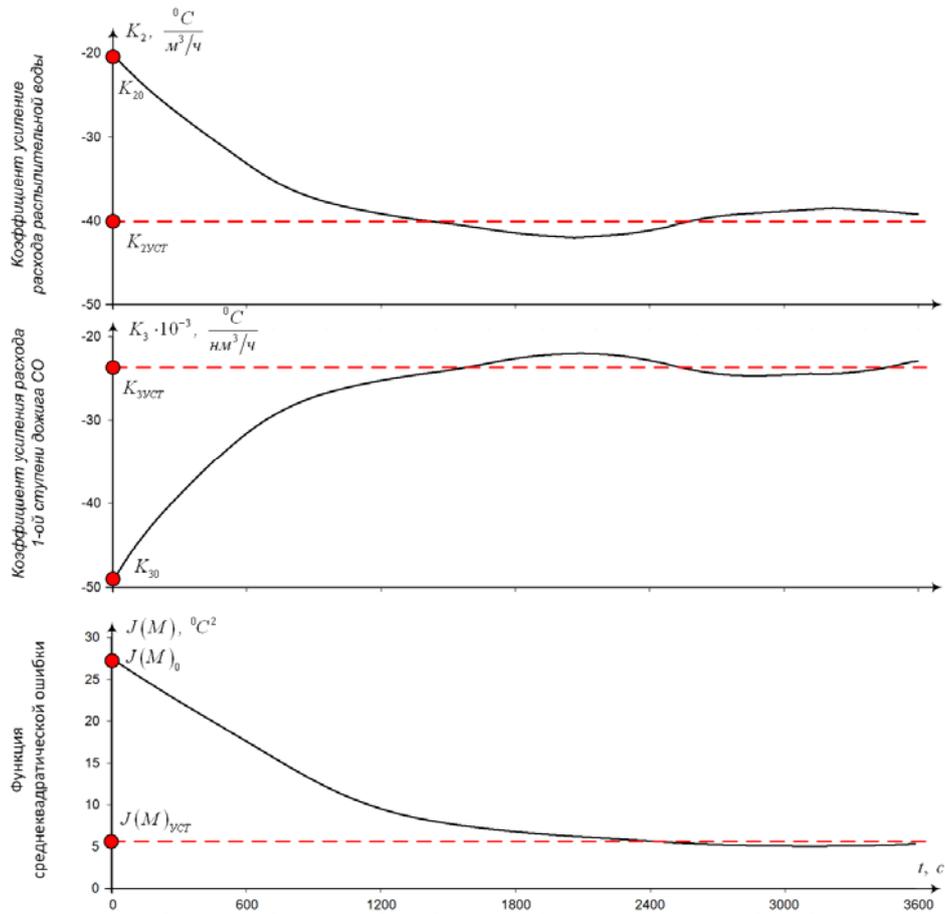


Рис. 6. Динамика изменения параметров ММ и ошибки прогнозирования

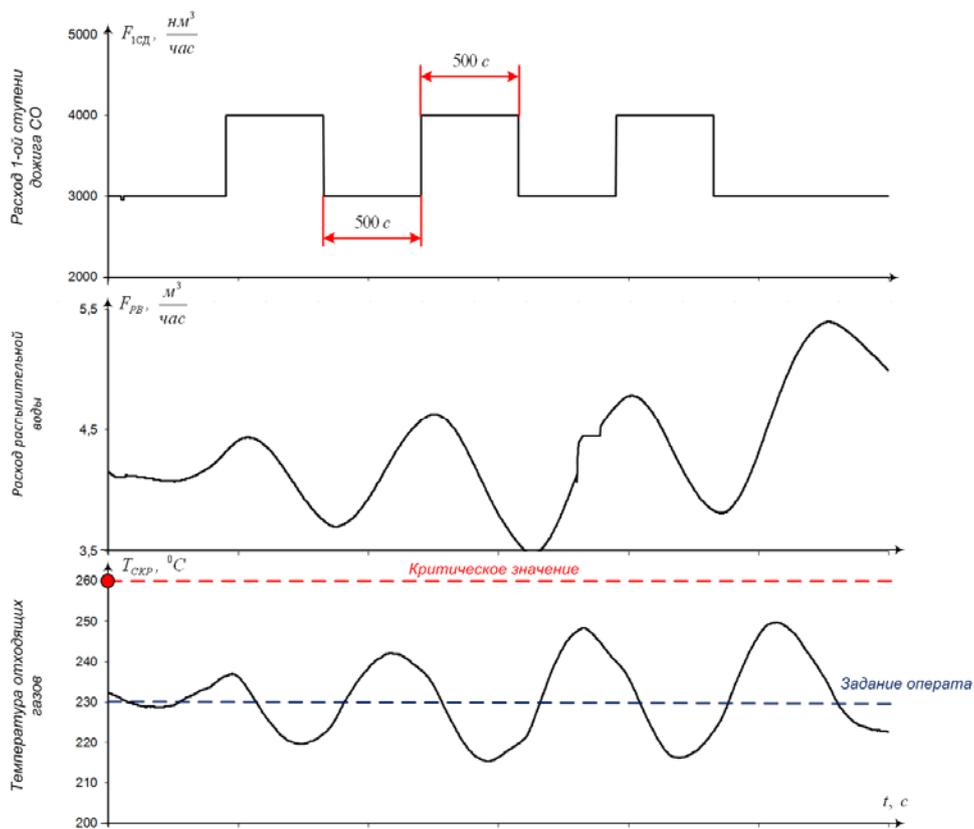


Рис. 7. Графики эксперимента с циклическим возмущением во время управления ПИ-регулятора

**Библиографические ссылки**

1. Бискуб К. Н., Писарев А. И. Математическая модель охлаждения технологических газов плавильных электропечей // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2010. Вып. 6 (113). С. 81–86. (Сер. 6. Информатика, телекоммуникации, управление.)
2. А. с. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011610292. Прогнозирующая система управления процессом охлаждения технологических газов плавильной электропечи (версия 2.0) / Бискуб К.Н. ; дата рег. 12.10.2010.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М. : Мир, 1985. С. 213–245.

**References**

1. Biscub K. N., Pisarev A. I. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb GPU*, no. 6. Computer science, telecommunications, management, 2010, vol. 6 (113), pp. 81–86.
2. Certificate of state. registration of the computer № 2011610292, registered in the Registry of the computer programs 12.10.2010. *Prognozirujushhaja sistema upravlenija processom ohlazhdenija tehnologicheskikh gazov plavil'noj jelektropechi* (Predictive process control system cooling process gases melting furnaces) (version 2.0), Biskub K. N.
3. Gill F., Murrey U., Rite M. *Prakticheskaja optimizacija* (Practical Optimization). Moscow, Mir, 1985, pp. 213–245.

© Бискуб К. Н., 2013

УДК 621.791

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ  
ТОЛСТОСТЕННЫХ ИЗЛОЖНИЦ ИЗ ХРОМОВОЙ БРОНЗЫ  
ДЛЯ ВЫПЛАВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СЛИТКОВ ТИТАНА**

В. В. Богданов<sup>1</sup>, Ю. Г. Новосельцев<sup>2</sup>, С. А. Готовко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: sibniitm@yandex.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
Россия, 660074, Красноярск, ул. Академика Киренского, 26. E-mail: gefest\_61@mail.ru

*Тангенциальный ввод в плазматрон бинарной плазмообразующей инертной смеси газов положительно влияет на сварочный процесс по ряду параметров, но вихревое состояние плазменной дуги при этом вызывает подсос воздуха, что ведет к окислению металла и его хрупкости. При плазменной сварке изложниц из хромовой бронзы БрХ08 во избежание охрупчивания металла шва необходимо содержание в нем хрома в пределах 0,8...1,2 %. Это обеспечивается применением присадка порошковой проволоки, где 22 % Cr и 2 % Ti.*

*Ключевые слова:* плазменная сварка, хромовая бронза, изложница кристаллизатора, горячие трещины, эвтектика, порошковая проволока.

**METALLURGICAL FEATURES OF PLASMA WELDING  
OF THICK-WALLED MOLDS MADE OF CHROMIUM BRONZE  
FOR SMELTING LARGE TITANIUM INGOTS**

V. V. Bogdanov<sup>1</sup>, Yu. G. Novoselcev<sup>2</sup>, S. A. Gotovko<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 “Krasnoyarsky Rabochy” prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: sibniitm@yandex.ru

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
26 Kirenskiy st., Krasnoyarsk, 660074, Russia. E-mail: gefest\_61@mail.ru

*Tangential entry of binary plasma-formed inert gas mixture into plasmotron positively influences on the welding process for a number of parameters, but the vortex state of the plasma arc event causes air inflow, resulting in oxidation of the metal and its fragility. To avoid embrittlement of the metal welded by plasma welding of chromium bronze molds BrH08, the content of chromium in the range 0,8...1,2 % is required. This is provided by the use of the additive powder wire with 22 % Cr and 2 % Ti.*

*Keywords:* plasma welding, chrome bronze, mold of the crystallizer, hot cracks, eutectic, cored wire.