

# Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика Metallurgical heat and power engineering

Научная статья  
УДК 669.046:621.783.2  
DOI: 10.14529/met260207

## ОБ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

**В.И. Панферов**, [panferovvi@susu.ru](mailto:panferovvi@susu.ru)

**С.В. Панферов**, [panferovsv@susu.ru](mailto:panferovsv@susu.ru)

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

**Аннотация. Введение.** В условиях повышения требований к качеству и экономичности процесса нагрева металла перед прокаткой задача создания и совершенствования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) нагревательных печей, в том числе и их локальных подсистем, является вполне актуальной. **Цель исследования:** изучить зависимость коэффициента передачи нагревательных печей по каналу «расход топлива – температура рабочего пространства» от теплофизических характеристик процесса нагрева. Разработать алгоритмическое обеспечение программно-аппаратной системы автоматического регулирования (САР), обеспечивающей приемлемое качество стабилизации температуры рабочего пространства. **Материалы и методы.** Проведен анализ литературных данных по рассматриваемой проблеме и рассмотрены предлагаемые в литературе варианты решений. **Результаты.** Приведены теоретические выкладки, объясняющие наблюдаемые в эксплуатационных условиях закономерности изменения коэффициента передачи по каналу «расход топлива – температура рабочего пространства» от характеристик процесса нагрева. Получены различные варианты представления зависимости коэффициента передачи от влияющих переменных и выполнено необходимое вычислительное исследование. Предложена структура наиболее предпочтительного варианта реализации адаптивной САР. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании алгоритмического обеспечения АСУ ТП нагревательных печей.

**Ключевые слова:** нагрев металла, автоматизированная система управления технологическим процессом, методическая печь, стабилизация температуры рабочего пространства, коэффициент передачи, адаптивная система, качество переходного процесса

**Для цитирования:** Панферов В.И., Панферов С.В. Об автоматической стабилизации температуры рабочего пространства нагревательных печей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2026. Т. 26, № 2. С. 75–83. DOI: 10.14529/met260207

Original article  
DOI: 10.14529/met260207

## ON AUTOMATIC STABILIZATION OF THE WORKING SPACE TEMPERATURE OF HEATING FURNACES

**V.I. Panferov**, [panferovvi@susu.ru](mailto:panferovvi@susu.ru)

**S.V. Panferov**, [panferovsv@susu.ru](mailto:panferovsv@susu.ru)

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

**Abstract. Introduction.** In the context of increasing requirements for the quality and efficiency of the metal heating process before rolling, the task of creating and improving the algorithmic support of automated process control systems (APCS) for reheating furnaces, including their local subsystems, is quite relevant. **Purpose of the study.** To study the dependence of the transmission coefficient of reheating furnaces along the “fuel consumption – working space temperature” channel on the thermophysical characteristics

of the heating process. To develop algorithmic support for a software and hardware automatic control system (ACS) that ensures an acceptable quality of stabilization of the working space temperature. **Materials and Methods.** An analysis of the literature data on the problem under consideration was carried out and solution options proposed in the literature were considered. **Results.** Theoretical calculations are presented that explain the patterns of change in the transmission coefficient along the “fuel consumption – working space temperature” channel on the heating process characteristics, observed under operating conditions. Various options for representing the dependence of the transmission coefficient on the influencing variables were obtained and the necessary computational study was carried out. The structure of the most preferable option for implementing the adaptive ACS is proposed. **Conclusion.** The results of the work can be used in the development and improvement of algorithmic support for automated process control systems for heating furnaces.

**Keywords:** metal heating, automated process control system, continuous furnace, working space temperature stabilization, transmission coefficient, adaptive system, transient process quality

**For citation:** Panferov V.I., Panferov S.V. On automatic stabilization of the working space temperature of heating furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2026;26(2):75–83. (In Russ.) DOI: 10.14529/met260207

## Введение

В работе [1] экспериментально показано, что коэффициент передачи печей по каналу «расход топлива – температура рабочего пространства» существенно изменяется при изменении тепловой нагрузки. Для обеспечения постоянного характера переходного процесса при автоматической стабилизации температуры рабочего пространства в [1] предложено изменять коэффициент передачи ПИ-регулятора (пропорционально-интегрального регулятора) в зависимости от изменения расхода топлива. Вместе с тем в работах [2, 3] указано, что изменение расхода топлива не полностью характеризует изменение коэффициента передачи объекта, утверждается, что его значение меняется вообще-то в зависимости от изменения реального теплопоглощения нагреваемого металла. Поэтому в [2, 3] для печей периодического действия коррекция динамических свойств системы автоматического регулирования (САР) осуществляется в зависимости от расхода топлива и температуры уходящих продуктов сгорания, дающих якобы «...полную (косвенную) информацию об изменении теплопоглощения» [3, с. 155] нагреваемого металла. Причем и в работе [1], и в работах [2, 3] указанные зависимости определялись экспериментально, без выявления структуры связи коэффициента передачи с указанными и, возможно, другими факторами и, понятно, без ее анализа, никаких теоретических выкладок по этому вопросу как в работах [1–3], так и в других литературных источниках, насколько нам известно, нет.

В целом вполне обоснованно можно отметить, что проблема качественной стабилизации температуры рабочего пространства печей не является окончательно решенной, остается актуальной и до настоящего времени (см., например, [4]), Неясно, в частности, все ли факторы, влияющие на коэффициент передачи, выявлены.

## Постановка задачи

Как нам представляется, расход топлива и температура уходящих продуктов сгорания характеризуют изменение теплопоглощения металла по ходу нагрева только при неизменном стабилизируемом значении температуры рабочего пространства в процессе работы печи. При изменении стабилизируемого значения температуры рабочего пространства по ходу нагрева эта информация оказывается недостаточной для оценки теплопоглощения металла, а следовательно, и коэффициента передачи объекта регулирования. Кроме того, предложенный в [2, 3] способ коррекции динамических свойств САР неприемлем для многозонных методических печей с противоточным движением металла и газов и имеющих общую дымовую трубу для всех зон. Понятно, что в этом случае параметры коррекции следует выбирать на основе анализа теплового баланса зон.

К месту также заметим, что нагрев металла с неизменной стабилизируемой температурой рабочего пространства по всему ходу нагрева в настоящее время применяется все реже. Для снижения расхода топлива в целом на

нагрев заготовок, уменьшения потерь металла с окалиной и т. п. все чаще применяют оптимальные режимы нагрева, которые требуют изменения по ходу нагрева стабилизируемого значения температуры рабочего пространства [5]. Поэтому учет изменения динамических свойств объекта управления при изменении стабилизируемого значения температуры рабочего пространства является достаточно важным.

Таким образом, для построения высококачественных САР температуры рабочего пространства нагревательных печей необходимо прежде всего выявить структуру зависимости коэффициента передачи объекта регулирования от теплофизических факторов процесса нагрева и выполнить ее детальное исследование как на качественном, так и на количественном уровнях. Другими словами, необходимо установить причинно-следственные связи между характеристиками процесса нагрева металла и коэффициентом передачи. Только при успешном решении этой задачи можно добиться удовлетворительного решения задачи стабилизации температуры в зонах печей.

#### Теоретический анализ исходных данных задачи

Известно, что теплота, вносимая в рабочее пространство печи –  $Q_{\text{общ}}$ , расходуется на компенсацию тепловых потерь печи вследствие теплопроводности кладки, излучения через открытые окна печи (загрузочные, разгрузочные, смотровые) и т. п. –  $Q_1$ , на нагрев металла –  $Q_2$  и теряется с уходящими продуктами сгорания –  $Q_{\text{ух}}$ , т. е.

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + Q_{\text{ух}}. \quad (1)$$

При этом отметим, что достаточно точно можно утверждать следующее:  $Q_{\text{общ}} = Q_{\text{общ}}(G)$  является функцией расхода топлива  $G$ ;  $Q_1 = Q_1(t_{\text{рп}})$  при прочих равных условиях является функцией температуры рабочего пространства  $t_{\text{рп}}$ ;  $Q_2 = Q_2(t_{\text{рп}}, t_{\text{пм}})$  является функцией двух аргументов: температуры рабочего пространства  $t_{\text{рп}}$  и температуры поверхности нагреваемого металла  $t_{\text{пм}}$ ;  $Q_{\text{ух}} = Q_{\text{ух}}(G, t_{\text{ух}})$  является функцией расхода топлива  $G$  и температуры уходящих продуктов сгорания  $t_{\text{ух}}$ . На основании этого уравнение (1) можно переписать в неявном виде как

$$F(G, t_{\text{рп}}, t_{\text{пм}}, t_{\text{ух}}) = 0. \quad (2)$$

Как известно,  $t_{\text{ух}}$  является функцией  $t_{\text{рп}}$  (для камерных печей, например, обычно считается, что  $t_{\text{ух}} = t_{\text{рп}}$  [6; 7, с. 19]), поэтому равенство (2) можно представить следующим образом:

$$F_1(G, t_{\text{рп}}, t_{\text{пм}}) = 0. \quad (3)$$

Конкретно, согласно, например [1, 6, 8, 9] данное соотношение представляется в виде

$$G - M_0 \frac{t_{\text{рп}} - t_{\text{пм}}}{T_p - t_{\text{рп}}} - M_{\text{хх}} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $M_0$  – некоторая величина;  $T_p$  – теоретическая температура горения топлива;  $M_{\text{хх}}$  – мощность холостого хода.

К месту заметим, что в литературе это соотношение применяется как при анализе статических, так и динамических режимов [1, 8–11], в частности, при отыскании оптимальных по расходу топлива режимов нагрева металла [8, 10, 11], т. е. взаимосвязь (4) является практически безынерционной. Кроме того, если проанализировать уравнение (4), то нетрудно заметить, что в нем содержится разность температур  $(t_{\text{рп}} - t_{\text{пм}})$ , это и является подтверждением того, что на взаимосвязь влияет именно реальное теплопоглощение нагреваемого металла, что согласуется с утверждением работ [2, 3]. Однако в (4) дополнительно включается отдельный параметр  $t_{\text{рп}}$ , следовательно, кроме теплопоглощения нужно учитывать еще и саму температуру рабочего пространства печи, что вообще-то не отмечалось в работах [2, 3].

На рис. 1 представлен общий характер зависимостей (4) расхода топлива от температуры поверхности металла при различных стабилизируемых температурах рабочего пространства.

Как видно из рис. 1, а также и из соотношения (4), при  $t_{\text{рп}} = \text{const}$  эти зависимости линейные и разные, с разным значением углового коэффициента прямых. Расход топлива растет как при уменьшении температуры поверхности металла (при росте его теплопоглощения), так и при увеличении поддерживаемого на постоянном уровне значения температуры рабочего пространства. Зависимость же  $G = G(t_{\text{рп}})$  при  $t_{\text{пм}} = \text{const}$  нелинейная и возрастающая.

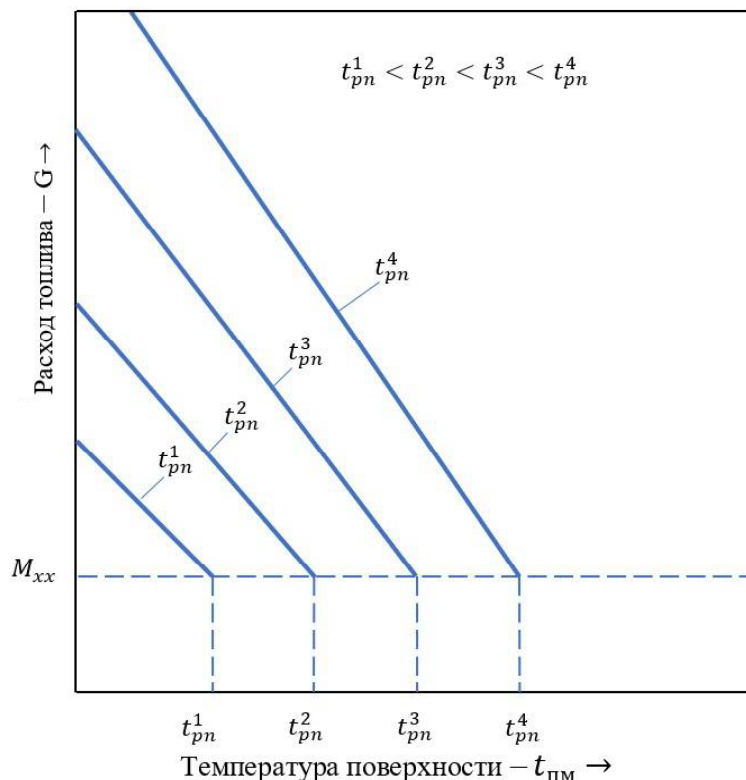


Рис. 1. Зависимость расхода топлива от температуры поверхности металла в печи для различных стабилизируемых значений температуры рабочего пространства

Fig. 1. Dependence of fuel consumption on the metal surface temperature in the furnace for various stabilized values of the working space temperature

### Вычисление коэффициента передачи по каналу «расход топлива – температура рабочего пространства»

Используя уравнение (4), вычислим, что коэффициент передачи по каналу «расход топлива – температура рабочего пространства» определяется как

$$K_{об} = \frac{\partial t_{рп}}{\partial G} = \frac{1}{\frac{\partial G}{\partial t_{рп}}} = \frac{(T_p - t_{рп})^2}{M_0[(T_p - t_{пм}) - \frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}}(T_p - t_{рп})]}. \quad (5)$$

Если учесть, что из (4) следует, что

$$T_p - t_{рп} = \frac{M_0(t_{рп} - t_{пм})}{G - M_{хх}}, \quad (6)$$

то формула для коэффициента передачи может быть записана следующим образом:

$$K_{об} = \frac{(T_p - t_{рп})^2}{M_0[(T_p - t_{пм}) - \frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}}(T_p - t_{рп})]} = M_0 \frac{(t_{рп} - t_{пм})^2}{(G - M_{хх})^2[(T_p - t_{пм}) - \frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}}(T_p - t_{рп})]}. \quad (7)$$

Здесь явно указывается на выявленную экспериментально [1] зависимость  $K_{об}$  от расхода топлива  $G$ .

Величина  $\frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}}$  может быть определена приближенно, например, на основании решения уравнения теплопроводности для бесконечной пластины при  $t_{рп} = \text{const}$  [6]:

$$\frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}} = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_i \cos \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \cdot \exp(-\mu_i^2 \frac{a \tau}{L^2}). \quad (8)$$

Здесь  $\mu_i$  – корни уравнения  $\lambda \mu / \alpha = \text{ctg}(\mu L)$ ;  $\lambda$ ,  $a$  – соответственно коэффициент теплопроводности и температуропроводности нагреваемого металла;  $L$  – его расчетная толщина;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\tau$  – время.

На рис. 2 представлен график зависимости  $\frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}}$  от времени  $\tau$  при  $a = 0,02 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $L = 0,1 \text{ м}$ ;  $\lambda = 29 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha = 350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

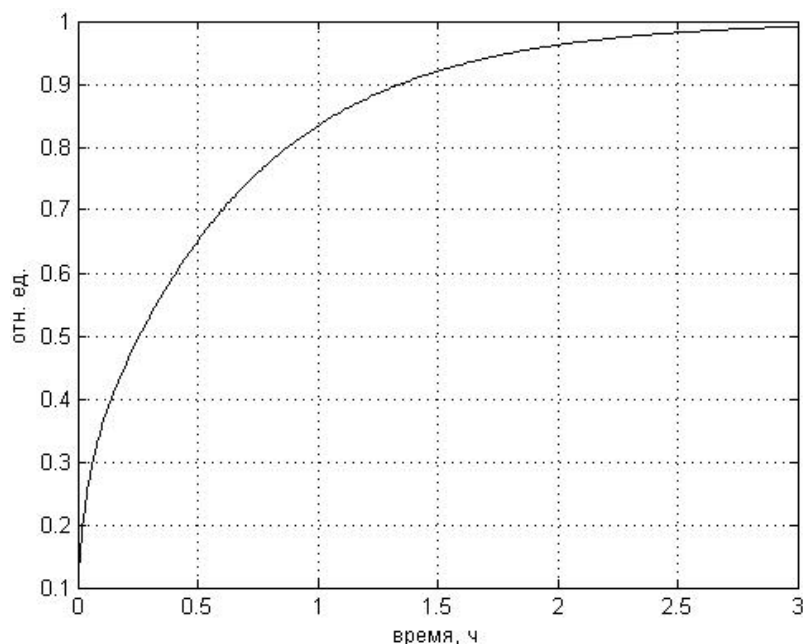


Рис. 2. Зависимость производной  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}$  от времени при постоянной температуре рабочего пространства печи  $t_{\text{рп}}$

Fig. 2. Dependence of the derivative  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}$  on time at a constant temperature of the furnace working space  $t_{\text{рп}}$

Как видно из рис. 2, в процессе нагрева производная  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}$  растет от нуля и в пределе стремится к единице:  $0 \leq \frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}(\tau) \leq 1$ . В первом приближении, учитывая фактическое время нагрева металла, например, в зонах методической печи, можно считать, что  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}} \approx 0,5$ .

С учетом соотношения (8) формулу для коэффициента передачи можно переписать в виде

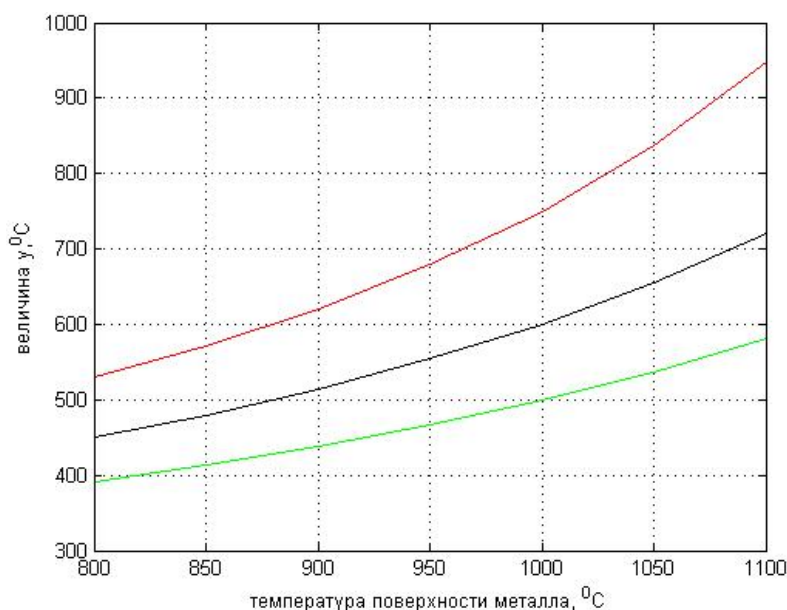
$$K_{\text{об}} = \frac{(T_{\text{р}} - t_{\text{рп}})^2}{M_0 \{ (t_{\text{рп}} - t_{\text{пм}}) + (T_{\text{р}} - t_{\text{рп}}) \cdot [1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_i \cos \mu_i}{\sin \mu_i \cos \mu_i} \exp(-\mu_i^2 \frac{a \tau}{L^2})] \}}. \quad (9)$$

На основании этой формулы вообще-то можно утверждать, что  $K_{\text{об}}$  зависит и от времени пребывания в нагревательной зоне печи с данным значением температуры рабочего пространства – от времени воздействия на металл именно данного значения  $t_{\text{рп}}$ .

### Вычислительное исследование

На рис. 3 приведены зависимости  $y = K_{\text{об}} M_0 = \frac{(T_{\text{р}} - t_{\text{рп}})^2}{[(T_{\text{р}} - t_{\text{пм}}) - \frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}(T_{\text{р}} - t_{\text{рп}})]}$  от  $t_{\text{пм}}$  при  $T_{\text{р}} = 1900$  °С;  $t_{\text{рп}} = 1300$  °С и различных значениях производной  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}$ : эти значения, начиная сверху вниз, соответственно равны 0,7; 0,5 и 0,3.

Как видно из рис. 3, коэффициент передачи  $K_{\text{об}}$  растет, как это было обнаружено и экспериментально, с увеличением температуры поверхности нагреваемого металла (с уменьшением его теплопоглощения). Причем в соответствии с рис. 3 это увеличение может достигать почти двух раз. При этом важно отметить, что при меньших значениях  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}$  получаются меньшие значения  $K_{\text{об}}$  и заметно меньший его рост при увеличении  $t_{\text{пм}}$ . Объясняется это тем, что при малых значениях  $\frac{\partial t_{\text{пм}}}{\partial t_{\text{рп}}}$  температура поверхности металла увеличивается медленно, из-за этого теплопоглощение металла длительное время будет большим, а поэтому на канал « $G \rightarrow t_{\text{рп}}$ » остается меньшее количество теплоты, вносимой в печь подачей топлива.

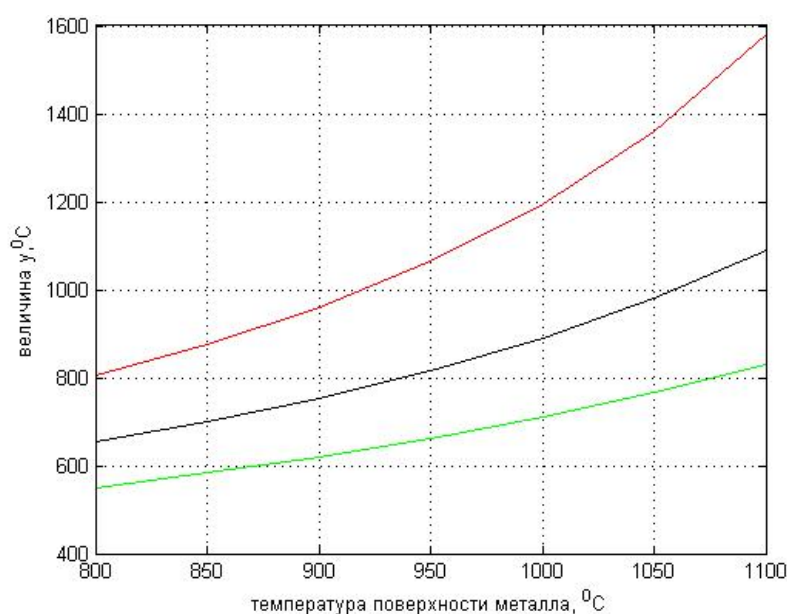


**Рис. 3. Зависимость  $y = K_{06}M_0$  от температуры поверхности нагреваемого металла при  $t_{рп} = 1300$  °C**  
**Fig. 3. Dependence of  $y = K_{06}M_0$  on the surface temperature of the heated metal at  $t_{рп} = 1300$  °C**

*Примечание. Понятно, что величина  $y = K_{06}M_0$  с точностью до постоянного множителя  $M_0$  отражает характер изменения коэффициента передачи объекта управления.*

При этом заметим, что в данном случае под  $G$  понимается расход топлива, пересчитанный в единицы мощности (Вт) через его теплоту сгорания (т. е.  $\frac{м^3}{с}$  с помощью  $\frac{Дж}{м^3}$  пересчитываются в Вт), поэтому единицей измерения такой величины будет  $[G] = \frac{м^3}{с} \cdot \frac{Дж}{м^3} = \frac{Дж}{с} = Вт$ .

На рис. 4 приведены те же зависимости и для тех же условий, что и на рис. 3, только для случая  $t_{рп} = 1200$  °C.



**Рис. 4. Зависимость  $y = K_{06}M_0$  от температуры поверхности нагреваемого металла при  $t_{рп} = 1200$  °C**  
**Fig. 4. Dependence of  $y = K_{06}M_0$  on the surface temperature of the heated metal at  $t_{рп} = 1200$  °C**

Как видно из рис. 3 и 4, уменьшение  $t_{рп}$  приводит к заметному росту  $K_{об}$ , что также вполне объяснимо из рассмотрения существа процесса теплообмена.

Как известно [12], задача измерения температуры поверхности металла в печах является достаточно проблематичной, поэтому для отслеживания изменения  $K_{об}$  в процессе нагрева целесообразно в формуле для его вычисления исключить  $t_{пм}$ . В данном случае это можно сделать следующим образом: формулу (4) можно переписать так:

$$t_{пм} = t_{рп} - \frac{1}{M_0} (G - M_{хх}) \cdot (T_p - t_{рп}). \quad (10)$$

Подставляя это выражение в (5), получим, что

$$K_{об} = \frac{(T_p - t_{рп})^2}{M_0 \left[ (T_p - t_{рп}) + \frac{1}{M_0} (G - M_{хх}) \cdot (T_p - t_{рп}) - \frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}} (T_p - t_{рп}) \right]}. \quad (11)$$

Таким образом, с помощью соотношения (11) можно организовать вычисление  $K_{об}$  на основе реализуемых с заметно меньшей погрешностью измерений расхода топлива и стабилизируемого значения температуры рабочего пространства.

Как видно из формул (5), (7), (9) и (11), изменение  $K_{об}$  можно отслеживать либо по  $t_{рп}$  и  $t_{пм}$ , либо по  $t_{рп}$ ,  $t_{пм}$  и  $G$ , либо, полностью исключая из формулы трудно измеряемый параметр  $t_{пм}$ , только по  $t_{рп}$  и  $G$  (формула (11)). Причем во всех случаях необходимо как-то оценивать величину  $\frac{\partial t_{пм}}{\partial t_{рп}}$ . Кроме того, учитывая, что  $t_{yx}$  является функцией  $t_{рп}$  (для камерных печей практически  $t_{yx} = t_{рп}$ ), то достаточно уверенно можно утверждать, что в [2, 3], контролируя  $t_{yx}$ , по существу оценивают фактическую температуру рабочего пространства.

### Структурная схема адаптивной САР

На рис. 5 приведена структурная схема адаптивной САР температуры рабочего пространства. Здесь  $t_{рп}^{зд}$  – заданное значение температуры рабочего пространства.

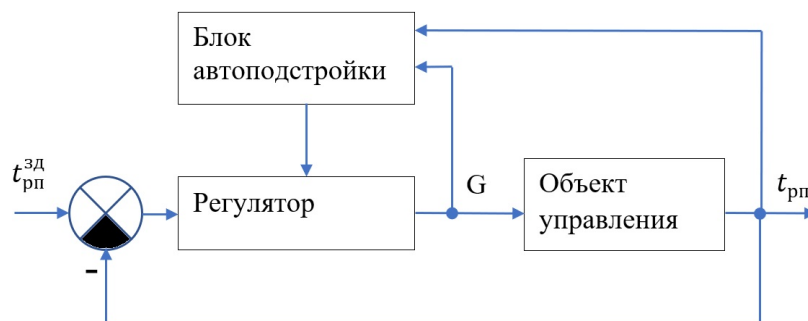


Рис. 5. Структурная схема адаптивной САР температуры рабочего пространства

Fig. 5. Structural diagram of the adaptive automatic control system for the working space temperature

В блоке автоподстройки (предпочтительно по соотношению (11)) вычисляется текущее значение коэффициента передачи  $K_{об}$  по каналу « $G \rightarrow t_{рп}$ », а также и требуемое значение коэффициента передачи ПИ-регулятора [13, 14]

$$K_p = \frac{T_{об}}{(\tau_{об} + \theta) K_{об}} \quad (12)$$

и передается для его настройки собственно в блок регулятора. Другая настройка регулятора – время интегрирования  $T_i$  – в соответствии с [13, 14] принимается равной постоянной времени объекта  $T_i = T_{об}$ . Заметим, что здесь считается, что динамические свойства объекта представляются инерционным звеном первого порядка с запаздыванием.

В формуле (12)  $\tau_{об}$  – время запаздывания объекта;  $\theta$  – постоянная времени эталонной передаточной функции САР. В соответствии с рекомендациями работы [14]  $\theta$  следует вычислять по формуле  $\theta = \frac{\tau_p}{(5...6)}$ , где  $\tau_p$  – время регулирования (показатель качества переходного процесса),

при этом, конечно, следует задавать реально достижимую длительность времени регулирования. Заметим, что в работе [15] величина  $\theta$  называется «...постоянной времени сглаживателя», поскольку увеличение  $\theta$  уменьшает колебательность переходного процесса.

#### **Выводы**

С целью повышения качества автоматической стабилизации температуры рабочего

пространства нагревательных печей проведено необходимое теоретическое исследование процесса нагрева. Получены формулы для коэффициента передачи объекта управления, объясняющие его зависимость от влияющих переменных процесса, проведен их численный анализ. Предложена структура наиболее предпочтительного варианта реализации адаптивной САР.

#### **Список литературы**

1. Автоматизация методических печей / Л.И. Буглак, И.Б. Вольфман, С.Ю. Ефроймович и др. М.: Metallurgiya, 1981. 196 с.
2. А. с. SU 596922 A1 СССР, МПК G05D 23/00. Способ стабилизации температуры металла в нагревательных печах периодического действия / Е.В. Захарова. № 2421314/18-24; заявл. 19.11.1976; опубл. 05.03.1978, Бюл. № 9.
3. Захарова Е.В., Кочетков Е.А., Курилов В.К. О стабилизации температуры в нагревательных печах периодического действия // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1982. № 2. С. 155–156.
4. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Кокорин И.Д. Система стабилизации температуры в нагревательной печи с применением скользящего регулирования и нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020. Т. 21, № 3. С. 143–157. DOI: 10.17587/mau.21.143-157
5. Панферов В.И. Об экономичном управлении нагревом металла в промышленных печах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2018. Т. 18, № 2. С. 71–80. DOI: 10.14529/ctcr180207
6. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Metallurgizdat, 1962. 568 с.
7. Ревун М.П., Гранковский В.И., Байбуз А.Н. Интенсификация работы нагревательных печей. Киев: Техніка, 1987. 137 с.
8. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгарт, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В. Бородулин. Киев; Донецк: Вища школа, 1986. 296 с.
9. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. М.: Metallurgiya, 1967. 440 с.
10. Бутковский А.Г., Гольдфарб Э.М., Гескин Э.С. Применение принципа максимума для оптимизации температурного режима печей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1967. № 3. С. 173–177.
11. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла. М.: Metallurgiya, 1972. 440 с.
12. Панферов В.И., Панферов С.В. К решению задачи контроля температуры металла в АСУ ТП методических печей. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2021. Т. 21, № 4. С. 63–97. DOI: 10.14529/met210408
13. Панферов С.В., Панферов В.И. К задаче конструирования автоматического регулятора для статического объекта первого порядка с запаздыванием // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2011. Вып. 14, № 23. С. 79–86.
14. Панферов В.И., Панферов С.В. К проблеме анализа и синтеза регуляторов в системах автоматизации металлургических печей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 3. С. 93–108. DOI: 10.14529/met220309
15. Пикина Г.А., Мещерякова Ю.С. Бесписковый метод расчета настроек ПИД-регуляторов на минимум квадратичного критерия // Теплоэнергетика. 2012. № 10. С. 58–64.

#### **References**

1. Buglak L.I., Wolfman I.B., Efroyimovich S.Yu., Zakharov G.K., Klimovitsky M.D., Segal A.M. *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechey* [Automation of methodical furnaces]. Moscow: Metallurgiya; 1981. 196 p. (In Russ.)
2. Zakharova E.V. *Sposob stabilizatsii temperatury metalla v nagrevatel'nykh pechakh periodicheskogo deystviya* [Method for stabilizing metal temperature in periodic heating furnaces]. Patent USSR, no. 596922 A1, 1978. (In Russ.)

3. Zakharova E.V., Kochetkov E.A., Kurilov V.K. [About stabilization of temperature in heating furnaces of periodic action]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1982;(2):155–156. (In Russ.)
4. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Kokorin I.D. System of temperature stabilization in a heating furnace based on sliding mode control and fuzzy logic. *Mechatronics, automation, control = Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2020;21(3):143–157. (In Russ.) DOI: 10.17587/mau.21.143-157
5. Panferov V.I. About Economic Management of Heating Metal in Industrial Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2018;18(2):71–80. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr180207
6. Thayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow: Metallurgizdat, 1962. 568 p. (In Russ.)
7. Revun M.P., Grankovskiy V.I., Baybuz A.N. *Intensifikatsiya raboty nagrevatel'nykh pechey* [Intensification of the operation of heating furnaces]. Kiev: Tekhnika, 1987. 137 p. (In Russ.)
8. Rozengart Yu.I., Potapov B.B., Ol'shanskiy V.M., Borodulin A.V. *Teploobmen i teplovye rezhimy v promyshlennyykh pechakh* [Heat transfer and thermal conditions in industrial furnaces]. Kiev; Donetsk: Vishcha shkola, 1986. 296 p. (In Russ.)
9. Goldfarb E.M. *Teplotekhnika metallurgicheskikh protsessov* [Thermotechnology of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1967. 440 p. (In Russ.)
10. Butkovsky A.G., Goldfarb E.M., Geskin E.S. [Application of the maximum principle to optimize the temperature regime of furnaces]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 1967;(3):173–177. (In Russ.)
11. Butkovsky A.G., Maly S.A., Andreev Yu.N. *Optimal'noe upravlenie nagrevom metalla* [Optimal control of metal heating]. Moscow: Metallurgiya, 1972. 440 p. (In Russ.)
12. Panferov V.I., Panferov S.V. To the Solution of the Problem of Control of Metal Temperature in ACS TP of Methodical Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2021;21(4):63–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/met210408
13. Panferov S.V., Panferov V.I. [On the problem of designing an automatic controller for a first-order static plant with delay]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2011;14(23):79–86. (In Russ.)
14. Panferov V.I., Panferov S.V. About structurally-parametrical synthesis of regulators for automation of metallurgical furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(3): 93–108. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220309
15. Pikina G.A., Meshcheryakova Y.S. A search-free method for calculating the tunings of pid controllers for the minimum of a quadratic criterion. *Thermal Engineering*. 2012;59(10):787–793. DOI: 10.1134/S0040601512100138

### Информация об авторах

**Панферов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; panferovvi@susu.ru.

**Панферов Сергей Владимирович**, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; panferovsv@susu.ru.

### Information about the authors

**Vladimir I. Panferov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Prof. of the Department of Information Systems and Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; panferovvi@susu.ru.

**Sergey V. Panferov**, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Urban Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; panferovsv@susu.ru.

*Статья поступила в редакцию 09.04.2026*

*The article was submitted 09.04.2026*