

К ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОЙ РАБОТОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕЧИ КАМЕРНОГО ТИПА

*Ревун М.П., д.т.н., профессор кафедры автоматического управления
технологическими процессами (revun.mp@gmail.com)*

*Зинченко В.Ю., к.т.н., доцент кафедры автоматического управления
технологическими процессами (e1elna.zinchenko@mail.ru)*

Иванов В.И., старший научный сотрудник (vitas.1947@mail.ru)

Чеprasов А.И., к.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики (alex.i.cheprasov@gmail.com)

Запорожская государственная инженерная академия
(69006, Украина, Запорожье, пр. Соборный, 226)

Аннотация. При использовании локальных систем автоматического регулирования температуры и избыточного давления греющей среды в рабочем объеме пламенной термической печи камерного типа настройки, как правило, выбирают независимо друг от друга без учета их взаимосвязи. В то же время при управлении расходом топлива и воздуха изменяется не только температура, но и давление в рабочей камере печи, что, в свою очередь, сопровождается изменением газообмена с окружающей средой и оказывает значительное влияние на температуру в рабочей камере. Все это сопровождается существенным перерасходом газообразного топлива, и, как следствие, повышением стоимости термической обработки металла. При использовании схемы отопления с постоянным объемом продуктов горения в печах такого типа управление ее тепловой мощностью сводится к комбинированию различных компонентов газообразного топлива при условии обеспечения заданной температуры в рабочем объеме. По принципу динамического программирования Беллмана оптимизацию управления за цикл термической обработки металла обеспечивали путем выбора для каждого периода квантования оптимального по стоимости состава применяемого топлива. Текущая стоимость топлива служит линейной функцией средних расходов его отдельных компонентов в периоды квантования и нахождение его минимального значения для каждого дискретного момента времени представляли как решение задачи линейного программирования. Разработан алгоритм определения оптимальных значений расходов отдельных компонентов газообразного топлива, а также расхода избыточного воздуха, используемых в качестве управляющих воздействий для автоматических систем регулирования температуры и избыточного давления греющей среды в рабочем объеме печей. Предложена функциональная схема автоматической системы управления, реализация которой позволяет не только оптимизировать технологию отопления по стоимости отдельных компонентов топлива, но и путем самонастраивания обеспечить автономность управления температурой и избыточным давлением греющей среды в рабочей камере печей камерного типа. В процессе управления в режиме реального времени с оптимизацией по стоимости отдельных компонентов топлива выполняется самонастраивание системы.

Ключевые слова: термическая печь камерного типа, рабочий объем, греющая среда, температура, избыточное давление, компоненты топлива, избыточный воздух, алгоритм управления, система оптимизации управления, функциональная схема.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-644-648

Тепловая работа пламенной термической печи камерного типа как объекта управления определяется температурой и избыточным давлением греющей среды в ее рабочей камере. Заданные значения указанных параметров обеспечиваются путем автоматического регулирования с использованием локальных систем. При этом структура и настройки этих систем, как правило, выбирают независимо друг от друга без учета их взаимосвязи. В то же время при управлении расходом топлива и воздуха изменяется не только температура, но и давление в рабочей камере печи, что, в свою очередь, сопровождается изменением газообмена с окружающей средой и оказывает существенное влияние на температуру в ее рабочей камере. Как следствие, повышается расход топлива, а также возрастает стоимость термической обработки металла.

В связи с этим актуальными задачами являются снижение затрат на термическую обработку металла

в печах камерного типа путем сокращения потребления топливных энергетических ресурсов и повышение качества управления тепловой работой печей.

Регулирование температуры и избыточного давления греющей среды в рабочей камере пламенной термической печи осуществляется непрерывно в течение 20 – 40 ч, технологически необходимых для реализации заданного температурно-временного режима обработки металла [1].

Известно, что для печей камерного типа наиболее рациональной является схема отопления с постоянным объемом продуктов горения [2]. В этом случае управление тепловой мощностью печи сводится к комбинированию различных компонентов газообразного топлива при условии обеспечения заданной температуры в рабочей камере печи. Хотя процесс комбинирования компонентов топлива является непрерывным во времени,

оптимизацию подобного управления целесообразно выполнять с использованием многошаговой дискретной модели [3, 4], получаемой путем квантования по времени, и выбора допустимых оптимальных управляющих воздействий на каждом шаге. При выборе периода квантования исходят из возможности оценки изменения температуры и избыточного давления греющей среды в рабочей камере печи как регулируемых величин с технологически допустимой точностью, а также расходов топлива и воздуха как регулирующих воздействий по их среднему значению за период квантования; для камерных печей в зависимости от их тепловой мощности и производительности период квантования составляет 5 – 20 мин.

При решении задачи оптимизации регулирования двух параметров (температуры и избыточного давления греющей среды) необходимо наличие не менее двух управляющих воздействий. В связи с этим технологию отопления термических печей камерного типа рассматривали с применением раздельной подачи нескольких видов (компонентов) топлива и последующего комбинирования их в процессе сжигания [5].

Используя принцип динамического программирования Беллмана [6 – 8], оптимизацию управления за цикл термической обработки металла можно обеспечить путем выбора для каждого периода квантования оптимального по стоимости состава применяемого топлива:

$$S_0[m] = \min \left\{ \Delta\tau \sum_{k=1}^n \Pi_k \bar{B}_{T_k}[m] + S_0[m-1] \right\}, \quad (1)$$

где $S_0[m]$ – общая стоимость отопления за m периодов квантования; m – номер периода квантования; $\Delta\tau$ – период квантования по времени; n – количество компонентов топлива при комбинировании его состава; Π_k – стоимость k -го компонента топлива; $\bar{B}_{T_k}[m]$ – средний расход k -го компонента топлива за m -й период квантования; $S_0[m-1]$ – общая стоимость отопления за $(m-1)$ -й период квантования.

Текущая стоимость $S_T[m]$ топлива является линейной функцией средних расходов его отдельных компонентов $\bar{B}_{T_k}[m]$ за m периодов квантования, нахождение его минимального значения для каждого дискретного момента времени можно представить как решение задачи линейного программирования [9 – 12].

Так, при отоплении печи смесью различных компонентов топлива его текущую стоимость за период квантования определяют следующим образом:

$$S_T[m] = C_1 B_{T_1}[m] + C_2 B_{T_2}[m] + \dots + C_n B_{T_n}[m], \quad (2)$$

где $B_{T_1}[m]$, $B_{T_2}[m]$, ..., $B_{T_n}[m]$ – средний расход отдельных компонентов топлива; C_1 , C_2 , ..., C_n – рыночная стоимость отдельных соответствующих компонентов.

В общем случае систему уравнений-ограничений можно записать в виде

$$\sum_{k=1}^n [Q_H^p]_k B_{T_k}[m] + \alpha_b L_b[m] = q^T[m]; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^n V_{0,k} B_{T_k}[m] + L_b[m] = V^{\bar{p}}[m]; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n B_{T_k}[m] \leq B_T^{\max}; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^n L_{0,k} B_{T_k}[m] + L_b[m] \leq L_b^{\max}, \quad (6)$$

где $[Q_H^p]_k$ и $V_{0,k}$ – теплота сгорания k -го компонента топлива и удельный объем продуктов горения, получаемых при его сжигании; α_b и $L_b[m]$ – удельная энтальпия и расход избыточного воздуха; B_T^{\max} и L_b^{\max} – максимальная производительность горелочных устройств и печного вентилятора; $q^T[m]$ и $V^{\bar{p}}[m]$ – тепловая нагрузка и расход продуктов горения, которые устанавливают регуляторы температуры и избыточного давления в рабочей камере печи.

При такой постановке задача имеет решение в случае совместности системы уравнений (3) – (6), когда согласно теореме Кронекера–Конелли [13, 14] ранг z основной матрицы и расширенной матрицы системы совпадают. Решение подобных задач обычно выполняют симплекс-методом [15 – 17].

В термических печах камерного типа, как правило, используют газообразное топливо, которое состоит из высоко- и низкалорийного компонентов, сжигаемых с коэффициентом расхода воздуха α , значение которого в период выдержки нередко превышает 1,2 – 1,5 [18].

В связи с тем, что условие совместности уравнений (3) – (6) выполняется для компонентов топлива со существенно различными теплотой сгорания и химической природой, рассматривали комбинирование указанных компонентов топлива, а также избыточного воздуха L_b .

Для такого случая система уравнений-ограничений принимает следующий вид:

$$[Q_H^p]^b B_T^b[m] + [Q_H^p]^h B_T^h[m] + \alpha_b L_b[m] = q^T[m]; \quad (7)$$

$$V_0^b B_T^b[m] + V_0^h B_T^h[m] + L_b[m] = V^{\bar{p}}[m]. \quad (8)$$

Минимум функции стоимости $S[m]_{\min}$ можно записать как

$$S[m]_{\min} = \Delta\tau C_T^b B_T^b[m] + \Delta\tau C_T^h B_T^h[m], \quad (9)$$

где $B_T^b[m]$ и $B_T^h[m]$ – расход высоко- и низкалорийного компонентов топлива в период времени m ; $[Q_H^p]^b$, $[Q_H^p]^h$ и C_T^b , C_T^h – теплота сгорания и стоимость высоко- и низкалорийного компонентов топлива.

При $q^I[m] \geq [Q_n^p]^H B_{T_{\max}}^H[m]$ (где $B_{T_{\max}}^H[m]$ – максимально возможный расход низкокалорийного компонента топлива, который удовлетворяет условию (5)) оптимальное решение будет при $L_b[m] = 0$.

В случае недостатка тепловой энергии в термической печи низкокалорийный компонент топлива замещают эквивалентным по объему продуктов горения количеством его высококалорийного компонента.

Тогда значения параметров $B_T^H[m]$ и $B_T^B[m]$ определяют по следующим формулам:

$$B_T^H[m] = \frac{[Q_n^p]^B V_0[m] - q^I[m] V_0^B[m]}{[Q_n^p]^B V_0^H[m] - [Q_n^p]^H V_0^B}; \quad (10)$$

$$B_T^B[m] = \frac{q^I[m] V_0^H[m] - [Q_n^p]^H V_0[m]}{[Q_n^p]^B V_0^H[m] - [Q_n^p]^H V_0^B}. \quad (11)$$

При наличии в печи избыточного количества теплоты снижают его разбавлением низкокалорийного компонента топлива эквивалентным по объему продуктов горения количеством избыточного воздуха.

В этом случае величины $B_T^H[m]$ и $L_b[m]$ вычисляют с использованием соотношений

$$B_T^H[m] = \frac{q^I[m] - V_0[m] a_b}{[Q_n^p]^H - V_0^H a_b}; \quad (12)$$

$$L_b[m] = \frac{[Q_n^p]^H V_0[m] - q^I[m] V_0^H[m]}{[Q_n^p]^H - V_0^H a_b}. \quad (13)$$

В отличие от симплекс-метода, который предполагает по результатам анализа изменения функции (9) переход от одного допустимого базисного решения к другому, в этом случае возможно упрощение процедуры поиска оптимальных значений расходов $B_T^H[m]$, $B_T^B[m]$, $L_b[m]$ путем сопоставления значения текущей величины $q^I[m]$ с максимальным значением произведения $B_{T_{\max}}^H [Q_n^p]^H$. Такой алгоритм легко реализуется при использовании системы оптимизации с ограниченными вычислительными возможностями.

Автоматическое регулирование подачи компонентов газообразного топлива и избыточного воздуха выполняют с использованием программы контроллера, разработанной на основании алгоритма управления (рис. 1).

Предложенная блок-схема содержит блок ввода текущей $t_n(\tau)$ и заданной $t_n^{зад}(\tau)$ температуры в печи для реального масштаба времени, расходов топлива $B_{пг}$, $B_{др}$ и избыточного воздуха $L_b^{изб}$; блок проверки достижения текущей температурой печи $t_n(\tau)$ заданного значения $t_n^{зад}(\tau)$ и завершения температурно-временного режима обработки металла $t_n^{зад}(\tau_k)$; подпрограмму регулятора

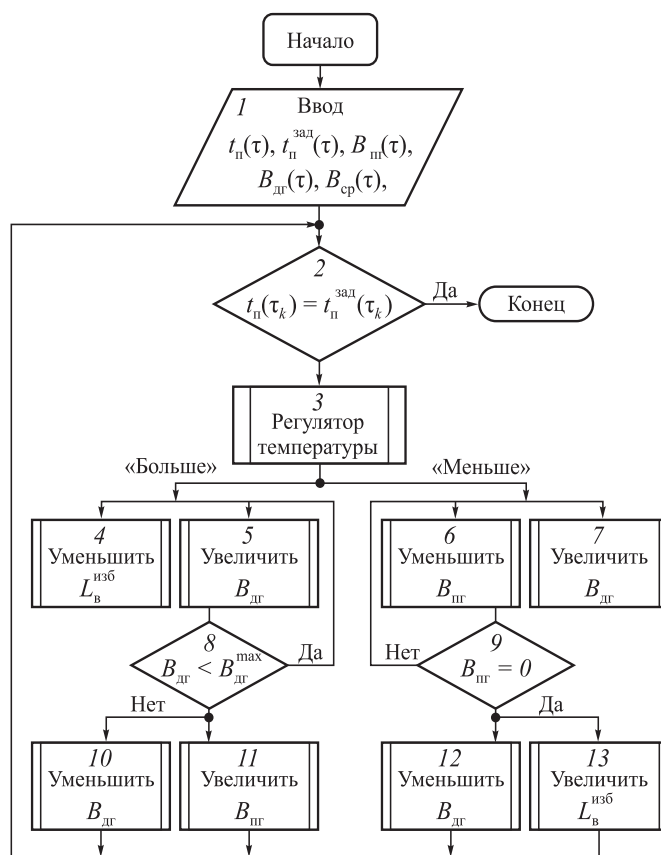


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления тепловой работой печи

Fig. 1. Flow-chart of control algorithm of furnace thermal operation

температуры; подпрограммы изменения расходов топливных компонентов при уменьшении и увеличении тепловой мощности печи; блок проверки и достижения предельных расходов $B_{пг}$, $B_{др}$ и изменения расходов соответствующих топливных компонентов.

На рис. 2 приведена укрупненная функциональная схема системы автоматической оптимизации регулирования температуры и избыточного давления греющей среды в рабочем объеме термической печи камерного типа, где $P_n^{зад}(\tau)$, $t_n^{зад}(\tau)$, $P_n(\tau)$, $t_n(\tau)$ – заданные согласно технологическим инструкциям термической обработки металла и текущие значения избыточного давления и температуры греющей среды в печи как функции времени τ ; $B_T^{БК}(\tau)_{зад}$, $B_T^{БК}(\tau)$, $B_T^{HK}(\tau)_{зад}$, $B_T^{HK}(\tau)$, $L_b(\tau)_{зад}$ и $L_b(\tau)$ – заданные и текущие значения расходов топливных компонентов и избыточного воздуха, подаваемых в горелочные устройства.

Применение при управлении температурой и избыточным давлением греющей среды в рабочей камере термической печи одних и тех же воздействий, значения которых рассчитывают с использованием уравнений (3) – (6), предопределяет независимость функций $T_n(\tau)$ и $P_n(\tau)$ друг от друга, что обеспечивает автономность управления данными параметрами при изменении $T_n^{зад}(\tau)$ и $P_n^{зад}(\tau)$. В процессе управления в режиме реального времени с оптимизацией по стоимости отдельных ком-

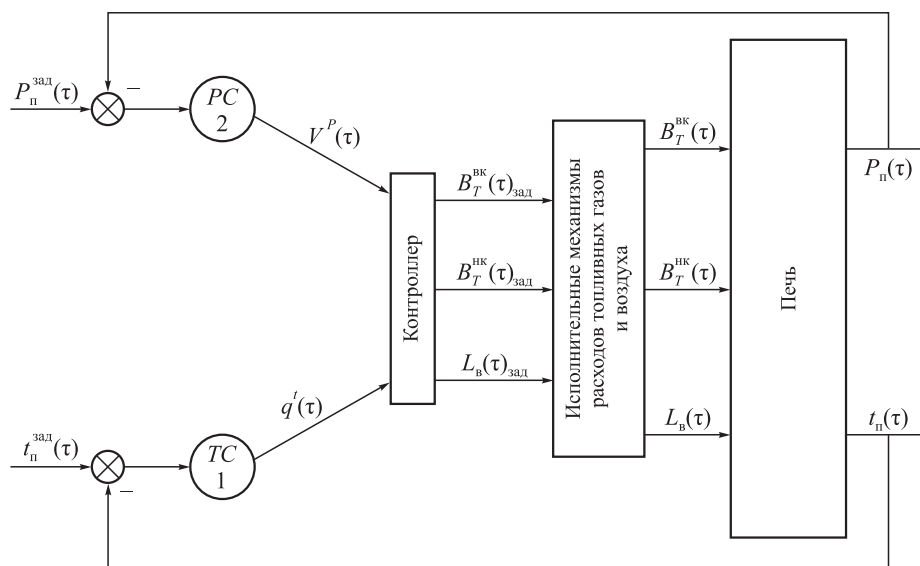


Рис. 2. Функциональная схема системы оптимизации термической печи камерного типа

Fig. 2. Functional diagram of the optimization system for chamber-type thermal furnace

понтентов топлива выполняется самонастройка системы [19].

Выводы. Предложен алгоритм для определения оптимальных значений управляющих воздействий в автоматических системах регулирования температуры и избыточного давления греющей среды в рабочем объеме термических печей камерного типа, который позволяет не только оптимизировать технологию отопления по стоимости отдельных компонентов топлива, но и путем самонастройки обеспечить автономность управления температурой и избыточным давлением греющей среды в рабочей камере печей камерного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ревун М.П., Зинченко В.Ю., Лютий А.П. Оптимизация низкотемпературного нагрева в пламенных печах // Теория и практика металлургии. 2005. № 1-2 (44-45). С. 60 – 63.
2. Деклараци́нный патент України № 1614. Спосіб опалення камерних газових печей / М.П. Ревун, В.Ю. Зінченко, О.П. Лютий; Заявл. 27.02.2006; опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7.
3. Ложкин С.А. Лекции по основам кибернетики. – М.: МГУ, 2004. – 147 с.
4. Умнов А.Е. Аналитическая геометрия и линейная алгебра. 3 изд. – М.: МФТИ, 2011. – 544 с.
5. Ревун М.П., Гранковский В.И. Автоматическое управление нагревом металла. – Киев: Техника, 1973. – 138 с.
6. Bellman R. Dynamic Programming. – Princeton University Press. – Princeton. NY. USA. 2010. – 350 p.
7. Hadley G. Nonlinear and Dynamic Programming. – Addison-Wesley. Publishing Company. Reading Massachusetts, 1969. – 486 p.
8. Betts J.T. Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming Ser. Advances in Design and Control. – Philadelphia: SIAM, 2001. – 190 p.
9. Таха Х.А. Введение в исследование операций. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 912 с.
10. Cornuejols G., Tutuncu R. Optimization Methods in Finance. Pittsburg. – Carnegie Mellon University, 2006. – 349 p.
11. Банди Б. Основы линейного программирования. – М.: Радио и связь, 1989. – 176 с.
12. Бородакий Ю.В., Загребав А.М., Крицына Н.А., Кулябичев Ю.П., Шумилов Ю.Ю. Линейное программирование в современных задачах оптимизации. – М.: МИФИ, 2008. – 188 с.
13. Ильин В.А., Ким Г.Д. Линейная алгебра и аналитическая геометрия. – М.: Изд-во Проспект, 2007. – 400 с.
14. Прасолов В.В. Задачи и теоремы линейной алгебры. – М.: Наука, 1996. – 304 с.
15. Раскин Л.Г., Кириченко И.О. Континуальное линейное программирование. – Харьков, 2005. – 178 с.
16. Полак Э. Численные методы оптимизации. – М.: Мир, 1974. – 376 с.
17. Шевченко В.Н., Золотых Н.Ю. Линейное и целочисленное линейное программирование. – Нижний Новгород: изд. НГУ им. Н.И. Лобачевского, 2004. – 154 с.
18. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металлургии / М.П. Ревун, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В. Бородулин. – Запорожье: ЗГИА, 2002. – 443 с.
19. Ревун М.П., Зинченко В.Ю., Иванов В.И., Чепрасов А.И. Управление температурой и давлением в термической печи камерного типа. – В кн.: Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов научно-практ. конф. (ММТТ-27). Т. 2. – Тамбов: изд. ТПУ, 2014. С. 91 – 95.

Поступила 9 января 2017 г.

OPTIMIZATION OF HEATING OPERATION CONTROL IN CHAMBER-TYPE THERMAL FURNACE

M.P. Revun, V.Yu. Zinchenko, V.I. Ivanov, A.I. Cheprasov

Zaporizhia State Engineering Academy, Zaporizhia, Ukraine

Abstract. Using local systems of automatic control of temperature and surplus pressure of heating in the working volume of flaming thermal furnace of chamber type, settings, as a rule, are selected separately without the account of their interconnection. At the same time in control of expense of fuel and air not only temperature but also pressure changes in the working chamber of furnace, that, in turn, is accompanied by change of gaseous exchange with a medium and renders substantial influence temperature in a working chamber. All this is accompanied by substantial excessive consumption of gaseous fuel, and, as a result, by the rise of costs of metal heat treatment. Using heating chart with the constant volume of products of burning in the furnaces of such type, the control of its heat power is in combining charges of different components of gaseous fuel at condition of providing of the given temperature in the working volume. According to the principle of Bellman dynamic programming, optimization of control for the cycle of metal heat treatment was provided by choice of the applied fuel which is optimal on a cost composition for every period of quantum. The present cost of fuel serves as the linear function of middle charges of its separate components in periods of quantum and finding of its minimum value for every discrete moment of time, presented as a decision of task of the linear programming. The determination algorithm for optimal values of charges of gaseous fuel separate components was worked out, as well as for the expense of surplus air, used as controlling influences for the automatic systems of adjusting of temperature and surplus pressure of heating medium in the working volume of furnaces. The functional cart of automatic control system is provided, which implementation allows not only optimization of heating technology by cost of separate fuel components, but also provision of the control autonomy of temperature and surplus pressure of heating medium in the working chamber of furnaces of chamber type by means of self-adjustment. In real-time control process is executed with optimization of cost of separate components of fuel self-adjustment of the system.

Keywords: thermal furnace of chamber type, working volume, heating medium, temperature, surplus pressure, components of fuel, surplus air, control algorithm, system of control optimization, functional cart.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-644-648

REFERENCES

1. Revun M.P., Zinchenko V.Yu., Lyutyi A.P. Optimization of low-temperature heating in flame furnaces. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2005, no. 1-2 (44-45), pp. 60–63.
2. Revun M.P., Zinchenko V.Yu., Lyutii O.P. *Sposib opalennya kamernikh gazovikh pechei* [A method for chamber gas furnaces heating]. Patent Ukraini no. 1614. *Byulleten' izobretenii*. 2006, no. 7. (In Ukr.).
3. Lozhkin S.A. *Lektsii po osnovam kibernetiki* [Lectures on the basics of cybernetics]. Moscow: MGU, 2004, 147 p. (In Russ.).
4. Umnov A.E. *Analiticheskaya geometriya i lineinaya algebra* [Analytical geometry and linear algebra]. Moscow: MFTI, 2011, 544 p. (In Russ.).
5. Revun M.P., Grankovskii V.I. *Avtomaticheskoe upravlenie nagrevom metalla* [Automatic control of metal heating]. Kiev: Tekhnika, 1973, 138 p. (In Russ.).
6. Bellman R. *Dynamic Programming*. NY., Princeton, USA: Princeton University Press, 2010, 350 p.
7. Hadley G. *Nonlinear and Dynamic Programming*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading Massachusetts, 1969, 486 p.
8. Betts J.T. *Practical Methods for Optimal Control Using Nonlinear Programming Ser. Advances in Design and Control*. Philadelphia: SIAM, 2001, 190 p.
9. Taha Hamdy A. *Operations research: an introduction*. New Jersey: Paerson Education, 1997. (Russ.ed.: Taha Hamdy A. *Vvedenie v issledovanie operatsii*. Moscow: Vil'yams, 2001, 912 p.).
10. Cornuejols G., Tutuncu R. *Optimization Methods in Finance*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006, 349 p.
11. Bunday Brian D. *Basic Linear Programming*. London, Baltimore, Md., USA: Edward Arnold, 1987. (Russ.ed.: Bunday B. *Osnovy lineinogo programmirovaniya*. Moscow: Radio i svyaz', 1989, 176 p.).
12. Borodakii Yu.V., Zagrebaev A.M., Kritsyna N.A., Kulyabichev Yu.P., Shumilov Yu.Yu. *Lineinoe programmirovanie v sovremennykh zadachakh optimizatsii* [Linear programming in modern optimization tasks]. Moscow: MIFI, 2008, 188 p. (In Russ.).
13. Il'in V.A., Kim G.D. *Lineinaya algebra i analiticheskaya geometriya* [Linear algebra and analytical geometry]. Moscow: Prospekt, 2007, 400 p. (In Russ.).
14. Prasolov V.V. *Zadachi i teoremy lineinoi algebry* [Tasks and theorems of linear algebra]. Moscow: Nauka, 1996, 304 p. (In Russ.).
15. Raskin L.G., Kirichenko I.O. *Kontinual'noe lineinoe programmirovanie* [Continual linear programming]. Kharkiv, 2005, 178 p. (In Russ.).
16. Polak E. *Computational methods in optimization*. Academic Press, 1971, 329 p. (Russ.ed.: Polak E. *Chislennyye metody optimizatsii*. Moscow: Mir, 1984, 315 p.).
17. Shevchenko V.N., Zolotikh N.Yu. *Lineinoe i tselochislennoe lineinoe programmirovanie* [Linear and integral linear programming]. Nizhny Novgorod: NGU im. N.I. Lobachevskogo, 2004, 154 p. (In Russ.).
18. Revun M.P., Potapov B.B., Ol'shanskii V.M., Borodulin A.V. *Vysokotemperaturnye teploekhnologicheskie protsessy i ustanovki v metallurgii* [High-temperature heat engineering processes and installations in metallurgy]. Zaporizhia: ZGIA, 2002, 443 p. (In Russ.).
19. Revun M.P., Zinchenko V.Yu., Ivanov V.I., Cheprasov A.I. Control of temperature and pressure in a chamber-type thermal furnace. In: *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik trudov nauchno-prakt. konf. (MMTT-27). T. 2*. [Mathematical methods in engineering and technology: Proc. of Sci.-Pract. Conf. (MMET-27). Vol. 2]. Tambov: TPU, 2014, pp. 91–95. (In Russ.).

Information about the authors:

M.P. Revun, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Automatic Control of Technological Processes (revun.mp@gmail.com)
V.Yu. Zinchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Automatic Control of Technological Processes (elena.zinchenko@mail.ru)
V.I. Ivanov, Senior Researcher (vitas.1947@mail.ru)
A.I. Cheprasov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Heat Power Engineering" (alex.i.cheprasov.com)

Received January 9, 2017