

АФХ системи керування торкається кола, що свідчить про забезпечення заданого показника коливності (для нашого випадку  $M = 1,3$ ).

**Висновок.** Написання власного програмного коду для дослідження стійкості систем керування, що використовує вбудовані функції пакету Matlab, дозволяє виконати дослідження довільної складності, суттєво спростивши їх реалізацію.

#### Список використаної літератури

1. *Медведев В. С.* Control System Toolbox. Matlab 5 для студентів / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М. : Диалог-МИФИ, 1999. – 287 с.
2. *Ковалюк Д. О.* Моделювання систем керування в інструментарії Control System Toolbox / Д. О. Ковалюк // Автоматика – 2012 : тези доп. 19 міжнар. конф. з автоматич. управл. (Київ, 26-28 вер. 2012 р.). – К. : НУХТ, 2012. – С. 368-369.
3. *Ротач В. Я.* Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М. : МЭИ, 2008. – 396 с.

Надійшла до редакції 05.05.2012.

---

#### **Kovaliuk D. O.**

#### *CONTROL SYSTEMS STABILITY RESEARCH USING CONTROL SYSTEM TOOLBOX OF MATHEMATICAL PACKAGE MATLAB*

*The article describes control systems stability research using Control System Toolbox of mathematical package Matlab. Single-input/single-output system for the object specified in the form of a rational transfer function with delay and the PI-controller has been created. The system stability has been determined over the roots of the characteristic polynomial, Mikhailov and Nyquist criteria. The own implementation of stability criteria has been proposed. That allows to work study of arbitrary complexity. The controller parameters have been calculated for a given rate of oscillation by the M-circle method.*

**Keywords:** stability control systems, simulation systems, Matlab, Control System Toolbox.

#### **References**

1. *Medvedev V. S.* Control System Toolbox. Matlab 5 dlja studentov [Control System Toolbox. Matlab 5 for students] / V. S. Medvedev, V. G. Potemkin. – M. : Dialog-MIFI, 1999. – 287 s.
  2. *Kovaliuk D. O.* Modeliuvannia system keruvannia v instrumentarii Sontrol System Toolbox [A design of control system is in the tool of Sontrol System Toolbox] / D. O. Kovaliuk // Avtomatyka – 2012 : tezy dop. 19 mizhnar. konf. z avtomatych. upravl. (Kyiv, 26-28 ver. 2012 r.). – K. : NUKhT, 2012. – S. 368-369.
  3. *Rotach V. Ja.* Teoriya avtomaticheskogo upravlenija [Theory of automatic control] / V. Ja. Rotach. – M. : Izdatel'skij dom MJeI, 2008. – 396 p.
- 

УДК 681.3.06

**ЖУЧЕНКО А. І., д.т.н., проф.; ЦАПАР В. С., асист.**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

*Наведено результати моделювання температурного розподілу у скловарній печі. Наведено дослідження одержаних температурних полів у різних перетинах скловарної печі. Сформульовано результати дослідження температурних полів у скловарній печі.*

**Ключові слова:** скловарна піч, температурне поле, математична модель.

**Постановка проблеми.** Однією із найбільших проблем вітчизняного скловарного виробництва є сьогодні його велика енергоємність. Зважаючи на сучасні тенденції росту цін на природний газ, який залишається основним паливом для скловарних печей, оптимізація витрат газу мала б значний економічний ефект. Досягти цього можна, визначивши і реалізуючи оптимальні режими процесу скловаріння. Температурний режим є

визначальним режимом роботи скловарної печі [1], від якого залежать усі техніко-економічні показники роботи останньої. У зв'язку з цим дослідження температурних полів скловарної печі є важливим науково-технічним завданням. Проведення такого дослідження на діючому виробництві неможливо з економічної точки зору – це дослідження досить затратне, зважаючи на можливий брак кінцевого продукту; з технічної точки – через відсутність засобів вимірювання температури, які мають бути встановлені в усьому просторі печі. Виходячи з цього, єдиною альтернативою є застосування математичного моделювання.

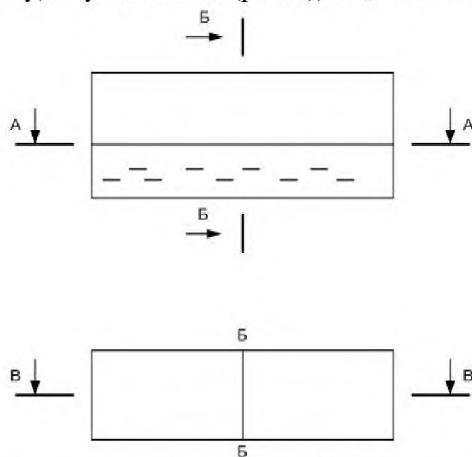
**Аналіз попередніх досліджень.** Результати дослідження температурних полів скловарних печей представлено в працях [2-3]. Температурні поля, побудовані у роботі [2], розраховані за допомогою математичної моделі, яка описує скловарну піч як двовимірний об'єкт. Експеримент і праці [1, 4] свідчать, що температурні поля розподілені у просторі, а не на площині. Це означає, що дослідження [3] мають приблизний характер та обмежене застосування. Невирішеною частиною наукової проблеми є моделювання розподілу температурних полів у просторі. Результати, наведені у праці [3], теж мають обмежене застосування, оскільки автори досліджують лише температурні поля на бічних площинах басейну скловарної печі, тоді як проблемою є розподіл температур у самій скломасі.

**Метою статті** є побудова та аналіз температурних полів скловарної печі за математичною моделлю.

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження температурних полів скловарної печі використовуватимемо математичну модель із межовими умовами [5]:

$$\left. \begin{aligned} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right); & q(T_1) &= h_1 (T_1 - T_n) \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right); & q(T_2) &= h_2 (T_2 - T_n) \\ c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} &= \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right); & q(T_3) &= h_3 (T_3 - T_n) + \varepsilon C_s (T_3^4 - T_n^4) \\ c_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} &= \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} \right); & q(T_4) &= q \end{aligned} \right\},$$

де  $c$  – питома масова теплоємність матеріалу;  $\rho$  – густина матеріалу;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;  $q$  – питомий тепловий потік від паливників;  $h = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище;  $\varepsilon$  – зведений ступінь чорноти;  $C_s = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – константа випромінювання абсолютно чорного тіла;  $x, y, z$  – координати ширини, довжини й висоти;  $T_1, T_2, T_3$  і  $T_4$  – температури склепіння печі, басейну, газу і скломаси (рис. 1), а  $T_n = 303 \text{ К}$  – температура скломаси в початковий момент часу.



А-А – поверхня скломаси; Б-Б – поперечний;  
В-В – повздовжній

Рис. 1 – Перерізи для моделювання

не на виході з печі. Це обумовлено деякою неефективністю температурного режиму, що пов'язано з конструктивними особливостями печі.

Піч, що моделюється, має такі геометричні параметри – нижня частина печі зі скломасою: ширина – 9, довжина – 15 м, глибина: перші 10 м довжини – 1,3 м, решта 5 м – 1,7 м; верхня частина печі, газополум'яний простір: ширина – 9, довжина – 15, висота – 1,3 м.

Для побудови температурних полів скористаємось програмним пакетом Matlab і проаналізуємо температурні поля в трьох перерізах (рис. 1).

Коли працює ліва група паливників, температура поверхні скломаси суттєво зростає від зони завантаження шихти до приблизно середини печі (рис. 2). У цій зоні градієнт температур значний, і різниця між максимальною і мінімальною становить приблизно 400 °С. У другій половині печі максимальна температура скломаси на поверхні відрізняється від мінімальної лише на 50 °С, що свідчить про більш стабільне температурне поле.

Зона найвищої температури 1460 °С перебуває

Моделюючи температурне поле на поверхні скломаси, коли працює права група пальників, отримуємо симетричну картину.

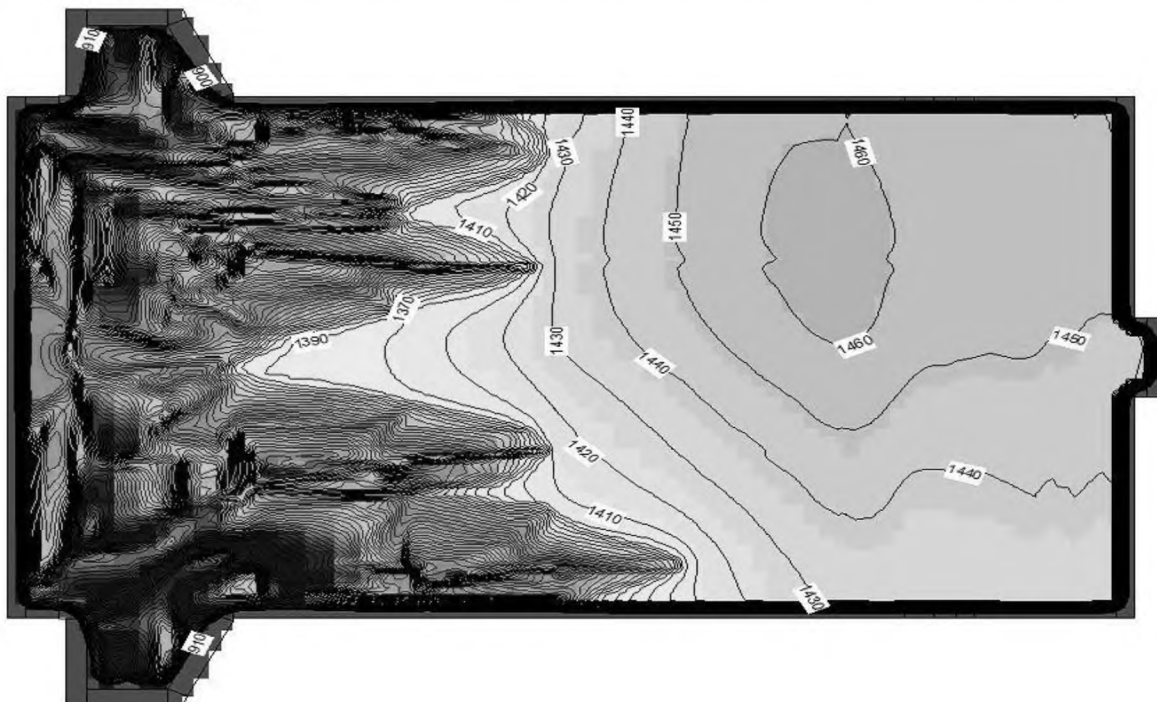


Рис. 2 – Розподіл температур на поверхні скломаси (горизонтальний переріз)

Аналізуючи температурне поле поперечного перерізу (рис. 3), можна сказати, що воно стабільне у горизонтальній площині і змінюється лише від поверхні скломаси до дна печі, причому різниця температур становить до 150 °С.

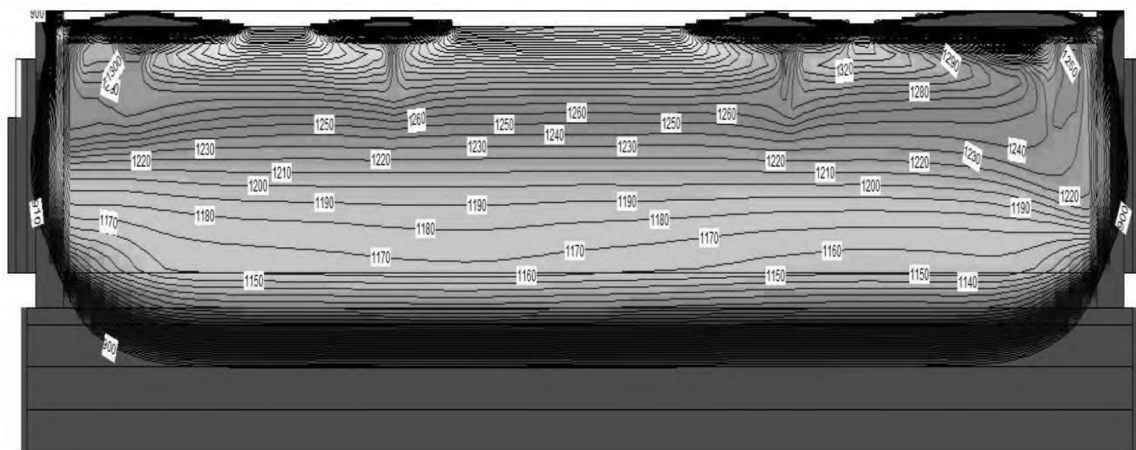


Рис. 3 – Розподіл температур у поперечному перерізі

Однією з найважливіших умов отримання якісної скломаси є досягнення нею температурного максимуму. Чим вище максимальна температура, тим інтенсивнішим є скловаріння [1]. Склomаса досягає температурного максимуму, наближаючись до проточного каналу (рис. 4).

Відповідно під час руху скломаси від завантажувальних кишень до зони студки температура її поступово зростає, лінії ізотерм вказують на однорідність прогріву скломаси незалежно від того, які пальники працюють. Підтвердження можна отримати, аналізуючи два додаткових перерізи печі (рис. 5 і 6).

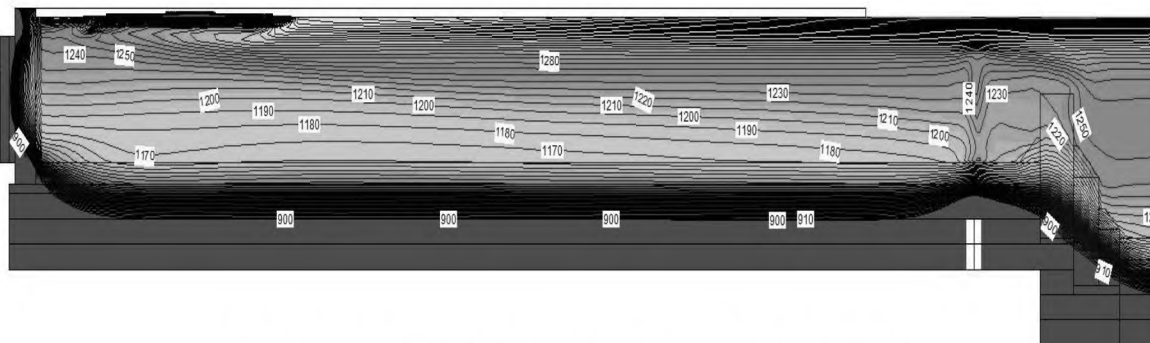


Рис. 4 – Розподіл температур у повздовжньому перерізі

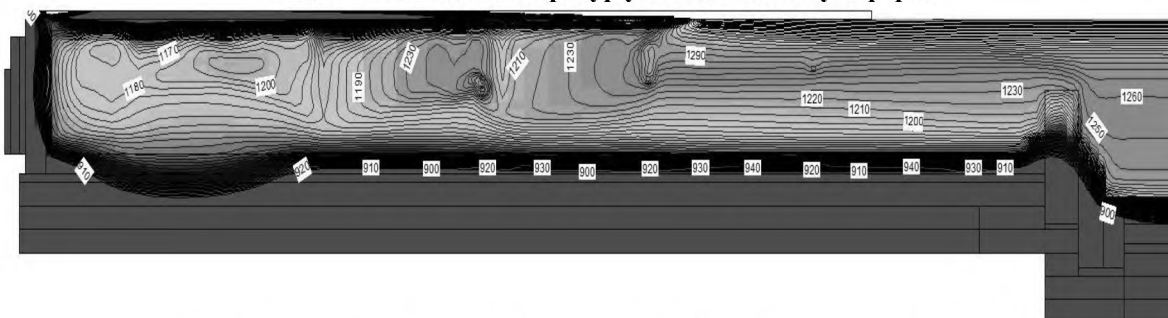


Рис. 5 – Розподіл температур на лівому боці печі (повздовжній переріз)

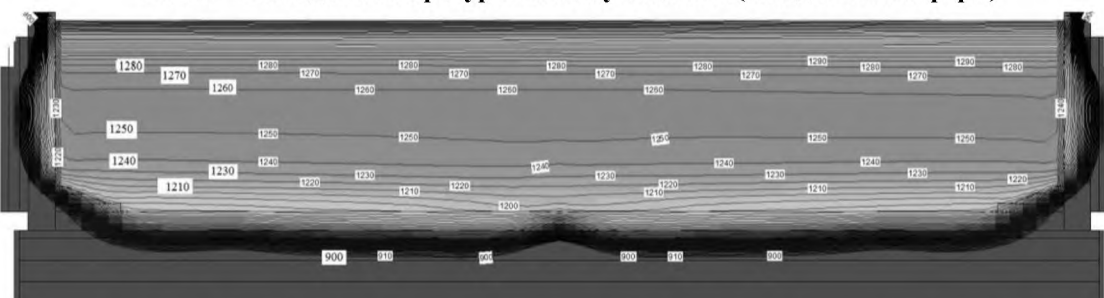


Рис. 6 – Розподіл температур перед проточним каналом (поперечний переріз)

**Висновок.** Щоб отримати якісну скломасу, достатньо підтримувати на заданому рівні температуру скломаси у точці температурного максимуму, координати якої у печі можна визначити з аналізу наведених температурних полів. Результати моделювання дають можливість визначити основні точки вимірювання температури, на підставі інформації про які доцільно будувати систему керування, що стане предметом подальших досліджень.

#### Список використаної літератури

1. Гинзбург Д. Г. Стекловаренные печи / Д. Г. Гинзбург. – М. : Госстройиздат, 1967. – 214 с.
2. Дзюзер В. Я. Математическая модель стеклоvarенной печи с подковообразным направлением пламени / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, В. Б. Кутьин // Стекло и керамика. – 2004. – № 10. – С. 8-12
3. Югов А. М. Определение температурных полей на контактирующих поверхностях внешнего контура агрегата стеклоvarенной печи / А. М. Югов, В. И. Москаленко, А. В. Ихно, Д. А. Юдкало // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2009. – № 6 (80).
4. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М. : Химия, 1979. – 201 с.
5. Жученко А. І. Моделювання теплового режиму скловарної печі / А. І. Жученко, В. О. Романенко // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін-т» ; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2011. – № 1 (11).

Надійшла до редакції 03.05.2012.

Zhuchenko A. I., Tsapar V. S.

STUDY OF TEMPERATURE FIELDS OF GLASS FURNACE

The results of simulation of temperature distribution in glass furnace were carried out. An investigation from temperature fields in different sections of glass-melting furnace. The results of temperature fields in the furnace were formulated.

**Keywords:** glass furnace, temperature field, mathematical model.

#### References

1. Ginzburg D. G. Steklovarennye pechi [Glass furnaces] / D. G. Ginzburg. – M. : Gosstroizdat, 1967. – 214 s.
2. Dzijuzer V. Ja. Matematicheskaja model' steklovarennoj pechi s podkovoobraznym napravleniem plameni [Mathematical model of the glass furnace with the horseshoe direction of a flame] / V. Ja. Dzijuzer, B. C. Shvydkij, V. B. Kut'in // Steklo i keramika. – 2004. – № 10. – S. 8-12
3. Jugov A. M. Opredelenie temperaturnyh polej na kontaktirujushhijh poverhnostjakh vneshnego kontura agregata steklovarennoj pechi [Definition of temperature fields on contacting surfaces of an external contour of the unit of glass furnace] / A. M. Jugov, V. I. Moskalenko, A. V. Ihno, D. A. Judkalo // Visnik Donbas'koji nacional'noji akademiji budivnictva i arhitekturi. – 2009. – № 6 (80).
4. Kafarov V. V. Sistemnyj analiz processov himicheskoi tehnologii [System analysis of processes chemical technology] / V. V. Kafarov, I. N. Dorohov. – M. : Himija, 1979. – 201 s.
5. Zhuchenko A. I. Model'juvannja teplovogo rezhimu sklovarnoji pechi [Design of the thermal mode of glass furnace] / A. I. Zhuchenko, V. O. Romanenko // Visn. Nac. tehn. un-tu Ukraini «Kijiv. politehn. in-t» ; ser. «Him. inzhenerija, ekologija ta resursozbezhenja». – 2011. – № 1 (11).

УДК 65.012.122

КУБРАК А. І., к.т.н., проф.; СИТНИКОВ О. В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ВИВЕДЕННЯ ПЕРЕДАТНОЇ ФУНКЦІЇ ВАННИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Розглянуто ванну скловарної печі, що є об'єктом у системі керування скловарним виробництвом, створено структурну модель ванни печі та виведено її передатну функцію.

**Ключові слова:** передатна функція, скловарна піч, структурна модель.

**Постановка задачі та аналіз попередніх досліджень.** Передатна функція необхідна для створення і процесу синтезу системи керування скловарною піччю. Отримують із структурної моделі ванни печі, що має вигляд схеми зв'язків та дозволяє визначити керовані та не керовані елементи передатної функції.

Необхідність створення структурної моделі полягає у складності виведення передатної функції ванни скловарної печі. У свою чергу, передатна функція є складною структурою, яка залежить від передатних функцій скломаси та кладки. У праці [1] отримані передатні функції елементів скловарної печі: скломаси та кладки. З їх використанням та при входному зосередженому керуванні за витратою газу відносно розподіленого виходу температурного поля ванни створено структурну модель (рис. 1) на базі системи теплових потоків, що випромінюють скломаса  $q_{ст}$  і кладка  $q_{кл}$  ванни скловарної печі [2].

$$\begin{cases} q_{ст} = 3,5 \cdot 10^{-8} (T_{кл}^4 - T_{ст}^4) + 1,1 \cdot 10^{-8} (T_{г}^4 - T_{ст}^4) \\ q_{кл} = 2,11 \cdot 10^{-8} (T_{ст}^4 - T_{кл}^4) + 1,3 \cdot 10^{-8} (T_{г}^4 - T_{кл}^4) \end{cases} \quad (1)$$

де  $T_{ст}$ ,  $T_{кл}$ ,  $T_{г}$  – температури скломаси, кладки й газу відповідно.

Розглядаючи систему (1) у прирістах, лінеаризуючи її та використовуючи перетворення за Лапласом [3], перейдемо до вигляду:

$$\begin{cases} q_{ст}(p) = a_1 T_{ст}(p) + a_2 T_{кл}(p) + a_3 T_{г}(p) \\ q_{кл}(p) = b_1 T_{ст}(p) + b_2 T_{кл}(p) + b_3 T_{г}(p) \end{cases}$$

де коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  відповідають фізико-хімічним параметрам скломаси, кладки й газу.