

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 681.3.06

ЖУЧЕНКО А. І., СИТНИКОВ О. В.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Цінова політика паливно-енергетичного ринку постійно зростає. Актуальністю досліджень є коригування оптимізації витрат пального в скловарній печі з отриманням максимального економічного ефекту виробництва.

Використовуючи розроблену математичну модель скловарної печі, проведено аналіз: температурних режимів роботи печі, температурних полів скломаси та кладки. Температурний розподіл в перерізах скловарної печі виконується засобами імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження складається зі скломаси, газового простору, кладки та розділено на умовні перерізи (зони), відповідно встановленню засобів вимірювання температури. В поперечних перерізах основними є ті, що відповідають положенню пальників. В перерізах по шарах скломаси початковою точку виміру виступає поверхня скломаси, а кінцевою дно печі. На повздовжніх перерізах наведено поведінку плавлення шматків шихти до стану однорідності - перехід скломаси з точки завантаження шихти до повного проплавлення. Динаміка зміни температури скломаси в глибині шару скломасу представляє собою криву розігріву, чим нижчий шар розглядаються – тим температура нижча внаслідок віддаленості від пальників, але в межах одного шару температура збільшується чим ближчий переріз до точки кавельпункту. Скловарна піч відноситься до реверсивних – переключення пальників на ліві або праві групи. Відповідно переключення реверсу відбувається за заданим алгоритмом, який полягає у коригуванні часу роботи групи пальників в залежності від температури скломаси. Температурний розподіл в скломасі за показаннями температурного поля на глибині 0,1 м від верхнього рівня скломаси нижче на 5-6% від даних технологічного регламенту. Для цього збільшено витрату пального на пальниках лівої групи, дало можливість оптимізувати витрату пального. Дослідження температурного поля кладки склепіння дало можливість уникнення проблем з перегріванням та можливим обвалом кладки. Прогрівання кладки в допустимих межах від температури 1000⁰С по краях склепіння та 1380⁰С в центральній зоні. В поперечних перерізах наведено канал завантаження шихти, який межує з газовим простором, тому шихта на вході до варильної зони печі отримує додатковий підігрів та зменшується витрата пального в першій зоні на розігрів шихти. Температурний розподіл в поверхневому шарі скломаси містить неоднорідність в першій зоні, для досягнення однорідності збільшується витрати пального на першій парі пальників, що оптимізує витрату по інших парах пальників та запобігає зайвої витрати газу. Перекриття двох третин відповідної площини при вильоту з пальника першого перерізу збільшений від необхідного на 5%. В другому перерізі внаслідок недогрівання виділеної площини збільшено значення витрати пального на 12%. Температурний розподіл найнижчий в зоні завантаження, найвищий – після третьої зони до п'ятої (в зоні кавельпункту). Якщо склад шихти змінено (дія некерованого збурення), а витрата газу по пальниках залишається без зміни, то неможливо досягти значення температурних полів відповідно до технологічного регламенту.

Науковою новизною є дослідження перерізів скломаси в різних площинах, дало можливість провести аналіз температурних полів скломаси в точках де технологічно немає можливість організувати вимірювання.

Ключові слова: *температурне поле, скловарна піч, скломаса, кладка, газовий простір.*

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2022.260343

*Corresponding author: o.sitnikov@kpi.ua

Received 27 April 2022; Accepted 22 June 2022

Постановка проблеми. Основна проблема виробництва скла на вітчизняних та зарубіжних підприємствах полягає у великих енергетичних затратах. Виходячи з сучасної цінової політики на паливно-енергетичних ресурсів є актуальною необхідність розробки оптимізації витрат пального для отримання

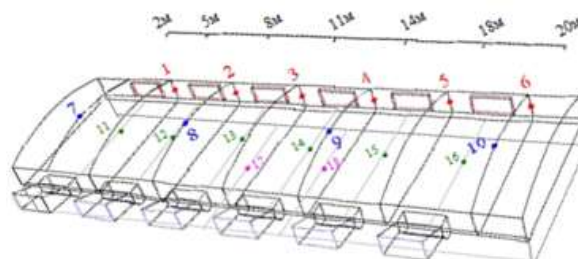
максимального економічного ефекту. При веденні технологічного процесу виготовлення скломаси необхідно мати повну інформацію про значення параметрів для якісного перебігу процесу. Технічними засобами немає можливості вимірювати температуру скломаси в довільній точці. Таким чином стоїть необхідність в розробці системи керування технологічним процесом, що буде оптимізувати витрати пального та формувати інформаційну картинку перебігу технологічного процесу виготовлення скломаси. Ставити досліди на виробництві не доцільно з економічної точки зору, тому для дослідження температурного режиму роботи необхідно використовувати математичну модель, яка буде детально описувати об'єкт керування та дасть можливість виконати дослідження температурних полів скломаси. Дана модель розроблена в роботі [1].

Аналіз попередніх досліджень. Результати досліджень представлені в роботах [2-6]. В більшості досліджень, що наведені в роботах, представляють скломасу як двовимірний об'єкт керування. В наведених роботах розглянуто скловарні печі певної конструкції за напрямком подання полум'я. Також точки вимірювання температури мають обмежений характер та не мають можливості відобразити повну картину значень температурного поля. Таким чином загальною науковою проблемою є дослідження поведінки температурних полів скломаси, в даному контексті невирішеною частиною наукової проблеми є визначення температури по шарах скломаси.

Метою статті є за отриманою математичною моделлю побудова та дослідження температурних режимів скловарної печі в різних перерізах та шарах скломаси, а також температурних полів скломаси, кладки.

Виклад основного матеріалу. При дослідженні процесу скловаріння в скловарній печі з поперечним поданням полум'я, об'єкт складається зі скломаси, кладки (бічних поверхонь, дна, склепіння), газового простору. Скловарна піч умовно розділяється на перерізи – зони, що відповідають точкам вимірювання температури скломаси (встановлення пари пальників) та представлено на рис. 1 [2,3, 7]. На виробництві керування тепловим режимом роботи печі відбуваються по встановлених точках виміру.

Перерізи в скловарній печі можуть бути двох типів: поперечні та повздовжні. Поперечні перерізи проводяться поперек руху скломаси, основними є перерізи, що відповідають положенню пальників та встановленим бічним термопарам. Повздовжні перерізи направлені вздовж руху скломаси від каналу завантаження до зони студження, показує процес розплавлення шихти та перехід до однорідності скломаси. Також розглядається перерізи шарів скломаси по глибині – від поверхневого шару скломаси (дзеркало скломаси) до дна, по поверхні встановлені пірометри для виміру температури на поверхні шару скломаси. Окрім перелічених перерізів в місцях встановлення термопар, необхідно розглянути переріз кладки в зоні склепіння, що відповідають місцям встановлення верхніх термопар та вимірюють температуру газового простору у верхній точці.



Температури: 1-6 –пальників, 7-10 –склепіння, 11-16 –виміряна пірометром, 17-18 – дна

Рис. 1 – Точки вимірювання температури скломаси

Дослідження температурного розподілу в перерізах скловарної печі доцільно виконувати за допомогою імітаційного моделювання [8]. В імітаційній моделі скловарної печі можливо змінювати (враховувати при моделюванні) технологічні параметри виробництва:

- ємність(об'єм) скломаси у ванні печі;
- об'ємне співвідношення газ-повітря;
- швидкість плавлення шихти;
- оптимізація процесу зміни кольору скла (склад шихти);

Для скловарної печі з поперечним поданням полум'я та при відповідних геометричних розмірах наведено приклад температурного поля в процесі виготовлення скломаси (плавлення шихти). Результати представлені

у вигляді зображення температурного розподілу у фіксований момент часу. Розглянута скловарна піч в 3-х проекціях.

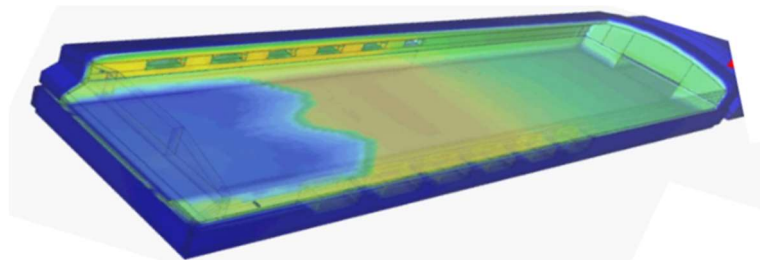


Рис. 2 – Скловарна піч – зовнішній вигляд в 3D та розміщення пальників

Суттєвим фактором є однорідність скломаси, засобами імітаційного моделювання отримано поведінку плавлення шматків шихти до стану однорідності. На рис. 3 представлено повздовжній переріз скломаси перехід скломаси з точки завантаження шихти до повного проплавлення та стану повної однорідності скломаси. Повна однорідність – суцільний колір без переходів, з ліва – тільки завантажена шихта.



Рис. 3 – Представлення переходу до однорідності скломаси

Розрахунок поведінки температури скломаси можна розглядати в динаміці, на рис. 4 по осі ординат відкладений час у хвилинах, всі значення температури розраховувалися для глибини шару $x=0.4...0.5$ м

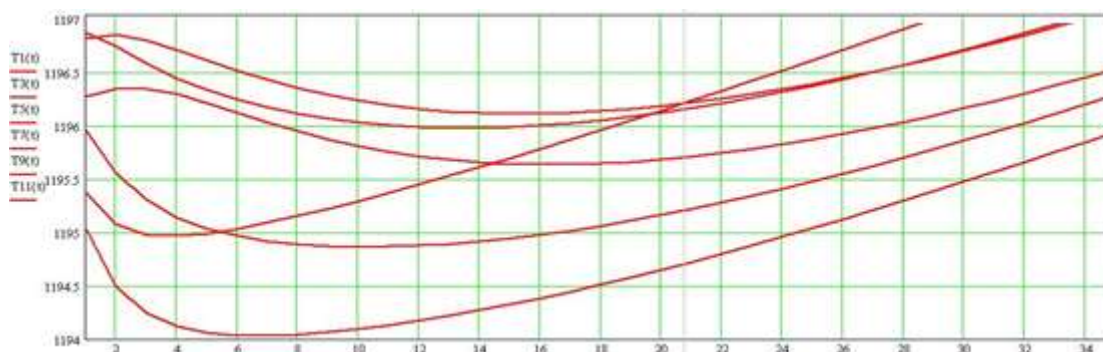


Рис. 4 – Приклад зміни температур в різних шарах скломаси (друга зона)

Представлено зміна температури в шарі скломаси від 0,4м (верхня крива) до 0,5м (нижня крива) по центру другого перерізу, час представлений в хвилинах. Для більш повної картини поведінки температурного поля зручніше розглядати не певні точки в переріз, а повний повздовжній або поперечний переріз печі в певній зоні.

Використовуючи математичну модель побудовано перерізи скловарної печі для дослідження температурного режиму в певний момент часу. На кожному з неведених перерізів температурних полів присутня шкала температур.

На рис. 5 представлено температурне поле газового простору та склепіння, чорними рисками зображено динаміку зміни температури в газовому просторі та шарах скломаси. Виходячи з положення факелу, реверсом переключена на ліву групи пальників. При необхідності можна вивести на екран значення температури, але в конкретному перерізі внаслідок того, що числове значення виводиться тільки в місці встановлення термометра.

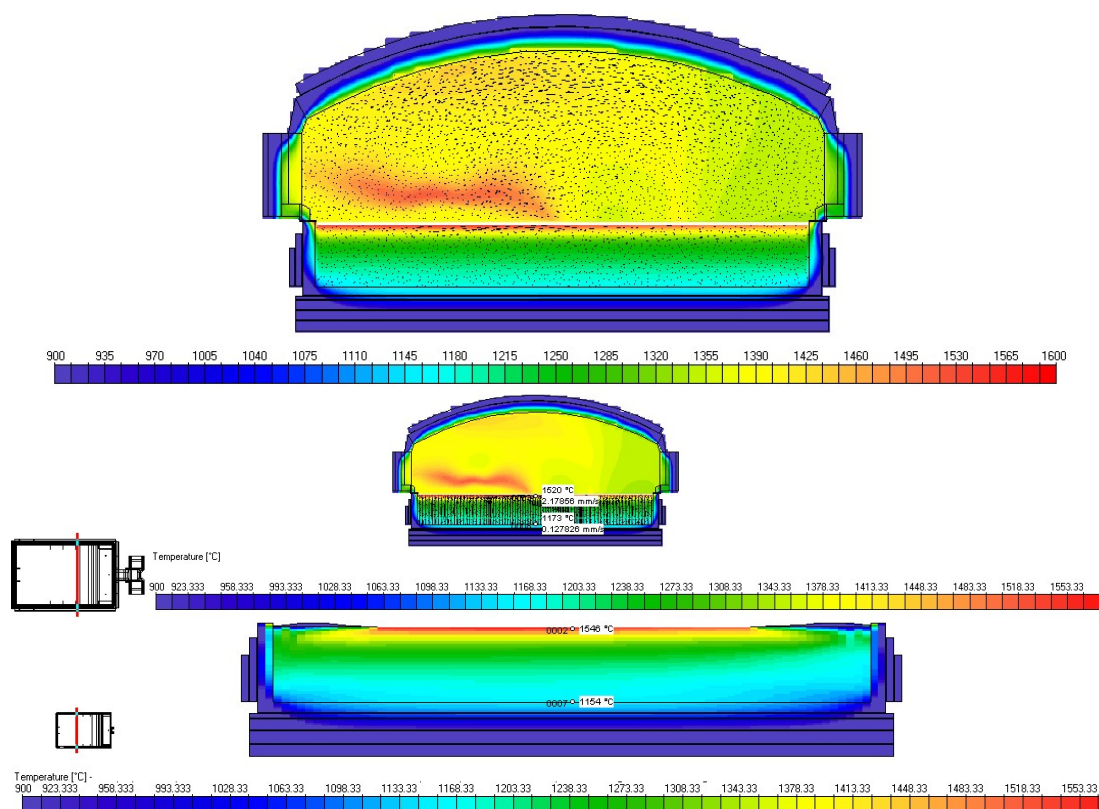


Рис. 5 – Температурний розподіл в поперечному перерізі скловарної печі

Площина перерізу представлена рискою на схематичному зображенні печі (нижче від перерізу). Температурний розподіл в скломасі, що представлено на рис. 5, виходячи з показань температурного поля, температура скломаси на глибині 0,1 м від верхнього рівня скломаси нижче на 5-6% від даних технологічного регламенту. Для цього необхідно змінити (збільшити) витрати пального на пальниках 2-ї та 3-ї пари.

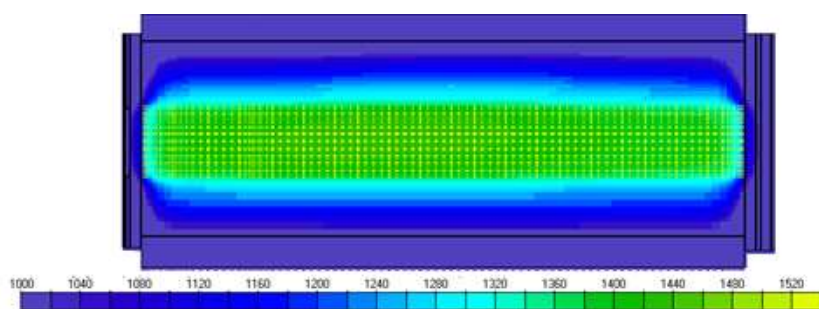


Рис.6 – Температурне поле склепіння

На виробництві мали місце випадки, коли перегрівання кладки склепіння призводило до обвалення кладки. Для уникнення даних проблем температуру склепіння вимірюють за допомогою великої кількості датчиків температури, що встановлені на рівних проміжках вздовж центральної осі для забезпечення максимального дослідження температурного поля на поверхні кладки склепіння [9, 10]. Контакт кладки склепіння та газового простору відповідають граничні умови 2-го роду. Прогрівання іде в допустимих межах та представлено, що кладка прогріта рівномірно від температури 1000^oC по краях склепіння та 1380^oC в центральній зоні. Данні показання температури входять в допустимі технологічним регламентом межі [9, 10].

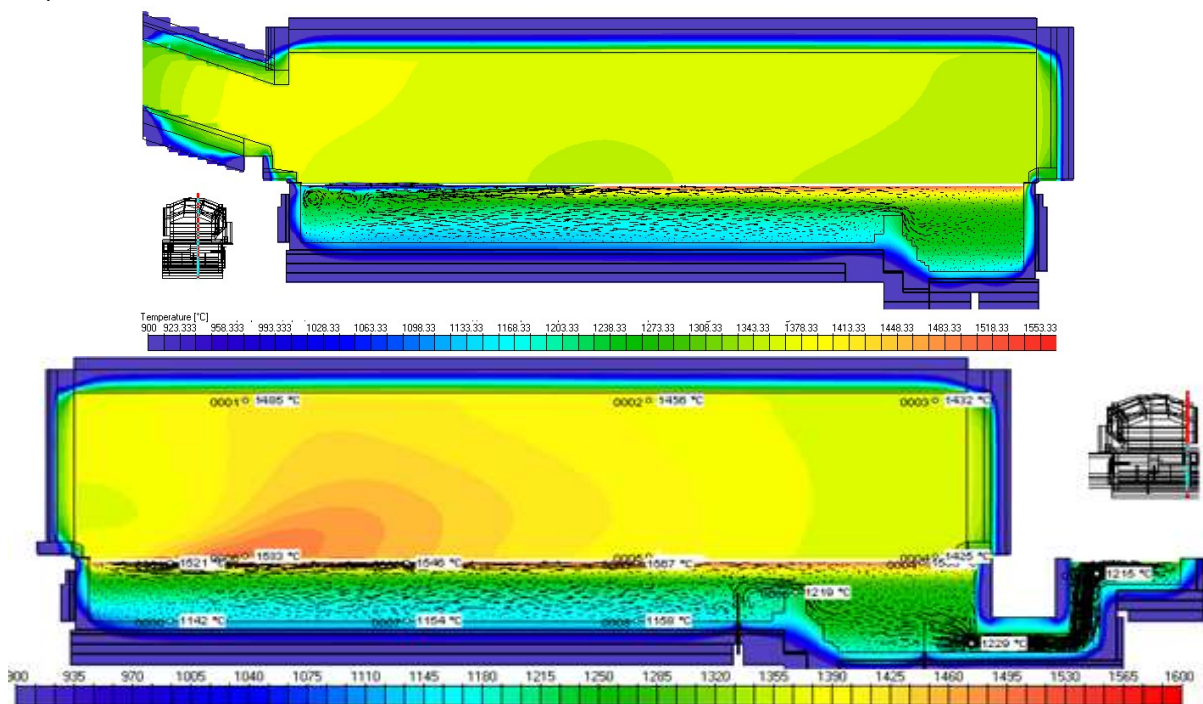


Рис. 7 – Температурний розподілі в повздовжньому перерізі скловарної печі

Завантаження шихти відбувається через канал, що межує з газовим простором печі, тому на рис. 7 температура в каналі завантаження наближається до температури газового простору. Площина повздовжнього перерізу охоплює канал завантаження, а також наведено приклад охоплення каналу виходу з ванни печі до зони студження. Температурні поля відображають температурні значення кладки склепіння, дна та торцева (бічна) поверхня, скломаса, газовий простір. Розрахований температурний розподіл показав, що прогрівання поверхні скломаси 1-ї та 2-ї зони не однорідне внаслідок процесу завантаження нової партії шихти. Однорідність температурного розподілу поверхні скломаси, досягається за рахунок збільшення витрати пального на перших двох групах пальників та перерві між завантаженням шихти, що дало можливість змодельювати повноцінне прогрівання поверхні скломаси.

Для температурного поля пальника дуже важливо однорідність та повне покривання «своєї» площі (мається на увазі, що кожний пальник вильотом полум'я повинен так покрити частину поверхні скломаси, щоб якщо розглянути покриття всіх пальників, то вся загальна площа скломаси повинна знаходитися в зоні роботи пальників). Якщо відбувається не повне покриття поверхні скломаси, буде недогрівання та виникне брак готової продукції [11-13].

Представлено на рис. 8 вихід полум'я двох перших лівих пальників, вигляд «з гори». Повністю видно розподіл температурного поля газового пальника та переріз верхнього шару скломаси. Тепловий потік з пальника, як і необхідно за технологічним регламентом, перекриває дві третини вперед від вильоту полум'я з пальника, температура найбільша в першому пальнику, та розмір покритого поля більший необхідного внаслідок збільшеної витрати пального на 5%.

По другому пальнику недогрівання виділеної площини (верхня частина другого факела пальника) тому, що значення витрати встановлено на 12% нижче за необхідне. Зменшення витрати пального було можливо виконати після того, як перший пальник покрити більше відведеного простору, а також виконати збалансування витрати – збільшення на одному, можна призвести до зменшення витрати на наступному. Однак в даному випадку не можливо зменшити на стільки витрату, внаслідок того, що відбувається недогрівання виділеної пальнику зони прогрівання. Найнижча температура в зоні завантаження, найвища – після третього пальника до п'ятого (в зоні кавельпункту – найбільшої температури). Також на рис.8 зображено температурний розподіл по поверхні скломаси та температура шихти, що завантажена в розігріту скломасу.

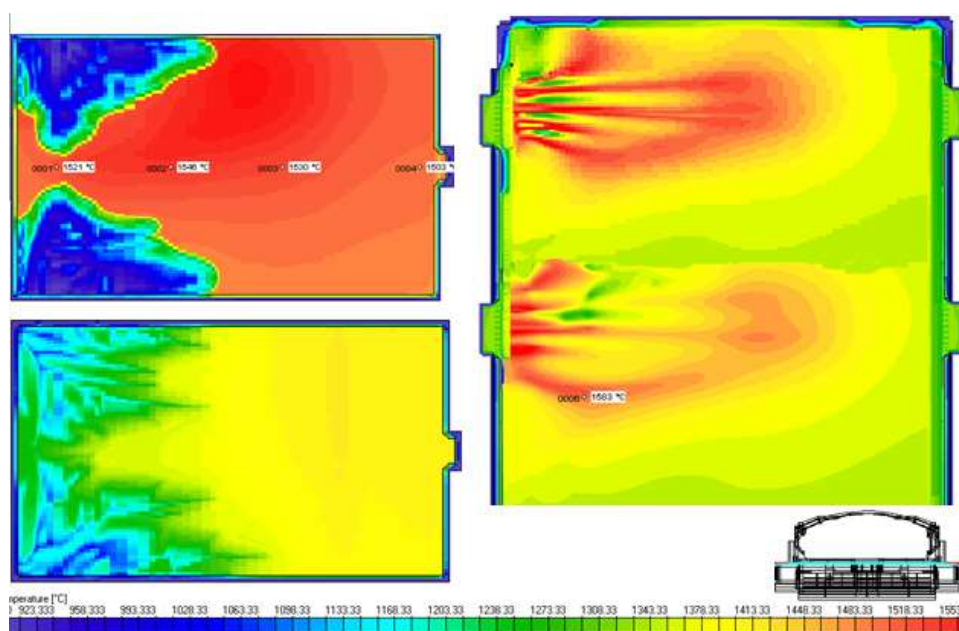


Рис. 8 – Температурний розподіл поверхневого шару скломаси та виходу полум'я з пальника печі

Дослідження поверхні скломаси дало можливість оцінити поведінку дії некерованого збурення (зміна складу шихти) [9, 13, 14]. Порівнюючи результати представлених температурних полів скломаси – досягти відповідної температури, що задана технологічним регламентом, не можливо при умові якщо витрата пального не змінюється.

Програмний блок, що використовується в дослідженнях температурних режимів роботи скловарної печі, представляє собою реалізацію класичної системи керування без можливості змінювати алгоритм керування.

Висновки. Представлені результати досліджень дозволили проаналізувати температурні поля скломаси в різних перерізах печі та кладки склепіння. Отримання скломаси, що відповідає заданому технологічному регламенту, досягається підтримкою температурного режиму у відповідних точках, які наведені в роботі. Розраховані та приведені в роботі температурні поля, побудовані за математичною моделлю скловарної печі, підтверджують її адекватність, внаслідок того, що отриманий результат відповідає значенню температури заданому.

Перспективи подальших досліджень. Система керування, яка закладена в основу програмного блоку, за своєю структурою не змінна, що є основним недоліком даного дослідження. Керування забезпечує тільки стабільність всієї системи при відсутності збурень, а адаптивна система компенсує дію збурень. Для вирішення питання компенсації дії збурень та оптимізації витрати газу необхідно розробити структуру адаптивної системи керування тепловим режимом роботи печі.

Список використаної літератури

1. Жученко А.І., Ситніков О.В., Губар Б.П. Математична модель зовнішнього теплообміну скловарної печі// Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. №4(Том 33(72)). 2022. С. 87-90 (видання, включене до міжнародної наукометричної баз даних: Index Copernicus International)
2. Яцишин Й.М. Технологія скла у трьох частинах: Ч.І. Фізика і хімія скла: Підручник для вищих навчальних закладів. Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2001. 188 с.
3. Верещагин В.И., Петровская Т.С., Дитц А.А. Технология стекла: учебное пособие. Национальный исследовательский «Томский политехнический университет». Томск, 2010. 131 с.
4. A.Abbassi, Kh.Khoshmanesh Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace // Applied Thermal Engineering. 2008. Vol. 28, Issue 5–6. P. 450-459.

5. Жученко А. И., Цапар В.С. Дослідження температурних полів скловарної печі// Східно-Європейський журнал передових технологій, №2/8 (62), 2013. С. 49-52 (видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Index Copernicus, Bielefeld Academic Search Engine, ПІНЦ, WorldCat).
 6. Дзюзер В.Я. Исследование теплообмена в стекловаренной печи с учётом селективности излучающей и поглощающей среды// Расчёт и оптимизация теплотехнических и электрохимических объектов. Свердловск. 1981. С. 40
 7. Зубанов В.А., Чугунов Е.А., Юдин И.А. Механическое оборудование стекольных и ситалловых заводов «Машиностроение». Москва, 1975. 408 с.
 8. Н. Loch, D. Krause Mathematical simulation in glass technology Springer, 2002. 477p.
 9. Югов А.М., Москаленко В.И., Ихно А.В., Юдкало Д.А. Определение температурных полей на контактирующих поверхностях внешнего контура агрегата стекловаренной печи// Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва №6(80), Донецьк. 2009. С. 76-83.
 10. Малышев С.Н. Исследование динамики температуры газового пространства ванной стекловаренной печи// Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. Москва. 1985. С. 46-54
 11. Савина И.М., Игнатов С.В. Результаты физического моделирования комбинированной пламенно-электрической печи// Исследования по интенсификации процессов промышленного стекловарения. Сборник научных трудов. Москва, 1986. – С. 66-71
 12. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г. Горелочные устройства промышленных печей и топок// «Интермет Инжиниринг», Москва, 1999. 560 с.
 13. Ралко А.В., Крупа А.А. Тепловые процессы в технологии силикатов // «Вища школа», Киев, 1986. С. 232
 14. Малышев С.Н. К вопросу управления тепловым режимом ванной стекловаренной печи// Автоматизация технологических процессов в производстве стекла. Сборник научных трудов. Москва, 1985. С. 57-61
-

Anatolii Zhuchenko, Oleksii Sytnikov

INVESTIGATION OF TEMPERATURE FIELDS OF A GLASS FURNACE

The pricing policy of the fuel and energy market is constantly growing. The urgency of research is to adjust the optimization of fuel consumption in the glass furnace to obtain the maximum economic effect of production.

Using the developed mathematical model of the glass furnace, the analysis was carried out: temperature modes of the furnace, temperature fields of glass and masonry. The temperature distribution in the sections of the glass furnace is performed by means of simulation modeling.

The object of research consists of glass mass, gas space, masonry and divided into conditional sections (zones), according to the installation of temperature measuring instruments. In cross sections, the main ones are those that correspond to the position of the burners. In sections on the layers of glass mass, the starting point of the measurement is the surface of the glass mass, and the final bottom of the furnace. The longitudinal sections show the melting behavior of the charge pieces to the state of homogeneity - the transition of glass mass from the loading point of the charge to full melting. The dynamics of glass mass temperature change in the depth of the glass mass layer is the heating curve, the lower the layer considered - the lower the temperature due to the distance from the burners, but within one layer the temperature increases the closer the section to the point. Glass furnace refers to reversible - switching burners to the left or right group. Accordingly, the reverse switching takes place according to a given algorithm, which consists in adjusting the operating time of the group of burners depending on the temperature of the glass mass. The temperature distribution in the glass mass according to the temperature field at a depth of 0.1 m from the upper level of the glass mass is lower by 5-6% from the data of technological regulations. To do this, increased fuel consumption on the burners of the left group, made it possible to optimize fuel consumption. The study of the temperature field of the vault masonry made it possible to avoid problems with overheating and possible collapse of the masonry. Heating of the masonry within the permissible limits from a temperature of 10000C at the edges of the vault and 13800C in the central zone. The cross-section shows the loading channel of the charge, which borders the gas space, so the charge at the entrance to the cooking zone of the furnace receives additional heating and reduces fuel consumption in the first zone for heating the charge. The temperature distribution in the surface layer of the glass mass contains inhomogeneity in the first zone, to achieve uniformity increases fuel consumption on the first pair of burners, which optimizes the consumption of other pairs of burners and prevents excessive gas consumption. The overlap of two thirds of the corresponding plane when leaving the burner of the first section is increased from the

required by 5%. In the second section, due to underheating of the selected plane, the value of fuel consumption increased by 12%. The temperature distribution is the lowest in the loading zone, the highest - after the third zone to the fifth (in the cave point). If the composition of the charge is changed (the action of uncontrolled perturbation), and the gas flow through the burners remains unchanged, it is impossible to achieve the value of temperature fields in accordance with the technological regulations.

A scientific novelty is the study of cross-sections of glass mass in different planes, made it possible to analyze the temperature fields of glass mass at points where it is technologically impossible to organize measurements.

Keywords: temperature field, glass furnace, glass mass, masonry, gas space

References

1. Zhuchenko A.I., Sytnikov O.V., Gubar B.P. (2022), "Mathematical model of external heat transfer of a glass furnace"// Scientific notes of Tavriya National University V.I. Vernadskoho. Series: Technical sciences. no 4 (vol.33(72)). pp. 87-90 (publication included in international scientometric databases: Index Copernicus International)
2. Yashchyshyn Y.M. (2001) "Glass technology in three parts: Ch.1. Physics and chemistry of Glass: A textbook for higher education institutions. "Lviv Polytechnic" National University". Lviv
3. Vereshchahyn V.I., Petrovskaia T.S., Dytts A.A. (2010) "Glass technology: a textbook. "Tomsk Polytechnic National Research University", Tomsk
4. A.Abbassi, Kh.Khoshmanesh (2008), "Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace", *Applied Thermal Engineering*. Vol. 28, Issue 5–6. pp. 450-459.
5. Zhuchenko A.I., Tsapar V.S. (2013) "Research of temperature fields of glass furnace", *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, no 2/8 (62), pp.49-52 (publication included in international scientometric databases: Index Copernicus, Bielefeld Academic Search Engine, RINTC, WorldCat).
6. Dziuzer V.YA. (1981) "Investigation of heat transfer in a glass furnace taking into account the selectivity of the radiating and absorbing medium", *Calculation and optimization of thermal and electrochemical objects*. Sverdlovsk, Russia, pp. 40
7. Zubanov V.A., Chuhunov E.A., Yudyn Y.A. (1975) "Mechanical equipment of glass and sital plants "Mechanical Engineering" ". Moscow, Russia
8. H. Loch, D. Krause (2002) "Mathematical simulation in glass technology". Springer
9. Yuhov A.M., Moskalenko V.Y., Ykhno A.V., Yudkalo D.A. (2009) "Determination of temperature fields on the contact surfaces of the outer contour of the unit of the glass furnace", *Technology, organization, mechanization and geodetic support of constructionno 6(80)*, Donetsk. pp. 76-83.
10. Malyshev S.N. (1985) "Study of the temperature dynamics of the gas space of a glass melting furnace", *Automation of technological processes in glass production. Collection of scientific papers*. Moscow, Russia pp.46-54
11. Savyna Y.M., Yhnatov S.V. (1986) "The results of physical modeling of a combined flame-electric furnace", *Research on the intensification of industrial glass-making processes. Collection of scientific papers*. Moscow, Russia, pp. 66-71
12. Vyntovkyn A.A., Ladyhychev M.H. (1999) "Burners for industrial furnaces and furnaces", *Intermet Engineering*. Moscow, Russia
13. Ralko A.V., Krupa A.A. (1986) "Thermal processes in the technology of silicates", *Vishcha school*, Kyev.
14. Malyshev S.N. (1985) "On the issue of thermal management of a glass-melting furnace bath", *Automation of technological processes in glass production. Collection of scientific papers*. Moscow, Russia, pp. 57-61.