Представлені результати моделювання температурного розподілу у скловарній печі, побудованого на основі математичної моделі. Наведено дослідження одержаних температурних полів у різних перетинах скловарної печі. Отримана точка температурного максимуму, підтримка у якій заданої температури дозволить отримувати якісну скломасу. Сформульовані результати дослідження температурних полів у скловарній печі з точки зору можливостей подальшого їх використання

Ключові слова: скловарна піч, температурне поле, математична модель

Представлены результаты моделирования температурного распределения в стекловаренной печи, построенного на основе математической модели. Приведены исследования полученных температурных полей в различных сечениях стекловаренной печи. Получена точка температурного максимума, поддержка в которой заданной температуры позволит получать качественную стекломассу. Сформулированы результаты исследования температурных полей в стекловаренной печи с точки зрения возможностей дальнейшего использования

Ключевые слова: стекловаренная печь, температурное поле, математическая модель

УДК 681.3.06

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

А. І. Жученко
Доктор технічних наук, професор*
В. С. Цапар
Асистент*
E-mail: cwst@ukr.net
*Кафедра автоматизації
хімічних виробництв
Національний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Сучасне виробництво скла потребує постійної наявності інформації про те, що відбувається на всіх етапах технологічного процесу. Від наявності та точності такої інформації залежить якість готових виробів та їхня собівартість. Саме тому необхідно мати інструменти для того, щоб не тільки володіти інформацією в процесі виробництва скла, а й мати можливість змоделювати основні вихідні параметри, не ризикуючи реальним станом процесу. Основним шляхом отримання такої інформації є математичне моделювання та побудова на його основі цілісної картини технологічного процесу.

2. Постановка проблеми

На даний час однією із найбільших проблем вітчизняного скловарного виробництва є 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 реалізувавши оптимальні режими процесу скловаріння. Температурний режим є визначальним режимом роботи скловарної печі [1, 6], від якого залежать всі техніко-економічні показники роботи останньої. У зв'язку з цим дослідження температурних полів скловарної печі є важливою науково-технічною задачею. Проведення такого дослідження на діючому виробництві неможливо з декількох причин:

а) з економічної точки зору це дослідження досить затратне, зважаючи на можливий брак кінцевого продукту, зумовлений проведенням експериментів;

б) з технічної точки зору дослідження температурних полів теж практично неможливе із-за відсутності відповідних засобів вимірювання температури, які повинні бути встановлені по всьому простору скловарної печі.

Виходячи з вище зазначених причин, фактично єдиною альтернативою є застосування методу математичного моделювання. У зв'язку з цим, задачею даної роботи є дослідження температурних полів скловарної печі на основі математичного моделювання.

3. Аналіз попередніх досліджень

Результати дослідження температурних полів скловарних печей представлені у декількох розглянутих працях [2-3]. Температурні поля, побудовані у роботі [2], розраховані за допомогою математичної моделі, яка описує скловарну піч як двовимірний об'єкт. Промислові експерименти і літературні джерела [1, 4, 10] свідчать про те, що температурні поля розподілені у просторі, а не на площині. Це означає, що розглянуті дослідження, наведені у роботі [3], мають приблизний характер і обмежене застосування. Невирішеною частиною наукової проблеми є моделювання розподілу температурних полів у просторі.

Результати дослідження, наведені у роботі [3] теж мають обмежене застосування у зв'язку з тим, що автори досліджують тільки температурні поля на бічних площинах басейну скловарної печі, в той час, як загальною науковою проблемою є розподіл температур у самій скломасі.

Метою цієї статті є побудова та аналіз температурних полів за математичною моделлю.

© А. І. Жученко, В. С. Цапар, 2013

4. Виклад основного матеріалу

Для дослідження температурних полів скловарної печі будемо використовувати наступну математичну модель із межовими умовами[5]:

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

де c - питома масова теплоємкість матеріалу, ρ - густина матеріалу, λ - коефіцієнт теплопровідності, q - питомий тепловий потік від пальників, $h = 10$ Вт/(м^2·К) - коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище, ε - зведений ступінь чорноти, $C_s = 5{,}67\cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2\cdot$К^4) - константа випромінювання абсолютно чорного тіла, χ, y, z - координати ширини, довжини і висоти, T_1, T_2, T_3, T_4 - температури відповідно склепіння скловарної печі, басейну, газового середовища і скломаси (рис. 1), а $T_n = 303$ К температура скломаси в початковий момент часу.

Піч, яка моделюється має наступні геометричні параметри – нижня частина печі із скломасою: ширина 9 м, довжина 15 м. глибина - перші 10 м довжини - 1.3 м, решта 5 м - 1.7 м; верхня частина печі, газо-полум'яний простір : ширина 9м, довжина 15 м, висота 1.3 м.

Для побудови температурних полів скористаємось програмним пакетом Matlab. Даний пакет дозволяє побудувати температурні поля у будь-якому перетині скловарної печі. Проаналізуємо температурні поля скловарної печі у 3-х перетинах, показаних на рис. 1.

На рис. 2 представлене температурне поле поверхні скломаси в умовах роботи лівої групи пальників. Як видно з рисунку, температура скломаси суттєво зростає від зони загрузки шихти до приблизно середини скловарної печі. У цій зоні градієнт температур значний, і різниця між максимальною і мінімальною температурою складає приблизно 400°С. У другій половині печі максимальна температура скломаси на поверхні від мінімальної відрізняється всього на 50°С, що говорить про більш стабільне температурне поле.

Як бачимо, зона найвищої температури 1460°С знаходиться не на виході з печі. Це свідчить про певну неефективність температурного режиму, що пов'язано з конструктивними особливостями печі. Слід зазначити, що при моделюванні температурного поля на поверхні скломаси в умовах роботи правої групи пальників, отримуємо симетричну картину [7, 8].

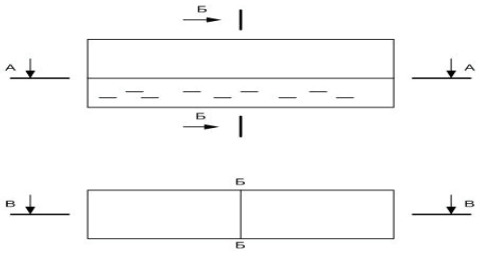

Рис. 1. Схема перетинів скловарної печі, для яких проведено моделювання і дослідження: А-А — по поверхні скломаси; Б-Б — поперечний перетин посередині скловарної печі; В-В — повздовжній перетин посередині печі

Аналізуючи температурне поле поперечного перетину посередині печі (рис. 3), можна сказати, що воно фактично стабільне у горизонтальній площині і змінюється тільки у вертикальному напрямку від поверхні скломаси до дна печі, причому різниця температур знаходиться в інтервалі до 150°С.

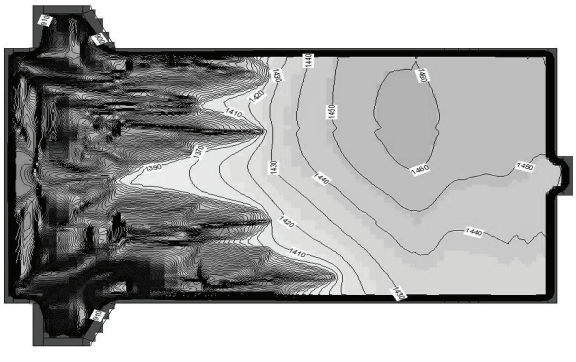

Рис. 2. Розподіл температур на поверхні скломаси (горизонтальний перетин)

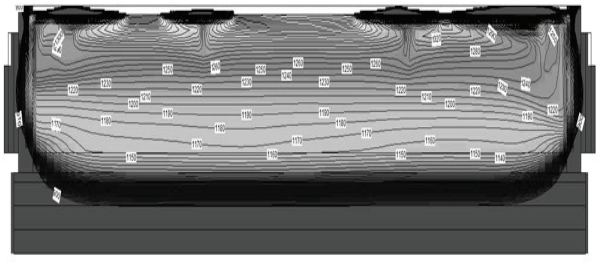

Рис. 3. Розподіл температур посередині печі (поперечний перетин)

Однією із найважливіших умов отримання якісної скломаси є досягнення нею температурного максимуму [4, 9]. Чим вище максимальна температура, тим інтенсивніше проходить процес скловаріння [1]. Як можна бачити із рис. 4 скломаса досягає свого температурного максимуму при наближенні до проточного каналу.

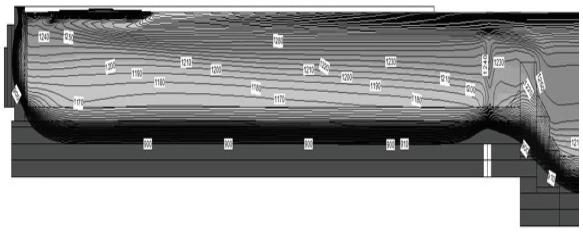

Рис. 4. Розподіл температур посередині печі (повздовжній перетин)

Відповідно при русі скломаси від загрузочних кишень до зони студки температура її поступово зростає, лінії ізотерм вказують практично на однорідність прогріву скломаси незалежно від того які пальники в даний момент працюють. Підтвердження вище наведених слів можна отримати, аналізуючи два додаткових перетини печі на рис. 5 і рис. 6.

Як бачимо, закономірності виявлені на рис. 3 і рис. 4 знаходять своє підтвердження і на рис. 5 та рис. 6.

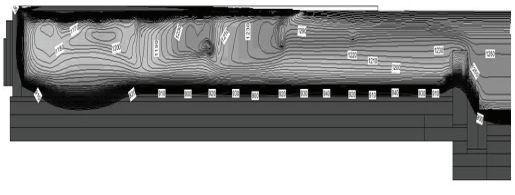

Рис. 5. Розподіл температур по лівій стороні печі (повздовжній перетин)

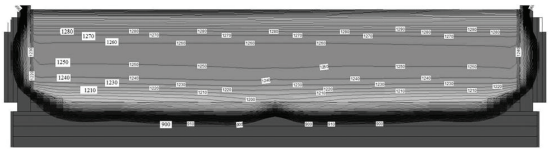

Рис. 6. Розподіл температур перед проточним каналом печі (поперечний перетин)

Отже, наведені результати дозволяють стверджувати, що для отримання якісної скломаси достатньо підтримувати на заданому рівні температуру скломаси у точці температурного максимуму, координати якої у печі можна визначити із аналізу представлених вище температурних полів.

5. Висновки

Побудовані та досліджені температурні поля у різних перетинах скловарної печі. Відповідність розрахованих і фактичних температурних полів свідчить про адекватність математичної моделі, на основі якої це дослідження проводилось. Результати даного дослідження надають можливість визначити основні точки вимірювання температури, на основі інформації про які доцільно будувати систему керування процесом скловаріння, що повинно стати предметом подальших досліджень.

Література

1. Гинзбург, Д. Г. Стекловаренные печи [Текст] / Д. Г. Гинзбург. — М. : Изд-во литературы по строительству, 1967 . — 214 с.
2. Дзюзер, В. Я. Математическая модель стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени [Текст] / 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 стекловаренной печи [Текст] / А. М. Югов, В. И. Москаленко, А. В. Ихно, Д. А. Юдкало // Вісник донбаської національної академії будівництва і архітектури. — 2009. —№ 6(80)
4. Loch, H. Mathematical simulation in glass technology [Текст] / H. Loch, D. Krause — Springer, 2002.
5. Жученко, А. І. Моделювання теплового режиму скловарної печі [Текст] / А. І. Жученко, В. О. Романенко // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження.— 2011. —№1(11)
6. Beerkens, R. G. C. Analysis of industrial glass melting processes [Текст] / R. G. C. Beerkens // Glass researcher. — 2003.
7. Chmielewski, D. J. On the theory of optimal sensor placement [Текст] / D. J. Chmielewski, T. Palmer, V. Manousiousthakis // AIChE Journal. — 2002. — №48(5). — p. 1001—1012.
8. Kuhn, W. S. Mathematical modeling of batch melting in glass tanks [Текст] / W. S. Kuhn // Mathematical simulation in glass technology. — 2002. — p. 73—137.
9. Stephanopoulos, G. Chemical process control: An introduction to theory and practice [Текст] / G. Stephanopoulos. — Prentice Hall, 1984.
10. Shelby, J. E. Introduction to Glass Science and Technology [Текст] / J. E. Shelby. — The Royal Society of Chemistry, 2005.