

Жученко А.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ситніков О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар Б.П.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗОВНІШНЬОГО ТЕПЛООБМІНУ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

У статті викладено основні положення щодо створення математичної моделі для регенеративної скловарної печі ванного типу. Процес скловаріння досить складний для експериментальних досліджень, датчики термопар устаноковуються у відповідних зонах печі, необхідна адекватна математична модель, яка буде максимально точно відобразити дані температур у точках скломаси, де установка датчиків неможлива технічно. Під час дослідження та проведення математичного моделювання використана структурно-параметрична схема печі, що враховує всі входи й виходи до об'єкта керування. Математичний опис скловарної печі включає опис рівняння зовнішнього теплообміну для скломаси, кладки й газу. Під зовнішнім теплообміном розуміють теплообмін між об'єктом і його оточенням: теплообмін між скломасою та відповідним їй навколишнім середовищем – кладкою та газовим простором. Для кожного зі складників розроблено власний математичний опис.

Складники печі (скломаса, кладка та газовий простір) мають по два контактні елементи між собою. Розроблена система рівнянь зовнішнього теплообміну, що отримується з рівнянь балансу випромінювання поверхні: ефективного й результуючого випромінювання. Відповідно до закону Ламберта, власне та відбиваюче випромінювання формують рівняння ефективного випромінювання поверхні скломаси та кладки. Виходячи з аналізу попередніх досліджень, у розв'язку задач математичного моделювання скловарної печі в першому наближенні результуюче випромінювання кладки прийнято нулю, температура скломаси та кладки взята рівним середньооефективним величинам. Розроблена й досліджена система рівнянь для теплових потоків скломаси та кладки покладена в основу створення структурної схеми скловарної печі, яка являє собою вид моделі, отриманий за допомогою схеми зв'язків між складовими елементами об'єкта.

Ключові слова: математична модель, скломаса, зовнішній теплообмін, випромінювання, тепловий потік.

Постановка проблеми. Для аналізу й синтезу системи керування необхідно розроблення досконалої моделі об'єкта керування. Побудова моделі базується на формалізації закономірностей функціонування об'єкта. Одним із найефективніших методів побудови моделі складного об'єкта є його ідентифікація.

Якість продукції та економія пального значною мірою залежать від організації теплових режимів роботи печі [1]. Процес варіння скломаси відбувається в умовах граничної температури експлуатації кладки, інтенсифікація варіння скла стає можливою при раціональному використанні теплової енергії ванни печі. Задача з дослідження теплофізичних характеристик роботи печі

необхідна для режиму роботи печі, що відповідає заданим умовам енергоефективності. У свою чергу, дослідження можливе на основі результатів математичного моделювання внутрішнього теплообміну та створення системи керування, яка б ефективно підтримувала заданий тепловий режим [2]. Складність створення математичної моделі зумовлена всім різноманіттям фізичних явищ, що протікають у процесі варіння скломаси. Сталість теплотехнічних параметрів роботи печі відповідає отриманню скломаси з високим ступенем термічної однорідності. Підтримання заданого температурного режиму скловарної печі зумовлено процесами хімічного перетворення та сприяє нагріванню шихти до температури

плавлення, повного розчинення компонентів шихти в розплаві скла.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стан математичного моделювання скловарної печі, наведений у роботах [1–7], показав процеси, які протікають під час виготовлення скломаси, взаємозв'язок між процесами та складниками печі (до процесів належить теплообмін і гідродинамічний рух скломаси у ванні печі). Виходячи з розглянутих матеріалів, виявили, що не розглянута система рівнянь зовнішнього теплообміну для скломаси, яка, у свою чергу, отримується з балансу ефективного й результуючого випромінювання скломаси, кладки та газового середовища.

Постановка завдання. Об'єктом дослідження є регенеративна скловарна піч ванного типу з поперечним поданням полум'я, що встановлена на низці вітчизняних виробничих і зарубіжних підприємств. Математична модель печі, що буде розрахована, повинна враховувати всі технологічні особливості процесу теплообміну між складниками печі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Скловарна піч як об'єкт математичного моделювання містить декілька складників: скломасу, кладку та газовий простір. Кожен зі складників моделі повинен мати свій математичний опис для розрахунку взаємодії між складниками в моделі об'єкта керування.

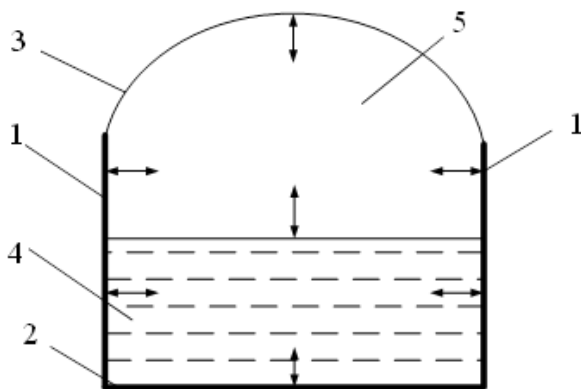


Рис. 1. Схема скловарної печі ванного типу в поперечному перерізі
1 – бокові стінки, 2 – дно, 3 – склепіння, 4 – скломаса, 5 – газовий простір

Як видно зі схеми, скломаса контактує з газовим середовищем, стінками і дном (надалі 1, 2 і 3 позначаються як кладка), газовий простір – зі скломасою та кладкою, кладка – зі скломасою та газовим простором. Взаємозв'язок складників використовується при створенні системи рівнянь теплових потоків [3; 4].

Математичний опис скловарної печі як об'єкта дослідження включає рівняння зовнішнього

теплообміну для скломаси, кладки й газу. Під зовнішнім теплообміном розуміють теплообмін між об'єктом і його оточенням – теплообмін між скломасою та середовищем, що її оточує (кладкою та газовим простором). Система рівнянь зовнішнього теплообміну отримується з рівнянь балансу для ефективного й результуючого випромінювання поверхні та середовища у вигляді рівнянь теплових потоків відповідних груп, які беруть участь у теплообміні [5; 6; 7; 8]. При цьому приймається, що ефективне випромінювання поверхні скломаси та кладки підпорядковується закону Ламберта: поглинаючі здібності випромінювачів рівні для всіх променевих потоків і дорівнюють відповідним ступеням чорноти. Оптичні характеристики випромінюючого середовища та поверхні не залежать від просторових координат і беруться як середньоефективні величини [4; 8].

Уведемо припущення [9–13]: сталість густини ефективного випромінювання скломаси та кладки, сірі властивості випромінювачів, рівність температури випромінюючого середовища за загальним об'ємом простору, що випромінюється. Поглинальні здібності випромінювачів однакові для всіх променевих потоків і рівні визначеним ступеням чорноти. Температура скломаси та кладки береться рівною середньоефективним величинам. Використаємо формулу для розрахунку передачі тепла:

$$q [4] : q = \sigma_v (T_{\text{вип}}^4 - T_{\text{пром}}^4),$$

де σ_v – видимий коефіцієнт випромінювання, $T_{\text{вип}}$ – температура випромінюючого середовища, $T_{\text{пром}}$ – температура променесприймаючого середовища.

Ефективне випромінювання дзеркала скломаси $E_{\text{еф.ск}}$ обраховується за формулою [3; 7; 8]: $E_{\text{ск}} = E_{\text{влас}} + E_{\text{відр}}$, де $E_{\text{влас}}$ – власне випромінювання, $E_{\text{відр}}$ – відбиваюче випромінювання.

Розглянемо окремо складники ефективного випромінювання дзеркала скломаси [3; 7; 8]:

$$E_{\text{влас}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{ск}} \cdot F_{\text{в}} \cdot T_{\text{ск}}^4 = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4,$$

де σ_0 – стала Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$), $\epsilon_{\text{ск}}$ – ступінь чорноти скломаси 0,82 [8; 14], $T_{\text{ск}}$ – температура скломаси, $F_{\text{в}}$ – поверхня ванни.

$$E_{\text{відр}} = E_{\text{відр.газ}} + Q_{\text{відр.кл}}$$

де $E_{\text{відр.газ}}$ – відбиваюче випромінювання газу, $Q_{\text{відр.кл}}$ – тепловий потік від кладки.

$$\begin{cases} E_{\text{відр.газ}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{газ}} \cdot F_{\text{в}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{ск}}) \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ Q_{\text{відр.кл}} = E_{\text{еф.кл}} \cdot \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{в}}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{ск}}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{\text{відр.газ}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{газ}} \cdot F_{\text{в}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{ск}}) \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ Q_{\text{відр.кл}} = E_{\text{еф.кл}} \cdot \psi_{\text{кл}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{ск}}); \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{\text{відр.газ}} \approx 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4, \\ Q_{\text{відр.кл}} \approx 0,2 \cdot E_{\text{еф.кл}}; \end{cases}$$

де $\epsilon_{\text{газ}}$ – ступінь чорноти газу 0,222 [8; 14], $T_{\text{газ}}$ – температура газу, $F_{\text{кл}}$ – поверхня кладки, $\Psi_{\text{кл}}$ – ступінь розвитку кладки, що дорівнює відношенню взаємовипромінюючих площ $\Psi_{\text{кл}} = F_{\text{кл}}/F_{\text{ск}}$, $F_{\text{ск}} = 96\text{м}^2$, $F_{\text{кл}} = 141,1\text{м}^2$, звідки: $\Psi_{\text{кл}} = 1,47$.

Таким чином, $E_{\text{еф.ск}}$ розраховується за формулою, виходячи з відповідних значень степені чорноти тіла та площі дзеркала скломаси:

$$E_{\text{еф.ск}} = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 1,47 \cdot E_{\text{еф.кл}}$$

Ефективне випромінення кладки необхідно знайти. Розрахуємо власне випромінення кладки, відбиваюче випромінення кладки й відбиваюче випромінення газу $E_{\text{влас.кл}}$, $E_{\text{відр.кл}}$, $E_{\text{відр.газ}}$ [3; 4; 8]:

$$E_{\text{влас.кл}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{кл}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot T_{\text{кл}}^4 = 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4$$

$$E_{\text{відр.кл}} = E_{\text{відр.газ}} + Q_{\text{відр.ск}} + Q_{\text{відр.кл}}$$

$$E_{\text{відр.газ}} = \sigma_0 \cdot \epsilon_{\text{газ}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot (1 - \epsilon_{\text{кл}}) = 12,43 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4,$$

де $\epsilon_{\text{кл}}$ – ступінь чорноти кладки (0,93) [8; 14], $T_{\text{кл}}$ – температура кладки.

$$\begin{aligned} Q_{\text{відр.ск}} &= E_{\text{еф.ск}} \cdot (1 - \epsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{кл}}) = \\ &= E_{\text{еф.ск}} \cdot (1 - 0,222) \cdot (1 - 0,93) = 0,05 \cdot E_{\text{еф.ск}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{відр.кл}} &= E_{\text{еф.кл}} \cdot (1 - \Psi_{\text{ск}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{газ}}) \cdot (1 - \epsilon_{\text{кл}}) = \\ E_{\text{еф.кл}} \cdot (1 - 0,68) \cdot (1 - 0,222) \cdot (1 - 0,93) &= 0,02 \cdot E_{\text{еф.кл}} \end{aligned}$$

$$E_{\text{еф.кл}} = 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 12,43 \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,05 \cdot E_{\text{еф.ск}} + 0,02 \cdot E_{\text{еф.кл}}$$

де $\Psi_{\text{ск}}$ – ступінь розвитку скломаси, що дорівнює відношенню взаємовипромінюючих площ $\Psi_{\text{ск}} = F_{\text{ск}}/F_{\text{кл}}$, $F_{\text{ск}} = 96\text{м}^2$, $F_{\text{кл}} = 141,08\text{м}^2$, отже, $\Psi_{\text{ск}} = 0,68$.

Існує залежність, що об'єднує результуюче, падаюче й ефективне випромінення [14]: $E_{\text{рез}} = E_{\text{пад}} + E_{\text{еф}}$, виходячи з якої необхідним для пошуку є значення падаючого ($E_{\text{пад}}$) та результуючого ($E_{\text{рез}}$) випромінення [3; 14]:

$$\begin{aligned} E_{\text{пад.ск}} &= \frac{E_{\text{відр.ск}}}{(1 - \epsilon_{\text{ск}})} = \frac{21,75 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 0,2 \cdot E_{\text{еф.кл}}}{(1 - 0,82)} = \\ &= 120,8 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 1,11 \cdot E_{\text{еф.кл}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{пад.кл}} &= \frac{E_{\text{відр.кл}}}{(1 - \epsilon_{\text{кл}})} = \frac{12,43 \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,05 \cdot E_{\text{еф.ск}} + 0,02 \cdot E_{\text{еф.кл}}}{(1 - 0,93)} = \\ &= 177,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,71 \cdot E_{\text{еф.ск}} + 0,28 \cdot E_{\text{еф.кл}} \end{aligned}$$

$$E_{\text{рез.ск}} = 120,8 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 1,11 \cdot E_{\text{еф.кл}} - E_{\text{еф.ск}}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{рез.кл}} &= 177,6 \cdot T_{\text{газ}}^4 \cdot 10^{-8} + 0,71 \cdot E_{\text{еф.ск}} + 0,28 \cdot E_{\text{еф.кл}} - E_{\text{еф.кл}} = \\ &= 177,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,71 \cdot E_{\text{еф.ск}} - 0,72 \cdot E_{\text{еф.кл}} \end{aligned}$$

У результаті отримана система з 4-х рівнянь з 4-ма невідомими:

$$\begin{cases} E_{\text{еф.ск}} = 446 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 21,75 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,2 \cdot E_{\text{еф.кл}}, \\ E_{\text{еф.кл}} = 744 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 12,43 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,05 \cdot E_{\text{еф.ск}} + 0,02 \cdot E_{\text{еф.кл}}, \\ E_{\text{рез.ск}} = 120,8 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 1,11 \cdot E_{\text{еф.кл}} - E_{\text{еф.ск}}, \\ E_{\text{рез.кл}} = 177,6 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4 + 0,71 \cdot E_{\text{еф.ск}} - 0,72 \cdot E_{\text{еф.кл}}; \end{cases}$$

де $E_{\text{рез.ск}}$ – результуюче випромінення для теплового потоку скломаси $q_{\text{ск}}$, $E_{\text{рез.кл}}$ – результуюче випромінення для теплового потоку кладки $q_{\text{кл}}$ [4]. Розв'язуємо систему відносно $E_{\text{рез.ск}}$ та $E_{\text{рез.кл}}$:

$$q_{\text{ск}} = \frac{E_{\text{рез.ск}}}{F_{\text{ск}}} = \frac{-435,8 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}}^4 + 343,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}}^4 + 105,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}}^4}{96}$$

Таким чином, тепловий потік для скломаси та кладки буде мати вигляд:

$$\begin{cases} q_{\text{ск}} = 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{кл}}^4 - T_{\text{ск}}^4) + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_{\text{ск}}^4), \\ q_{\text{кл}} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{ск}}^4 - T_{\text{кл}}^4) + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_{\text{кл}}^4); \end{cases}$$

У результаті отримана система рівнянь для теплових потоків, що буде використана при створенні структурної моделі об'єкта [16].

Унаслідок того що процес скловаріння відбувається у вузькому температурному діапазоні, необхідно обмежитися лінеаризованими рівняннями для теплових потоків скломаси та кладки. Лінеаризація відбувається використовуючи розкладання в ряд Тейлора та нехтуючи величинами другого та вищого порядку внаслідок їх малого значення [4; 8; 15]. Доданки з приростом у степені 2 досить малі, тому прирівнюються до 0 [4]:

$$\begin{cases} q_{\text{ск}0} + \Delta q_{\text{ск}} = -4,54 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}0}^4 - 18,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}0}^3 \Delta T_{\text{ск}} + 3,57 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}0}^4 + \\ + 14,28 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}0}^3 \Delta T_{\text{кл}} + 1,1 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}0}^4 + 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}0}^3 \Delta T_{\text{газ}}, \\ q_{\text{кл}0} + \Delta q_{\text{кл}} = 2,11 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}0}^4 + 8,44 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}0}^3 \Delta T_{\text{ск}} - 3,41 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}0}^4 - \\ - 13,64 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}0}^3 \Delta T_{\text{кл}} + 1,3 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}0}^4 + 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}0}^3 \Delta T_{\text{газ}}; \end{cases}$$

де $T_{\text{ск}0}$, $T_{\text{кл}0}$, $T_{\text{газ}0}$ – початкові значення температури скломаси, газу та кладки згідно з технологічним регламентом, що можуть змінюватися залежно від початку точки відліку.

Виконаємо перетворення за Лапласом відповідної системи рівнянь:

$$\begin{cases} q_{\text{ск}}(p) = a_1 \cdot T_{\text{ск}}(p) + a_2 \cdot T_{\text{кл}}(p) + a_3 \cdot T_{\text{газ}}(p), \\ q_{\text{кл}}(p) = b_1 \cdot T_{\text{ск}}(p) + b_2 \cdot T_{\text{кл}}(p) + b_3 \cdot T_{\text{газ}}(p); \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{де } a_1 &= -18,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}0}^3, a_2 = 12 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}0}^3, a_3 = 4,4 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}0}^3, \\ b_1 &= 8,44 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{ск}0}^3, b_2 = -13,64 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{кл}0}^3, b_3 = 5,2 \cdot 10^{-8} \cdot T_{\text{газ}0}^3; \end{aligned}$$

Висновки. Таким чином, отримана система рівнянь для теплових потоків, представлена в перетвореннях за Лапласом, буде покладена в основу створення структурної моделі об'єкта керування.

Список літератури:

1. Малышев С.Н. К вопросу управления тепловым режимом ванной стекловаренной печи. *Автоматизация технологических процессов в производстве стекла* : сборник науч. трудов. Москва, 1985. С. 57–61.
2. Мастрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей *Металлургия*. Москва, 1972. 368 с.
3. Суринов Ю.А. Об основных методах современной теории лучистого теплообмена. *Проблемы энергетики* : сборник / АН СССР. Москва, 1959. С. 423–469.
4. Лыков А.В. Терия теплопроводности. Москва : Высш. шк., 1967. 600 с.
5. Фетисов Б.А. Математическая модель внешнего теплообмена в пламенном пространстве ванной печи листового стекла. *Стекло и керамика*. 1996. № 5. С. 3–5.
6. Макаров Е.П., Кузнецов Ю.К. Моделирование тепло- и массообменных процессов, протекающих в газозлектрических стекловаренных печах : сборник науч. трудов. Москва, 1985. С. 26–30.
7. Шаеффер Н.А., Хойзнер К.Х. Технология стекла. Кишинёв : СТИ-Print, 1998. 279 с.
8. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. Москва : Атомиздат, 1979. 416 с.
9. Дзюзер В.Я. Исследование теплообмена в стекловаренной печи с учётом селективности излучающей и поглощающей среды : тез. док. *Расчёт и оптимизация теплотехнических и электрохимических объектов*. Свердловск, 1981. С. 40.
10. Малышев С.Н. Исследование динамики температуры газового пространства ванной стекловаренной печи *Автоматизация технологических процессов в производстве стекла* : сборник науч. трудов. Москва, 1985. С. 46–54.
11. Лисовская Г.П., Сенатова В.А. Математическое моделирование влияния технологических и конструкционных параметров стекловаренных печей на конвекционные потоки и процессы гомогенизации стекломассы. *Исследования по интенсификации процессов промышленного стекловарения* : сборник науч. трудов. Москва, 1986. С. 111–120.
12. Тепло- и массообменные аппараты и установки промышленных предприятий : учебное пособие : в 2 т. / Б.А. Левченко, Э.Г. Братута, А.В. Ефимов и др. ; под. ред. Б.А. Левченко. Харьков : НТУ «ХПИ», 2000. Ч. 2. 333 с.
13. Судзински Я. О разработке математических моделей течения стеклянной массы в ваннах стекловаренных печах (теоретический анализ и численные алгоритмы). Москва : Ступень, 1994. 112 с.
14. Расчет лучистых тепловых потоков / Е.Л. Березаяокая и др. Москва : МАИ, 1989. 64 с.
15. Кубрак А.І., Жученко А.І., Кваско М.З. Комп'ютерне моделювання та ідентифікація автоматичних систем : навчальний посібник. Київ : Політехніка, 2004. 424 с.
16. Рапорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами : учебное пособие. Москва : Высш. шк., 2003. 299 с.

Zhuchenko A.I., Sytnikov A.V., Gubar B.P. MATHEMATICAL MODEL OF EXTERNAL HEAT EXCHANGE OF GLASS FURNACE

The article presents the main provisions for creating a mathematical model for a regenerative glass furnace of the bathroom type. The glassmaking process is quite complex for experimental research, thermocouple sensors are installed in the appropriate areas of the furnace, an adequate mathematical model is needed, which will most accurately display temperature data at points of glass mass where the installation of sensors is not technically possible. During the research and mathematical modeling, the structural-parametric scheme of the furnace was used, which takes into account all the inputs and outputs to the control object. In this paper, the mathematical description of the glass furnace includes a description of the equations of external heat exchange for glass, masonry and gas. External heat exchange means heat exchange between an object and its environment: heat exchange between glass mass and its corresponding environment – masonry and gas space. For each of the components developed its own mathematical description.

Components of furnaces (glass, masonry and gas space) have two contact elements. The system of external heat exchange equations derived from the equations of surface radiation balance is developed in the work: effective and resultant radiation. According to Lambert's law, the intrinsic and reflective radiation form the equation of the effective radiation of the glass mass and masonry surface. Based on the analysis of previous studies, in solving the problems of mathematical modeling of the glass furnace, the first approximation of the resulting radiation of the masonry is zero, the temperature of the glass and masonry is taken equal to the effective values. The system of equations for heat fluxes of glass mass and masonry is developed and researched in the work, it is the basis of creation of the structural scheme of the glass furnace, which is a kind of model obtained by the scheme of connections between the constituent elements of the object.

Key words: mathematical model, molten glass, external heat exchange, radiation, heat flux.