

УДК 622.788:552

DOI: <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2021-2-01>

Мних Антон Сергійович, професор, доктор технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5421-0462

Пазюк Михайло Юрійович, завідувач кафедри, професор, доктор технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5424-0462

Овчинникова Ірина Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-40354-12X

Баришенко Олена Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6642-6341

Міняйло Наталія Олександрівна, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-0628-5188

ПРО МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В СТАЦІОНАРНИХ ШАРАХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто питання математичного моделювання теплофізичних властивостей шару сипкого матеріалу, що дає змогу врахувати та відобразити основні властивості процесу агломерації. Запропоновано методику об'єднання в моделі уявлень про частинку сипкого матеріалу як термічно тонкого та термічно масивного тіла. Досліджено вплив параметрів однорідного моно- та полідисперсного шару на його коефіцієнт теплопровідності. Також виконано оцінку впливу системи завантаження та формування шару на розподіл матеріалу щодо фракції та теплофізичні властивості як локальних горизонтів, так і всього шару в цілому. На підставі експериментальних даних встановлено закономірності змінювання об'ємного коефіцієнта теплопередачі в шарах сипких матеріалів. Подано математичний опис розглянутих процесів, визначено початкові та граничні умови застосування моделі. Отримана модель однаково добре описує теплофізичні процеси як в шарах без внутрішніх джерел енергії, так і в шарах із спалюванням у них твердого палива.

Ключові слова: шар сипкого полідисперсного матеріалу, процеси теплообміну, коефіцієнт теплопровідності, математична модель, початкові та граничні умови процесу

Вступ. Загальний методологічний підхід до опису теплових процесів, що відбуваються у шарі сипкого матеріалу, сформовано та подано у роботах [1–3]. Подальше узагальнення та розвиток досліджень теплотехнічних особливостей зазначених процесів було виконано у роботах [4–6].

Постановка завдання. Виконати математичне моделювання процесів теплообміну в стаціонарних шарах сипких матеріалів.

Головна частина досліджень. Під час опису теплофізичних процесів у шарах сипких матеріалів застосовують низку припущень, прагнучі досягти збереження у моделі шару, якого піддають агломерації, найбільш важливих характеристик та особливостей процесу, таких як: фізико-хімічні характеристики сировини та палива, фракційний склад початкового матеріалу, міра сегрегації класів матеріалу, яка характеризує структуру шару, що підготовлено до теплової обробки.

Вказане завдання суттєво ускладнюється під час переходу до оцінки локальних характеристик теплообміну, знання яких дозволяє виконувати детальну оцінку

відбування процесу в цілому, обґрунтовано вирішувати завдання щодо визначення кількості теплоти, що виділяється та поглинається, за хімічних реакцій і фазових переходів, а також аналізувати рівномірність нагрівання шару сипкого матеріалу.

Закономірності протікання теплових процесів у шарі монодисперсних матеріалів є характерними для випалення залізородних окатишів на конвеєрних машинах. Загальну схему теплообміну в такому шарі подано на рис. 1.

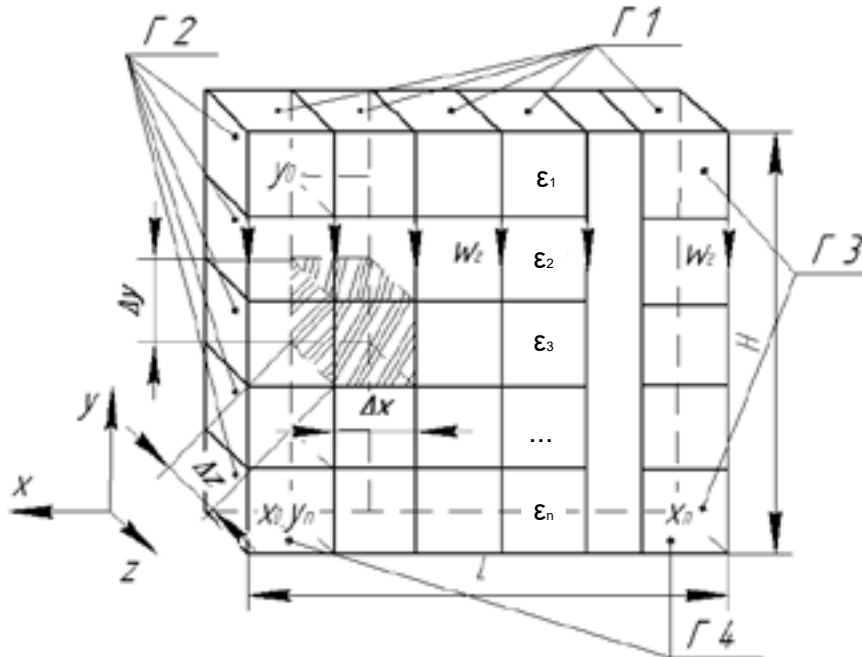


Рисунок 1 – Схема теплообміну в пористому монодисперсному шарі

Фізичну модель процесу можна представити таким чином: через шар монодисперсного сипкого матеріалу з порозністю $\epsilon_1 = \epsilon_n = \text{const}$, що має висоту H і температуру T_m , рухається газ з температурою на вході в шар T_2 і швидкістю потоку ω_2 .

Приймаємо шар сипкого матеріалу на палеті конвеєрної машини стаціонарним, де градієнт температур спрямований за віссю y . Для дотримання технологічних вимог потрібно забезпечити певний рівень температури за висотою та шириною палети (x, y). Оскільки розглядається квазістаціонарний процес випалення, тобто вплив руху шару на теплопередачу уздовж осі руху (z) не враховують, то здійснюють перехід до двовірної моделі.

У основу математичної моделі шару, що піддають агломерації, покладено уявлення про частинки сипкого матеріалу як про термічно тонкі тіла. Це дало змогу розглядати елементарний об'єм шару як суцільне тіло, в об'ємі якого поперемінно діють джерела та стоки теплоти. Масивність частинок матеріалу, при цьому, враховували шляхом введення поправки до розрахунку об'ємного коефіцієнта тепловіддачі α_v [7].

Також приймаємо наступні припущення: тепловий потік від газу до гранул у будь-якій точці шару є пропорційним різниці температур між поверхнею частинок і газом; коефіцієнт тепловіддачі від газу до гранул є постійним для всієї поверхні частки.

Згідно теплового балансу, теплота Q_1 , яку відведено до деякого елемента шару, дорівнює теплоті Q , що поглинається ним

$$dQ_1 = dQ. \quad (1)$$

Для виведення диференціального рівняння теплопровідності виділимо в шарі елементарний об'єм V із сторонами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Грані вказаного об'єму розташовано паралельно відповідним координатним осям.

Згідно із законом збереження енергії, кількість теплоти Q_1 , що введено в елементарний об'єм ззовні за час τ теплопровідністю, складає [8]:

$$dQ_1 = dq dx d\tau, \quad (2)$$

де q – вектор щільності теплового потоку, Вт/м.

Враховуючи, що теплота в одиничному об'ємі поширюється за нормаллю до ізометричних поверхонь, кількість теплоти, що є підведеною теплопровідністю до даного об'єму, за трьома координатними осями буде дорівнювати

$$dQ_1 = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz d\tau, \quad (3)$$

де q_x, q_y, q_z – кількість теплоти, що поступає в об'єм за відповідними гранями, Вт/м².

Теплоту, яку підведено до об'єму під час розгляду ізобарного процесу, витрачають на змінювання ентальпії матеріалу, що знаходиться в цьому об'ємі за рахунок теплопровідності та конвекції газу, дотичного до частинок в шарі матеріалу. Враховуючи, що напрямок руху продуктів горіння відбувається тільки за віссю y , можна записати:

$$dQ = c_{pm} \cdot \rho_{нас} \cdot \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] dx dy dz dt, \quad (4)$$

де c_{pm} – ізобарна теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); $\rho_{нас}$ – насипна щільність шару матеріалу, кг/м³; T_m – температура матеріалу, К.

Підставляючи рівняння (3) і (4) до рівняння (1) можна записати:

$$c_{pm} \cdot \rho_{нас} \cdot \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Враховуючи, що теплообмін між частинками здійснюється за законом Фур'є: $q = -\lambda(\partial T / \partial x)$, рівняння (5), з урахуванням заміни вектора щільності теплового потоку, набирає вигляду:

$$c_{pm} \cdot \rho_{нас} \cdot \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right], \quad (6)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Виходячи з того, що шар монодисперсного матеріалу складається з частинок однакового розміру $d = \text{const}$, впливом розміру частинок на коефіцієнт теплопровідності можна нехтувати $\lambda(d) = \text{const}$. Беручи до уваги результати експериментів А.У. Франчука [9], можна зробити висновок про суттєвий вплив вологості матеріалу W на його теплопровідність. Слід зазначити, що теплофізичні властивості матеріалу також змінюються під час змінювання його температури, тобто у рівнянні (6) коефіцієнт теплопровідності можна представити як $\lambda = f(T, W)$. Теплоємність і щільність матеріалу, в свою чергу, також залежать від температури $c = f(T)$, $\rho = f(T)$.

Приймаючи, що насипна щільність шару, що складається з окремих частинок матеріалу з щільністю ρ_m , дорівнює $\rho_{нас} = \rho_m \cdot (1 - \varepsilon)$, рівняння (6) можна записати у вигляді

$$c_{pm}(T) \cdot \rho_m(T) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right]. \quad (7)$$

Враховуючи, що в шарі сипкого матеріалу відбувається теплообмін конвекцією між потоками газу та поверхнею частинок, рівняння (7) потрібно доповнити диференціальним рівнянням теплообміну в шарі.

Приймаємо, що продукти горіння, проходячи через вказаний об'єм шару V , за нескінченно малий проміжок часу передає матеріалу частину теплоти Q_2 , кількість якої, згідно до закону Ньютона-Рихмана, буде дорівнювати

$$dQ_2 = \alpha_v \cdot (T_z - T_m) dx dy dz d\tau, \quad (8)$$

де α_v – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м³·К).

Під час руху газового потоку за координатою y кількість теплоти переданої газом Q_2 складає

$$dQ_3 = -c_2 \cdot \rho_2 \cdot \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \frac{\partial T_z}{\partial y}, \quad (9)$$

де c_2 – теплоємність газу, кДж/(кг·К); ρ_2 – щільність газу, кг/м³; ω_2 – швидкість газового потоку, м/с, ε – порозність шару, м³/м³.

Прирівнюючи рівняння (8) і (9), отримаємо:

$$\alpha_v \cdot (T_z - T_m) = -c_2 \cdot \rho_2 \cdot \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \frac{\partial T_z}{\partial y}. \quad (10)$$

Рівняння (7) і (10) описують змінювання температури шару під час його теплової обробки. Проте, враховуючи, що структура шару суттєво впливає на його гідравлічний опір, і як наслідок на інтенсивність процесів теплообміну в останньому, наведені рівняння слід доповнити рівнянням газодинаміки.

Для опису втрат тиску в окремій зоні та шару в цілому, можна використовувати формулу, що є інтерпретацією формули Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P = \psi_{uu} \cdot \omega_2^2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{h}{r_e} \cdot (1 + \beta \cdot T), \quad (11)$$

де ψ_{uu} – коефіцієнт опору шару матеріалу; ω_2 – швидкість руху газів, що просмоктується через шар, м/с; h – висота шару, м; r_e – радіус еквівалентного каналу, м; β – коефіцієнт об'ємного розширення газу, К⁻¹.

Рівняння (7) і (10) з урахуванням теплообміну в шарі між продуктами згорання та матеріалом, а також рівняння що характеризує змінювання швидкості фільтрації продуктів горіння за висотою шару (11) є системою рівнянь, що описують теплові процеси, які відбуваються у шарі монодисперсного матеріалу:

$$\begin{aligned} & c_{pm}(T) \cdot \rho_m(T) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_2 \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = \\ & = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left(\lambda(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right] + q_z(y) \\ & \alpha_v \cdot (T_z - T_m) = -c_2 \cdot \rho_2 \cdot \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_2 \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 \frac{\partial T_z}{\partial y}. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\Delta P = \psi_{uu} \cdot \omega_2^2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{h}{r_e} \cdot (1 + \beta \cdot T),$$

де $q_z(y)$ – потужність ефективного джерела теплоти (запального горна, продуктів згорання) за висотою шару, Вт/м.

Виходячи з того, що за реальних технологічних умов на шар монодисперсного матеріалу, що знаходиться на конвеєрній машині, згори діє джерело постійної температури, а з боків і знизу шар контактує із зовнішнім середовищем за допомогою теплообміну конвекцією, початкові та граничні умови процесу можна записати у вигляді:

$$\tau_0 = 0, T_m(x, y, z) = T_0, T_z(x, y, z) = T_0, \Delta P(y) = \Delta P(\tau_0); \quad (13)$$

$$y = y_0; T_m|_{\Gamma_1} = T_z, \tau > 0; \quad (14)$$

$$x = x_0; \lambda_m(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_F \cdot [T_m(x, y, z) - T_{o.c.}], \tau > 0; \quad (15)$$

$$x = x_n; -\lambda_m(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_3} = \alpha_F \cdot [T_m(x, y, z) - T_{o.c.}], \tau > 0; \quad (16)$$

$$y = y_n; \lambda_m(T, W) \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big|_{\Gamma_4} = \alpha_F \cdot [T_m(x, y, z) - T_{o.c.}], \tau > 0; \quad (17)$$

$$z_0 - z_n = 1. \quad (18)$$

Система рівнянь (12), що доповнена початковими та граничними умовами, є загальним математичним формулюванням завдання, що розглядають. Наведені рівняння описують розподіл температури у шарі монодисперсного матеріалу, характерного для шару залізородних окатишів, що дає змогу їх використовувати під час досліджень теплових процесів, які відбуваються у випаленому матеріалі.

Проте математичний опис теплових процесів у шарі сипких полідисперсних матеріалів, ускладнюється необхідністю урахування додаткових локальних характеристик теплообміну. Ключовий вплив на структуру шару робитиме фракційний склад сипкого матеріалу, який, в свою чергу, визначає порозність ε шару, сформованого на палеті конвеєрної машини.

За розглядом теплових процесів, що відбуваються в полідисперсному матеріалі, слід враховувати, що порозність не є постійною величиною за висотою шару h (рис. 1).

З урахуванням впливу розміру частинок сипкого матеріалу на коефіцієнт теплопровідності, система рівнянь (18) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} & c_{pm}(T) \cdot \rho_m(T) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left[\frac{\partial T_m}{\partial t} + \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y} \right] = \\ & = \left[\frac{\partial T_m}{\partial x} \left(\lambda(T, W, d) \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial y} \left(\lambda(T, W, d) \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + \frac{\partial T_m}{\partial z} \left(\lambda(T, W, d) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \right] \cdot q_z(y) \\ & \alpha_v \cdot (T_z - T_m) = -c_z \cdot \rho_z \cdot \varepsilon \frac{\partial T_z}{\partial t} - c_z \cdot \rho_z \cdot \omega_z \frac{\partial T_z}{\partial y}. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\Delta P = \psi_{su} \cdot \omega_z^2 \cdot \rho_z \cdot \frac{h}{r_s} \cdot (1 + \beta \cdot T).$$

Під час визначення значень коефіцієнта теплопровідності залежно від впливу фізичної величини, в системі рівнянь (19) виконуємо заміну змінною $\lambda(T, W, d)$ на середньозважене значення коефіцієнта теплопровідності λ_Σ , яке визначається за формулою

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot r_i; \quad (20)$$

де λ_i – значення коефіцієнта теплопровідності залежно від фізичної величини T, W та d , Вт/(м·К); r_i – міра впливу фізичної величини на λ , долі.

За визначенням чисельних значень коефіцієнта r_i виконано обробку дослідних даних роботи [9], що представлено в табл. 1. Діапазон змінювання експериментальних даних стосовно реальних характеристик сировинних матеріалів було вибрано $W = (6 \dots 12)\%$, $d = (0,14 \dots 0,917)$, мм і тепловому режиму роботи конвеєрних машин (293...1473) К.

В результаті встановлено інтервал варіювання міри впливу вказаних фізичних величин на коефіцієнт теплопровідності, який складає

$$r_i(W) = \frac{\eta(W)}{\eta_\Sigma} = 0,41\dots 0,58; \quad r_i(d) = \frac{\eta(d)}{\eta_\Sigma} = 0,17\dots 0,22; \quad r_i(T) = \frac{\eta(T)}{\eta_\Sigma} = 0,20\dots 0,42,$$

де $\eta(W)$, $\eta(d)$, $\eta(T)$ – діапазон змінювання коефіцієнта теплопровідності залежно від відповідної фізичної величини, Вт/(м·К); η_Σ – значення сумарної дії фізичних величин на коефіцієнт теплопровідності зернистого шару, Вт/(м·К).

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта теплопровідності від параметрів W , d , T

| Параметри | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| W , % | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $\lambda(W)$, Вт/(м·К) | 0,814 | 0,861 | 0,884 | 0,907 | 0,930 | 0,954 | 0,977 |
| d , мм | 0,14 | 0,25 | 1,84 | 3,15 | 5,83 | 7,21 | 9,17 |
| $\lambda(d)$ Вт/(м·К) | 0,293 | 0,306 | 0,324 | 0,340 | 0,355 | 0,370 | 0,405 |
| T , К | 293 | 473 | 673 | 873 | 1073 | 1273 | 1473 |
| $\lambda(T)$ Вт/(м·К) | 0,283 | 0,315 | 0,325 | 0,360 | 0,470 | 0,720 | 0,980 |

За описання граничних умов для полідисперсного шару слід враховувати, що коефіцієнт тепловіддачі не є постійною величиною $\alpha_F \neq \text{const}$ та змінюється за висотою та шириною шару, що відповідає залежності [11]:

$$\alpha_V = \alpha_F \cdot \frac{6(1-f)}{d_m} \cdot \frac{1}{m}, \quad (21)$$

де f – площа грані одиничного об'єму шару, м²; d_m – діаметр частинки, м; m – поправка на масивність частинок, $m = 1 + Bi \cdot (k_3 - 1 / k_3 \cdot k_2)$; k_2 – коефіцієнт усереднювання щільності теплового потоку за перерізом тіла; k_3 – коефіцієнт усереднювання середньомасової температури за перерізом тіла. [12; 13]; Bi – критерій Біо.

Для розрахунків коефіцієнта тепловіддачі, що входить до складу системи рівнянь (19), для частинок сферичної або близької до неї форми використано формули В.Н. Тимофеева, що мають вигляд:

$$Nu = 0,61 Re^{0,67} \quad \text{за } Re > 200 \quad (22)$$

$$Nu = 0,196 Re \quad \text{за } Re \leq 200$$

де $Nu = \alpha_F \cdot d_m / \lambda_g$; $Re = \omega_z \cdot d_m / \nu_z$; $\alpha_F = \alpha_V / F$; $F = 6(1-f) / d_m$; ω_z – швидкість руху продуктів згорання, м/с; d_m – середній діаметр частинок матеріалу, м; ν_z – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу; λ_g – коефіцієнт теплопровідності газу.

На підставі експериментальних даних щодо визначення середнього діаметру сипкого залізородного матеріалу з урахуванням використання завантажувальних вузлів вібраційного і барабанного типу встановлено закономірності змінювання об'ємного коефіцієнта тепловіддачі для шарів шихти, підготовленої до теплової обробки (рис. 2).

Одержані результати свідчать про значний вплив міри розподілу класів сипкого матеріалу під час використання різних завантажувальних систем. Спостерігають істотну нерівномірність значень коефіцієнта тепловіддачі для верхніх і нижніх горизонтів шару під час використання вібраційного живильника ($\alpha_V = 2800\dots 9500$ Вт/(м³·К). За використанням барабанного живильника спостерігають монотонне зниження значень коефіцієнта α_V , його змінювання відбувається у діапазоні 3300...4800 Вт/(м³·К).

Таким чином, граничні умови за незмінних початкових умов для даного полідисперсного шару можна записати у вигляді:

$$y = y_0; \quad T_m|_{\Gamma_1} = T_2, \tau > 0; \quad (23)$$

$$x = x_0; \quad \lambda_\Sigma \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_{F_1} \cdot [T_m(x, y, z) - T_{o.c.}], \tau > 0; \quad (24)$$

$$x = x_n; \quad -\lambda_{\Sigma} \left. \frac{\partial T_M}{\partial x} \right|_{\Gamma_3} = \alpha_{F_2} \cdot [T_M(x, y, z) - T_{o.c.}], \tau > 0; \quad (25)$$

$$y = y_n; \quad \lambda_{\Sigma} \left. \frac{\partial T_M}{\partial y} \right|_{\Gamma_4} = \alpha_{F_3} \cdot [T_M(x, y, z) - T_{o.c.}], \tau > 0; \quad (26)$$

$$z_0 - z_n = 1. \quad (27)$$

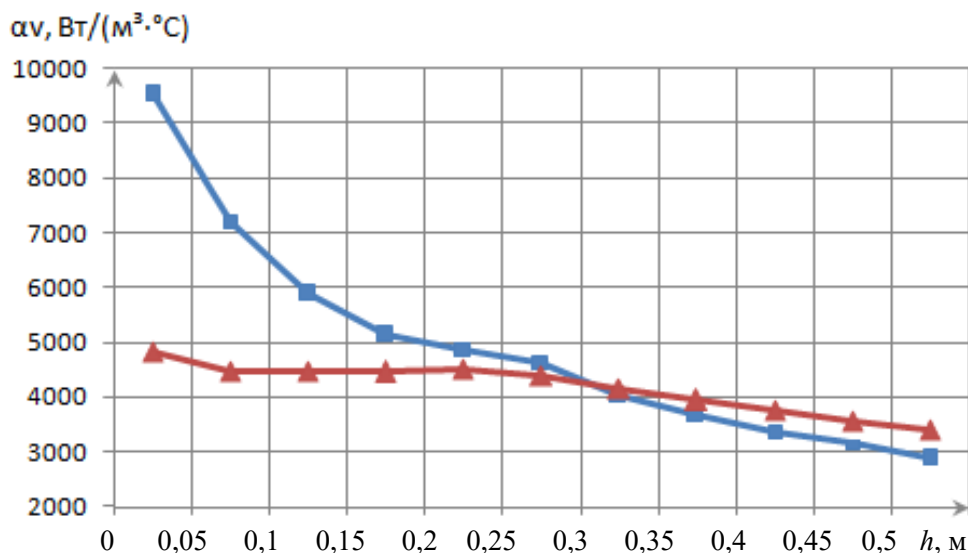


Рисунок 2 – Змінювання значень α_v за висотою шару залізорудної шихти, розмір частинок $d_{сеп} = 0,5 \dots 8,0$ мм, для вібраційного —■— та барабанного —▲— живильників

Межові умови, що наведено, в сукупності з системою рівнянь (19), характеризують математичну постановку завдання для полідисперсного шару без внутрішніх джерел енергії. Зазначена система рівнянь може бути використаною для вивчення теплових процесів у шарі матеріалу, якого піддають агломерації, за умови урахування в математичному описі внутрішніх джерел теплоти, що характеризують згоряння твердого палива в шарі шихти.

Висновки.

1. Реалізовано математичний опис теплових процесів у стаціонарному шарі монодисперсного матеріалу. Встановлено, що порозність за висотою шару $\varepsilon_1 = \varepsilon_n = \text{const}$, а з урахуванням того, що шар складається з гранул однакового розміру, не враховується вплив розміру частинок на коефіцієнт теплопровідності та на коефіцієнт тепловіддачі від газу до гранул, який буде незмінним за висотою та шириною шару. За даних умов монодисперсного матеріалу коефіцієнт теплопровідності прийнятий як функція температури та вологості матеріалу $\lambda = f(T, W)$.

2. Запропоновано математичний опис теплових процесів у шарі полідисперсних матеріалів. Встановлено, що для даного випадку $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_n \neq \text{const}$. Під час опису межових умов коефіцієнт тепловіддачі не є постійним і змінюється за висотою та шириною залежно від діаметру частинок, що складають шар. Структура шару сипкого матеріалу суттєво впливає на теплопровідність. Таким чином, для полідисперсних матеріалів, прийнято, що коефіцієнт теплопровідності є функцією трьох змінних величин $\lambda = f(T, W, d)$.

3. Для розрахунку значень коефіцієнта теплопровідності запропоновано використання його середньозваженого значення λ_{Σ} . На базі дослідних даних встановлено інтервал варіювання міри впливу фізичних величин T , W та d на коефіцієнт теплопровідності.

4. На підставі експериментальних даних встановлено значний вплив міри розподілу класів сипкого матеріалу на нерівномірність значень коефіцієнта тепловіддачі для верхніх і нижніх горизонтів, що зумовлено типом завантажувальної системи.

Бібліографічний перелік

1. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. Москва : Metallurgiya, 1967. 442 с.
2. Лисиенко В.Г., Лобанов В.Г., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов : учебное пособие. Москва : Metallurgiya, 1982. 240 с.
3. Китаев Б.И., Тимофеев В.Н., Боковиков Б.А., Малкин В.М. Тепло- и массообмен в плотном слое. Москва : Metallurgiya, 1972. 432 с.
4. Фролов Ю.А. Теплотехнические аспекты процесса агломерации // *Сталь*. 2003. № 12. С. 2–11.
5. Фролов Ю.А. Теплотехническое исследование процесса агломерации и совершенствование технологии и техники для производства агломерата : автореф. дисс. ... д.т.н. Екатеринбург, 2005. 49 с.
6. Фролов Ю.А. Анализ газодинамической работы агломерационных машин // *Сталь*. 2005. № 6. С. 42–51.
7. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Сучков В.Д. Теплообмен в шахтных печах. Свердловск : Metallurgiya, 1957. 279 с.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача : учебник. 3-е изд. Москва : Энергия, 1975. 488 с.
9. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. Москва : Физматгиз, 1962. 456 с.
10. Мных А.С. Исследование тепловых процессов в агломерируемом слое бокситов в зависимости от сегрегации топлива и химкомпонентов по высоте // *Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит*. 2015. № 6(136). С. 23–27.
11. Зобнин, Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей : учебное пособие. 2-е изд. Москва : Metallurgiya, 1982. 360 с.
12. Розенгарт Ю.И., Потапов Б.Б., Ольшанский В.М., Бородулин А.В. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Киев, Донецк : Вища школа, 1986. 296 с.

References

1. Goldfarb E.M. Teplotekhnika metallurgicheskikh protsessov. Moskva : Metallurgiya, 1967. 442 p.
2. Lisienko V.G., Lobanov V.G., Kitaev B.I. Teplofizika metallurgicheskikh protsessov : uchebnoe posobie. Moskva : Metallurgiya, 1982. 240 p.
3. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A., Malkin V.M.. Teplo- i massoperenos- v plotnom sloe. Moskva : Metallurgiya, 1972. 432 p.
4. Frolov Yu.A. Replptekhnicheskie aspekty protsesssa aglomeratsii // *Stal*. 2003. No. 12. P. 2–11.
5. Frolov Yu.A. Teplotekhnicheskije ussledovaniya i sovershenstvovanie rekhniki dlya proizvodstva aglomerata : avtoref. diss. ... d.t.n. Ekaterinburg, 2005. 49 p.
6. Frolov Yu.A. Analiz gazpdinamicheskoy raboty aglomeratsionnykh mashin // *Stal*. 2005. No. 6. P. 42–51.
7. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G, Suchkov V.D. Teploobmen v shakhtnykh pechakh. Sverdlovsk : Metallurgiya, 1957. 279 p.
8. Isachenko V.P., Osipova V.A., Cukomel A.S. Teploperedacha : uchebник. 3 izd. Moskva : Energiya. 1975. 488 p.
9. Chednovskiy A.F. Teplosizicheskie kharakteristiki dispersnykh materualov. Moskva : Fuznatgiz, 1962. 456 p.
10. Mnykh A.S. Issledovanie teplovykh protsessov v agloneriryemom sloe boksitov v zavisimosti ot segregatspp topliva i khumkomponentov topliva po vysote // *Energetika. Energoberezhnie. Energoaudit*. 2015. No. 6(136). P. 23–27.
11. Zobnin B.F., Kazyaev M.D., Kitaev B.I. Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechey : uchebnoe posobie : 2 izd. Moskva : Metallurgiya. 1982. 360 p.
12. Rozengard Yu.P., Potapov B.B., Olshanskiy V.M., Borodulin A.V. Teploobmen i teplovye rezhimy v promyshlennykh pechakh. Kiev, Donetsk : Vysha shkola, 1986. 296 p.

Mnykh Anton, professor, doctor of technical sciences, Zaporozhe National University

Pazyuk Mikhail, head of department, doctor of technical sciences, Zaporozhe National University

Ovchynnykova Iryna, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe National University

Baryshenko Elen, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe National University

Minyajlo Nataliya, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe National University

ABOUT MATHEMATICAL DESIGN OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN STATIONARY LAYERS OF FRIABLE MATERIALS

The questions of mathematical design of thermophysical properties of layer of friable material are considered, which would allow taking into account and representing basic properties of agglomerative process. The methods of association are offered in the model of pictures of particle of friable material as thermally thin and thermally massive body. Influence of parameters of homogeneous mono- and polydisperse layer is investigated on its coefficient of heat conductivity. The estimation of influence of the system of loading and forming of layer is also conducted on distribution of material on a largeness and thermophysical properties as local horizons and all layer on the whole. On the basis of experimental data conformities to law of change of by volume coefficient of heat transfer in the layers of friable materials are set. Mathematical description of the considered processes is presented, the initial and border conditions of application of model are certain. The got model well describes thermophysical processes in layers without internal energy sources and in layers at incineration of hard fuel.

Keys words: layer of friable polydisperse material, heat exchange processes, co-efficient of heat conductivity, mathematical design, initial and border conditions of pro-cesses

Стаття надійшла 27.10.2021 р.