

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАФІТУВАННЯ НАФТОВОГО КОКСУ В ШАХТНІЙ ЕЛЕКТРОПЕЧІ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

ПАНОВ Є.М.¹, д.т.н., проф., КАРВАЦЬКИЙ А.Я.¹, д.т.н., пров.наук.співр.,
КУТУЗОВ С.В.², к.т.н., ген.директор, ЛЕЛЕКА С.В.¹, наук. співр., СТЕПУРА П.В.¹, магістр

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

²Відкрите акціонерне товариство «Український графіт», Запоріжжя

Розроблено фізичну та математичну моделі процесу графітування нафтового коксу в шахтній однофазній електропечі безперервної дії. Відмічені моделі дозволяють проводити теоретичні дослідження фізичних полів при прямому графітуванні нафтового коксу за рахунок протікання через нього змінного електричного струму та відпрацьовувати технологічний регламент одержання кінцевого продукту без витрат матеріальних та енергетичних ресурсів.

Ключові слова: математична модель, графітування, шахтна електропіч, нафтовий кокс.

Разработаны физическая и математическая модели процесса графитации нефтяного кокса в шахтной однофазной электропечи непрерывного действия. Отмеченные модели позволяют проводить теоретические исследования физических полей при прямом графитировании нефтяного кокса за счет протекания через него переменного электрического тока и отрабатывать технологический регламент получения конечного продукта без затрат материальных и энергетических ресурсов.

Ключевые слова: математическая модель, графитирование, шахтная электропечь, нефтяной кокс.

The physical and mathematical models of process of graphitization of petroleum coke in monophasic electric pit-type heating furnace of continuously working are developed. The noted models allow to conduct theoretical researches of the physical fields at direct graphitization of petroleum coke due to flowing through him of alternating electric current and to work off technological regulation of receipt of the finished good without the expenses of financial and power resources.

Keywords: mathematical model, graphitization, electric pit-type heating furnace, petroleum coke.

Вступ

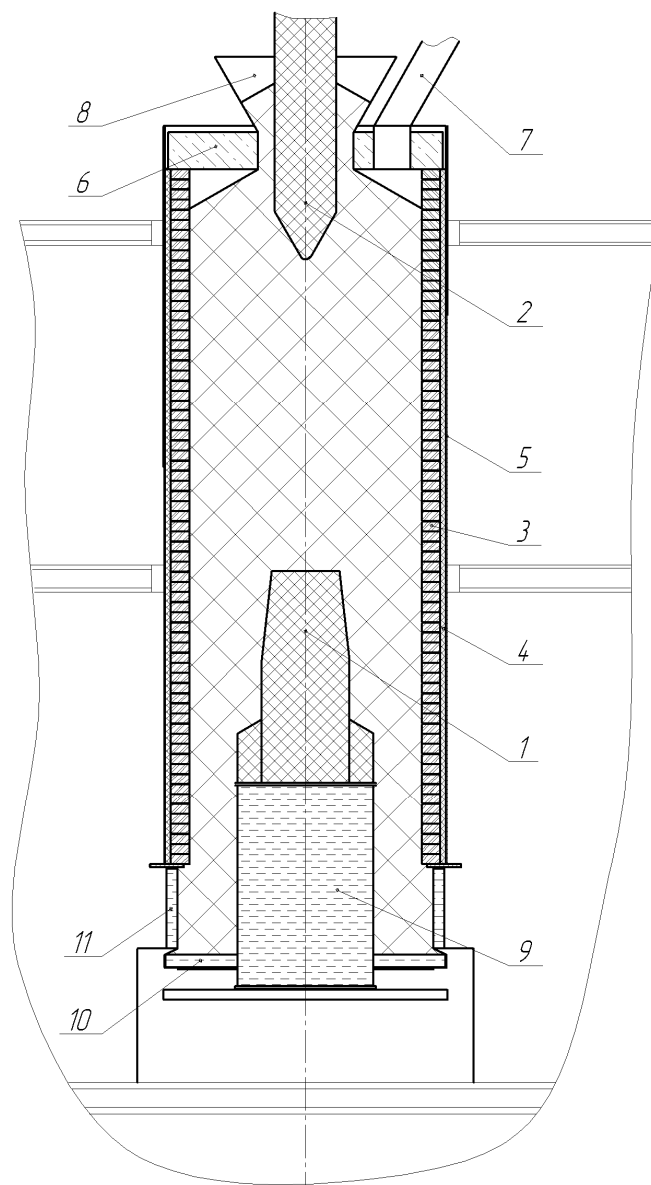
Класична технологія отримання графітованого наповнювача для виготовлення електродної продукції ґрунтується на багатостадійному процесі з отриманням нуделя (помел сирого коксу, прожарювання в обертових печах, помел прожареного коксу, приготування суміші, пресування заготовки нуделя, випал нуделя в печах Редгамера, графітування нуделя в печах Ачесона, помел нуделя) є значно трудомісною та енергоємною [1–5]. Можливість застосування шахтної печі до безперервного процесу графітування коксу є надзвичайно привабливою як з боку вагомого зменшення стадій технологічного циклу з 8-и до 4-х (помел сирого коксу, прожарювання в обертових печах, неперервне графітування в шахтній електропечі, помел графітованого коксу), так і з боку зменшення питомих енерговитрат (ПВЕ). Так тільки при графітуванні нуделя в печах Ачесона ПВЕ становлять біля 3500 кВт·год/т, а за попередніми оцінками ПВЕ при графітуванні нафтового коксу у шахтній печі становить біля 2000 кВт·год/т.

Аналіз літературних джерел свідчить про те [3,4,6–8], що на даний час технологія отримання графітовано нафтового коксу в електропечах шахтного типу відпрацьована недостатньо, а в Україні зовсім відсутня. Тому задача розробки нової технології одержання графітовано коксу та відповідного технологічного обладнання є надзвичайно актуальною.

Постановка задачі

Прототипом шахтної електропечі для графітування може слугувати електрокальцинатор для прожарювання антрациту (рис. 1) [1]. Фізична модель процесу графітування нафтового коксу в шахтній електропечі може бути сформульована таким чином. Конструктивно шахтна електропіч представляє собою сталеву обичайку (кожух) (рис. 1), яка всередині футерована вогнетривкими і теплоізоляційними матеріалами, у верхній та нижній торцевих частинах якої знаходяться графітові або вуглеграфітові електроди. Шахтна піч оснащується системою водяного охолодження п'єдесталу нижнього електрода, розвантажувального стола та бічної поверхні кожуха, а також системою газовідводу. В нижній частині розміщується розвантажувальний стіл, який обертається, з системою дозування готового продукту. Нафтовий кокс,

який є сипучим матеріалом, рухається вниз вздовж вертикальної осі печі у порожнині, утвореній конструкційними елементами печі, а гази, які утворюються у процесі виділення залишкових летючих та часткового окислення коксу за рахунок підсмоктування повітря через систему розвантаження, навпаки, рухаються вгору.



- 1 – нижній електрод; 2 – верхній електрод; 3 – вогнетривке футерування;
4 – теплоізоляція; 5 – сталева обичайка; 6 – бетонна пробка; 7 – газохід;
8 – живильник; 9 – водоохолоджуваний п'єдестал нижнього електрода; 10 – розвантажувальний стіл;
11 – обичайка з водяним охолодженням

Рис. 1 – Схема електрокальцинатора для прожарювання антрациту

Тому робочий простір печі являє собою двофазне середовище. Електричний струм безпосередньо проходить через електропровідний кокс та спричинює його нагрівання за рахунок виділення джоулевої

теплоти. Швидкість руху сипучого матеріалу є змінною величиною і визначається, дозою та частотою його вивантаження. Для забезпечення неперервності процесу на заміну вивантаженого готового продукту у нижній частині печі подається вихідний матеріал у верхню її частину через живильник. Внаслідок того, що нафтовий кокс є сипучим матеріалом, фізичні його властивості приймаються як ефективні значення, які залежать від температури і тиску. Процес графітування коксу супроводжується фізичними процесами, які пов'язані між собою: складний рух сипучого матеріалу, спричинений дією сил гравітації та обертанням розвантажувального столу; рух газів у зворотному напрямку; протікання електричного струму по електропровідним елементам конструкції, включаючи кокс; складний теплообмін всередині печі і зовні з оточуючим середовищем. Електричне поле в печі вважається безвихровим, термоелектричні ефекти також не враховуються. Фізичні властивості усіх матеріалів печі приймаються ізотропними.

В процесі графітування коксу, як було вище відмічено, відбувається вихід залишкових летючих органічних компонентів та часткове окислення коксу аналогічно процесу прожарювання антрациту [8], що спричинює виділення теплоти за рахунок хімічних реакцій.

У відповідності до сформульованої фізичної моделі, процес графітування нафтового коксу в шахтній електропечі можна записати у вигляді зв'язаної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних з використанням моделей Ейлера [9–13] та теплоелектричного стану [5], які включають в себе рівняння нерозривності, збереження руху, енергії і квазістаціонарної електропровідності:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \rho_i \mathbf{V}_i) = 0, \quad i = \overline{1,2}; \\ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i \mathbf{V}_i)}{\partial \tau} + (\varepsilon_i \rho_i \mathbf{V}_i \cdot \nabla) \mathbf{V}_i = -\varepsilon_i \rho_i \nabla p + \beta_{ij} (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j) - \\ \delta_i [\nabla p_i - G(\varepsilon_i) \nabla \varepsilon_i] + \varepsilon_i \rho_i \mathbf{g}, \quad i, j = \overline{1,2}; \\ \frac{\partial(\varepsilon_i \rho_i h_i)}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \rho_i h_i \mathbf{V}_i) = -p \left\{ \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \mathbf{V}_i) \right\} + \nabla \cdot (\varepsilon_i \lambda_{ef,i} \nabla T_i) + \\ + \alpha_{V,ef} (T_i - T_j) + \frac{\delta_i}{\gamma(p_i, T_i)} |\nabla u_i|^2 + q_{V,chem}, \quad i, j = \overline{1,2}; \\ \frac{\partial H}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_i(T) \nabla T] + \frac{1}{\gamma_i(T)} |\nabla u|^2, \quad i = \overline{3, M}; \\ \nabla \cdot \left[\frac{1}{\gamma_i(p, T)} \nabla u \right] = 0, \quad i = \overline{1, M}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де індекси $i = \overline{1,2}$ – відносяться до двофазного середовища, тобто індекс 1 або g означає газову фазу, а індекс 2 або s – сипучий матеріал – нафтовий кокс; індекси $i = \overline{3, M}$ – відносяться до твердих елементів конструкції печі; M – загальна кількість елементів печі, включаючи двофазне середовище; $\varepsilon_i, i = \overline{1,2}$ – об'ємна частка i -ї фази $\left(\sum_{i=1}^2 \varepsilon_i = 1 \right)$; ρ – густина, кг/м^3 ; τ – час, с ; $\mathbf{V}_i, i = \overline{1,2}$ – вектор швидкості газової та сипучої фази, відповідно, м/с ; p – тиск, Па ; $\beta_{ij} = -\beta_{ji}, i, j = \overline{1,2}$ – об'ємний коефіцієнт передачі імпульса між газом і твердими частинками сипучого шару і навпаки, причому $\beta_{ii} = 0$, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; $G(\varepsilon)$ – коефіцієнт взаємодії частинка-частинка [9, 11], Па ; $h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ – масова ентальпія в двофазному середовищі, Дж/кг ; c_p – масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T_{ref} – температура відліку, К ; $p_s = p_2$ – тиск у сипучій фазі, Па ; $\lambda_g = f_g(T_g, \varepsilon_g)$, $\lambda_s = f_s(T_s, p_s, \varepsilon_g)$ – ефективна теплопровідність газової і твердої фази з врахуванням радіаційного теплообміну, відповідно, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\alpha_{V,ef}$ – об'ємний міжфазний коефіцієнт тепло-

передачі, Вт/(м³·К); $q_{V,chem}$ – об’ємна теплота від хімічних реакцій, Вт/м³; $\delta_i = \begin{cases} 0, & i = 1; \\ 1, & i = 2; \end{cases}$

$H = \int_0^T c_p(T)\rho(T)dT$ – об’ємна ентальпія в твердих елементах конструкції печі, Дж/м³; γ – питомий електричний опір, Ом·м; u – електричний потенціал, В.

Для визначення об’ємного міжфазного коефіцієнта теплопередачі можна використати співвідношення виду [9]:

$$\alpha_{V,ef} = \frac{6\epsilon_s}{d_{ef,s}} \alpha_{ef,g-s}, \quad (2)$$

де $\alpha_{ef,g-s} = f(Re_s, Pr)$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі газ–тверді частинки сипучого шару [9],

Вт/(м²·К); $d_{ef,s}$ – ефективний діаметр частинок, м; $Re_s = \frac{\epsilon \rho_g |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_s| d_{ef,s}}{\mu_g}$ – критерій Рейнольдса [9];

μ_g – коефіцієнт динамічної в’язкості газової фази, Па·с; $Pr = \frac{c_{p,g} \mu_g}{\lambda_g}$ – число Прандтля газової фази; λ_g –

теплопровідність газової фази, Вт/(м·К).

Об’ємний коефіцієнт передачі моменту між газом і твердими частинками сипучого шару визначаються, наприклад, за [10]:

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\epsilon_g \epsilon_s |\mathbf{V}_g - \mathbf{V}_s|}{d_{ef,s}} \epsilon_g^{-2,65}, \quad (3)$$

де $C_D = \frac{24}{\epsilon_g Re_s} [1 + 0,15(\epsilon_g Re_s)^{0,687}]$ – функція гідравлічного опору сипучого шару.

Градiєнт тиску ∇p_s сипучого шару має місце тоді, коли упаковка твердих частинок у шарі не досягла свого максимального значення. В цьому випадку тиск в шарі сипучого матеріалу може бути визначений як [11]:

$$p_s = 2\rho_s(1 - e_{ss})\epsilon_s^2 g_{ss} T_s, \quad (4)$$

де e_{ss} – коефіцієнт, який враховує відновлення пористості сипучого шару після зіткнень частинок;

$g_{ss} = \left[1 - 3 \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{s,max}}} \right]^{-1}$ – функція безрозмірної відстані між частинками сипучого шару [12].

Початкові умови при $\tau = 0$:

$$\begin{cases} T(X) = T_0; \\ u(X) = 0; \\ \mathbf{V}_i(X) = 0, i = \overline{1,2}; \\ p = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Граничні умови при $\tau > 0$:

на торцях верхнього (6) і нижнього електродів (7)

$$j_n = \mathbf{n} \cdot (-\chi(T)\nabla u), \quad (6)$$

$$u = 0, \quad (7)$$

де \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до граничної поверхні; $\chi(T) = [\gamma(T)]^{-1}$ – електропровідність матеріалу, (Ом·м)⁻¹;

на границях контакту твердих електропровідних елементів конструкції печі для рівнянь енергії розглядаються умови (8) і електропровідності – (9)

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \{u\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = 0, \end{cases} \quad (9)$$

де $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^-$; $\mathbf{q} = -\lambda(T)\nabla T$ – вектор густини теплового потоку, Вт/м²;
 $\{u\} = u^+ - u^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{j}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{j}^-$; $\mathbf{j} = -\chi(t)\nabla u$ – вектор густини електричного струму, А/м²; для неелектропровідних елементів система рівнянь (9) не враховується;

на границях внутрішньої порожнини шахтної печі (контакт двофазне середовище – тверде тіло)

$$\begin{cases} \mathbf{V}_g = 0; \\ \tau_t = \mathbf{n} \cdot (\mu_s \mathbf{V}_s), \end{cases} \quad (10)$$

де τ_t – тангенціальне напруження, Па; $\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr}$ – динамічна в'язкість сипучого матеріалу [11, 13], Па·с; $\mu_{s,col}, \mu_{s,kin}, \mu_{s,fr}$ – в'язкість, що пов'язана із зіткненням частинок, кінетичною енергією частинок і з тертям між частинками, відповідно, Па·с;

на границі контакту двофазного середовища – розвантажувальний стіл, який обертається враховується прискорення Кориоліса і відцентрове прискорення

$$\frac{d\mathbf{V}'_i}{d\tau} = \frac{d\mathbf{V}_i}{d\tau} + 2[\omega \times \mathbf{V}_i] + [\omega \times [\omega \times \mathbf{r}]], \quad i = \overline{1,2}, \quad (11)$$

де ω – частота обертання розвантажувального стола, рад/с; \mathbf{r} – радіус вектор, м;

на зовнішніх границях печі задаються умови конвективного теплообміну, які описують повітряне і водяне охолодження (наприклад, п'єдесталу нижнього електрода)

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda(T)\nabla T) = \alpha_{ef}(T)(T - T_d), \quad (12)$$

де α_{ef} – ефективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_d – температура довкілля, К;

на верхньому торці печі в місці завантаження коксу розглядаються умови (13), а в зоні відсмоктування газової фази – (14)

$$\begin{cases} T_s = T_{s,in}; \\ G_s = G_{s,in}, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ p = 0, \end{cases} \quad (14)$$

де $G_{s,in}$ – витрати сипучого матеріалу на вході у піч, кг/с;

в нижній частині печі в місці розвантаження коксу записуються умови (15), а в зоні всмоктування повітря – (16)

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0, \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_g = T_{g,in}; \\ G_g = G_{g,in}, \end{cases} \quad (16)$$

де $G_{g,in}$ – витрати повітря, що всмоктується у піч, кг/с; $T_{g,in}$ – температура повітря, що всмоктується у піч, К.

Висновки

Розроблена фізична модель якісно описує процес графітування нафтового коксу, а запропонована математична модель дозволяє теоретично дослідити цей процес та відпрацювати технологічний регламент пускового і робочого режимів шахтної однофазної електропечі.

Авторами планується розробка програмного забезпечення на основі наведених моделей, а також проведення експериментальних досліджень процесу нагріву нафтового коксу з метою його графітування на діючому або модернізованому обладнанні.

Література

1. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgiya, 1972. — 432 с.
2. Производство электродной продукции / [А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др.]. — М. : Metallurgiya, 1985. — 129 с.
3. Кузнецов Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования : монография / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2001. — 132 с.
4. Петров Б. Ф. Энергосбережение в производстве электродного термоантрацита / Б. Ф. Петров [Текст] : монография. — К.: «Екотехнологія», 2006. — 144 с.
5. Physical processes modern investigation methods in power-intensive industrial equipments / E. N. Panov, A. Ya. Karvatsky, I. L. Shilovich [et al.] // Aluminium of Siberia – 2008 : XIV Intern. conf. exhib., (Krasnoyarsk, Sept. 10—12, 2008) : proceedings of the conf. — Krasnoyarsk : «Verso», 2008. — P. 124—132.
6. Исследование газопроницаемости слоя антрацита при производстве термоантрацита в электрокальцинаторе / М. И. Гасик, А. Г. Гриншпунт, Е. И. Цыбуля [и др.] // Metallургическая и горнорудная промышленность. — 2007. — №3. — С. 30—33.
7. Комплексная модель прокаливания антрацита в электрокальцинаторе / М. М. Гасик, М. И. Гасик, А. Г. Гриншпунт [и др.] // Электрометаллургия. — 2007. — № 2. — С. 30—36.
8. Multiphysical modeling of anthracite treatment in an electrical electrocalcinator / M. M. Gasik, M. I. Gasik, O. Yu. Urazlina, S. V. Kutuzov // Advances in Metallurgical Processes and Materials : Intern. Conf. (Dnipropetrovsk, May 27—30, 2007) : proceeding of the conf. — Dnipropetrovsk : AdMet, 2007. — Vol. 2. — P.71—76.
9. Kuipers J. A. M. Numerical Calculation of Wall-to-Bed Heat-Transfer Coefficients in Gas-Fluidized Beds / J. A. M. Kuipers, W. Prins, W. P. M / van Swaaij // AIChE Journal. — 1992. — Vol. 38, No. 7. — P. 1079—1091.
10. Wen C.-Y. Mechanics of Fluidization / C.-Y. Wen, Y. H. Yu // Chem. Eng. Prog. Symp. Series. — 1966. — Vol. 62. — P. 100—111.
11. Syamlal M. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed / M. Syamlal, T. J. O'Brien // AIChE Symp. Series. — 1989. — Vol. 85. — P. 22—31.
12. Ogawa S. On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials / S. Ogawa, A. Umemura, N. Oshima // J. Appl. Math. Phys. — 1980. — Vol. 31. — P. 483—493.
13. Schaeffer D. G. Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow / D. G. Schaeffer // J. Differential Equations.— 1987. — Vol. 66, No 1. — P. 19—50.