УДК 261.455.25

РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ДЛЯ СВС-РЕАКТОРА

Л.М. Самчук.
Луцький національний технічний університет.

Mathematical description is resulted, that allows to carry out an analysis, synthesis, optimization of technological processes, only at presence of mathematical model of reactor, algorithms of decision of direct and reverse tasks of different type, in their komp'yuterniy realization, and effective optimized processes. The rotined calculation of teplo¬vogo balance is for the period of heating of pre-production model and period of passing of SVS of process for the reactor of batch-type.

***Keywords**: temperature, reactor of batch-type, SVS-process.*

Вступ

Метод саморозповсюджувального синтезу (СВС) знайшов широке застосування в сучасному матеріалознавстві. Метод СВС дозволяє одержувати кінцеві та проміжні матеріали з певною структурою або кінцеві вироби із заданою формою та розмірами [1]. Структурні характеристики продуктів горіння (співвідношення та взаємне розташування фазових складових, розмір зерен, розподіл домішок, пористість та ін.) можуть змінюватися у широких межах залежно від умов СВС-процесу та піддаються управлінню. Для реалізації СВС-процесу використовують реактори. Авторами [2; 3; 4] представлені математичні моделі реакторів та алгоритми рішення прямих і зворотних задач їх дії.

1. Постановка задачі

На сьогоднішній день багато розроблено та вдосконалено установок для здійснення СВС-процесу (самопоширюваного високотемпературного синтезу). Основним елементом в технології СВС є реактор. Конструкції реакторів різноманітні, але, нажаль, не всі характеризуються простотою виготовлення та малими енергозатратами.

При всьому різноманітті реакторів, їх математичний опис представлено матеріальним і тепловим балансами та дозволяє вирішити дві основні задачі:

- в залежності від заданої конструкції та параметрів вхідного потоку визначити параметри процесу та характеристики вихідного потоку;
- в залежності від параметрів вхідного та вихідного потоків підібрати конструкцію установки та параметрів процесу.

Математичний опис реакторів здійснюється їх матеріальним і тепловим балансами. **Метою даної статті** є визначення кількості теплоти для здійснення СВС-процесу.

2. Основний матеріал та результати

Використовуючи загальний вираз теплового балансу (1), запишемо тепловий баланс для періоду нагріву дослідного зразка (2):

$$\sum Q_{1i} = \sum Q_{2j}, \qquad (1)$$

$$\sum Q_{11} = \sum Q_{21} + \sum Q_{22} \qquad (2)$$

та періоду проходження СВС процесу

$$\sum Q_{11} + \sum Q_{12} = \sum Q_{21} + \sum Q_{22}, \qquad (3)$$

де $\sum Q_{12}$ – теплота внутрішніх джерел, яка виділяється в результаті проходження хімічної реакції, коли відбувається процес спікання в зразка

$$\sum Q_{12} = V \cdot q_V, \qquad (4)$$

де V – об'єм дослідного зразка, м^3; q_V – об'ємний питомий тепловий потік від внутрішніх джерел теплоти в дослідному зразка, Дж/м^3.

Як зазначено вище у виразі (1), у першому наближенні, $\sum Q_{21}$ – це теплота, яка витрачається на нагрів дослідного зразка та всіх інших елементів установки, як загального умовного тіла.

Тому в подальшому викладенні для підвищення достовірності моделі у виразах (2) та (3) цей член потребує деталізації:

$$\sum Q_{21} = Q_{зр.} + Q_{шт.} + Q_{ст.} + Q_{корп.} + Q_{терм.} + Q_{серед.} \qquad (5)$$

де $Q_{зр.}$ – теплота, яка витрачається на нагрів зразка, *Дж*;

$Q_{шт.}$ – теплота, яка витрачається на нагрів штатива, *Дж*;

$Q_{ст.}$ – теплота, яка витрачається на нагрів столика, *Дж*;

$Q_{корп.}$ – теплота, яка витрачається на нагрів корпусу установки, *Дж;*

$Q_{терм.}$ – теплота, яка витрачається на нагрів корпусу термопари, *Дж;*

$Q_{серед.}$ – теплота, яка витрачається на нагрів середовища (повітря) в корпусі установки, *Дж.*

Для визначення витрат теплоти по цих статтях теплового балансу використовуємо відповідно вираз:

$$Q = Mc\,(t_1 - t_2) = \frac{V}{\circ} c\,(t_1 - t_2). \qquad (6)$$

де:
c – питома масова теплоємність матеріалу елемента установки або зразка, Дж/к·К;
V – об'єм дослідного зразка, м^3;
ρ – густина матеріалу елемента установки або зразка, кг/м^3;
t_1 та t_2 – температура на початку та в кінці процесу нагріву, °С.

Другий член $\sum Q_{22}$, як зазначено вище у виразі (1), враховує втрати тепла в навколишнє середовище та у виразах (2) і (3) цей член також потребує відповідної деталізації:

$$\sum Q_{22} = Q_{бл.} + Q_{вн.} + Q_{вип.}, \qquad (7)$$

де: $Q_{бл.}$ – втрати теплота в навколишнє середовище через бокові поверхні установки, Дж;

$Q_{вн.}$ – втрати теплота в навколишнє середовище через верхню та нижню поверхні установки, Дж;

$Q_{вип.}$ – втрати теплота в навколишнє середовище через випромінювання від зовнішніх поверхонь установки, Дж. Для визначення втрат теплоти (6) застосовуються також відповідні вирази, що характеризують теплопередачу через плоску частину стінки установки:

$$Q = Fk(t_1 - t_2), \qquad 8)$$

та при теплопередачі через циліндричну частину стінки установки:

$$Q = \text{®}Lk_l\,(t_1 - t_2), \qquad (9)$$

де: t_1 та t_2 – відповідно температура більш нагрітого об'єкта, який втрачає теплоту, та менш нагрітого об'єкта, який приймає,*°С*;

F – площа поверхні через яку відбувається теплопередача, *м^2;*

L – довжина циліндричної поверхні через яку відбувається теплопередача, *м.*;

k – коефіцієнт теплопередачі, який визначає потік теплоти через одиницю площі багатошарової поверхні, через яку відбувається теплопередача, *Вт/м^2·К*;

k_l – коефіцієнт теплопередачі, який визначає потік теплоти через одиницю довжини багатошарової циліндричної поверхні стінки через яку відбувається теплопередача, *Вт/мК.*

Відповідні коефіцієнти теплопередачі визначаються з виразів:

$$\frac{1}{k} = R_s = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{\alpha_j} + \sum_{u=1}^{p} \frac{\delta_u}{\lambda_u} \qquad (10)$$

та

$$\frac{1}{k_l} = R_l = \sum_{i=1}^{n} R_{li} = \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{\alpha_j d_j} + \sum_{u=1}^{p} \frac{1}{2\lambda_u} \ln \frac{d_{u+1}}{d_u}, \qquad (11)$$

де: R_s та R_l – відповідні сумарні термічні опори, *м²К/Вт;*

R_i та R_{li} – відповідні термічний опір *i-го* шару чи термічної перешкоди із *n*, *м²К/Вт*;

α_j – коефіцієнт тепловіддачі на *j-тій* термічній перешкоді із *m*, які виникають на шляху теплового потоку, *Вт/м²К*;

d_j – діаметр поверхні *j-тої* термічної перешкоди матеріалу, *м*;

λ_u – коефіцієнт теплопровідності матеріалу *i-того* шару термічного перешкоди, *Вт/м·К*;

δ_u – товщина *i-того* шару термічного перешкоди, *м;*

d_u та d_{u+1} – відповідно внутрішній та зовнішній діаметри поверхонь *i-того* шару термічної перешкоди, *м*.

Коефіцієнт тепловіддачі визначається із залежності:

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{l}, \qquad (12)$$

де: λ – коефіцієнт теплопровідності, *Вт/м·К;*

l – характерний розмір, *м*;

Nu – число Нусельта.

Для визначання числа Нусельта в таких умовах використовуємо наступну розрахункову формули [5], яка запропонована М.А. Михеєвим

$$Nu = c(Gr\,\mathrm{Pr})^n, \qquad (13)$$

де: Pr – число Прандля

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}; \qquad (14)$$

та Gr – число Грасгофа

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T l^3}{\nu^2}, \qquad (15)$$

де: g – прискорення земного тяжіння, *м/с²;*

β – коефіцієнт об’ємного розширення, *1/К;*

ν – кінематична в’язкість, *м²/с.*

Втрати теплоти в навколишнє середовище через випромінювання від зовнішніх поверхонь установки [6; 7]:

$$Q = \pm \sigma_o \varepsilon_{np} F\left(\left(\frac{t_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2}{100}\right)^4\right), \qquad (16)$$

де: t_1 та t_2 – відповідно температура більш нагрітого об’єкта, який втрачає теплоту, та менш нагрітого об’єкта, який приймає теплоту, °*K*;

F – площа поверхні, з якої відбуваються втрати теплоти, *м²*;

ε_{np} – приведений коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням відповідно для кожного конкретного випадку;

σ_o – постійна Стефана-Больмана [8; 9], $\sigma_o = 5{,}6710^{-8}$ *Вт/(м²·К⁴).*

Визначаємо витрати теплоти для конкретної дослідної установки з виразів (2) та (3), при цьому будемо вважати, що тепловий баланс складається для умов стабілізації теплообміну між дослідною установкою та навколишнім середовищем, а у виразах (6), та (7) і (8) різницю температур практично вважаємо:

$$\bar{}'_{стаб.} = t_{ст.зр} - t_{нс.} = t_1 - t_2 , \quad (17)$$

де: $t_{ст.зр.}$ – температура стінки дослідного зразка при умові стабілізації. Тоді з виразу (16) визначаємо теплоту на нагрів дослідного зразка:

$$Q_{зр.} = Mc(t_1 - t_2) = \frac{V_{зр}}{\circ}(t_1 - t_2) = m_{зр} c_{зр} \bar{}'_{стаб.}, \quad (18)$$

Визначаємо витрати теплоти для конкретної дослідної установки з виразів (2) та (3), при цьому будемо вважати, що тепловий баланс складається для умов стабілізації теплообміну між дослідною установкою та навколишнім середовищем, Тоді з виразу (18) визначаємо теплоту на нагрів дослідного зразка, для чого визначаємо масу та об’єм дослідного зразка:

$$V_{зр} = ®r^2 \cdot h = \frac{®d^2}{4} \cdot h = \frac{3{,}14 \cdot 30^2}{4} \cdot 60 = 42390\ мм^3 \quad (19)$$

$$m_{зр} = V_{dc}\left(1 - \frac{®}{100}\right) K_1 K_2 , \quad (20)$$

де: $V_{зр}$ – об’єм готового дослідного зразка, $м^3$;
ρ_c – густина порошкової суміші, $кг/м^3$;
® – задана пористість готового дослідного зразка, %;
Густина порошкової суміші ρ_c розраховується за правилом адитивності:

$$\circ_c = \frac{100\circ_1 \cdot \circ_2 \cdot ... \cdot \circ_n}{P_1 \cdot \circ_2 \cdot \circ_3 \cdot ... \cdot \circ_n + P_2 \cdot \circ_1 \cdot \circ_3 \cdot ... \cdot \circ_n + ... + P_n \cdot \circ_2 \cdot \circ_3 \cdot ... \cdot \circ_{n-1}},$$

де:
$\circ_1, \circ_2, \circ_3, ..., \circ_n$ – густина компонентів у безпористому стані, $кг/м^3$;
$P_1, P_2, P_3, ..., P_n$ – процентний (за масою) вміст компонентів у суміші:

$$\circ_c = \frac{100 \cdot 4{,}51 \cdot 7{,}87 \cdot 2{,}25}{41{,}3 \cdot 7{,}854 \cdot 2{,}25 \cdot +10{,}4 \cdot 4{,}51 \cdot 2{,}25 + 48{,}3 \cdot 4{,}51 \cdot 7{,}874} =$$

$$= \frac{7990{,}14}{731{,}6 + 105{,}5 + 1715{,}2} = \frac{7990{,}14}{2552{,}1} = 3{,}1308 г / см^3$$

$$m_{зр} = 38{,}3 \cdot 3{,}14\left(1 - \frac{30}{100}\right) \cdot 1 \cdot 1{,}02 = 85{,}5\ г.$$

Таким чином:

$$Q_{зр.} = m_{зр} c_{зр} \bar{}'_{стаб.} = 0{,}085 \cdot 35{,}2 \bar{}'_{стаб.} = 2{,}992 \bar{}'_{стаб.} \quad (21)$$

Визначаємо теплоту $Q_{стол.}$, яка витрачається на нагрів предметного столика. Для чого визначаємо об’єм та масу предметного столика:

$$V_{п.с} = a^2 \cdot h_{ст} = 100^2 \cdot 1{,}5 = 150000 мм^3$$

$$m_{п.с} = 15000 \cdot 7{,}9 = 118 г / см^3$$

$$c_{стол} = c_{стальнж} = 462 \frac{Дж}{кгК}$$

$$Q_{стол.} = m_{стол} c_{стол} \bar{}'_{стаб.} = 0{,}118 \cdot 462 \bar{}'_{стаб.} = 54{,}516 \bar{}'_{стаб.} \quad (22)$$

Визначаємо теплоту $Q_{шт.}$, яка витрачається на нагрів штативу. Для чого визначаємо об’єм та масу штативу:

$$V_{шт} = l_{кр} \cdot \frac{\text{®} d_{кр}^2}{4} = 10 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 10^2}{4} = 785\, мм^3$$

$$m_{шт} = 785 \cdot 7{,}9 = 6{,}20 г/см^3, c_{шт} = c_{льнж} = 785 \frac{Дж}{кгК}$$

$$Q_{шт} = m_{ст} c_{шт}{}^{-\prime}{}_{стаб.} = 0{,}0062 \cdot 785^{-\prime}{}_{стаб.} = 4{,}867^{-\prime}{}_{стаб.} \qquad (23)$$

Визначаємо теплоту $Q_{терм}$, яка витрачається на нагрів корпуса термопари. Для цього визначаємо об’єм та густину матеріалу корпуса термопари:

$$V_1 = 125 \cdot \frac{\text{®}}{4}(8^2 - 7{,}6^2) = 125 \cdot 0{,}785 \cdot 6{,}3 = 618{,}18 мм^3;$$

$$V_2 = 125 \cdot \frac{\text{®}}{4}(30^2 - 29{,}4^2) = 125 \cdot 0{,}785 \cdot 35{,}7 = 3503 мм^3;$$

$$V_T = V_1 + V_2 = 618{,}18 + 3503 = 4121 мм^3$$

$$° = \frac{100 \cdot 19{,}3 \cdot 21{,}02}{80 \cdot 21{,}2 + 20 \cdot 19{,}3} = 19{,}48 г/см^3;$$

$$c_{корп} = c_{стальнж} = 785 \frac{Дж}{кг \cdot K} \quad m_{терм} = 4{,}121 \cdot 19{,}48 = 80{,}28\ г;$$

$$Q_{терм} = m_{терм} c_{терм}{}^{-\prime}{}_{стаб.} = 0{,}08028 \cdot 785^{-\prime}{}_{стаб.} = 63{,}02^{-\prime}{}_{стаб.} \qquad (24)$$

Визначаємо теплоту $Q_{корп.}$, яка витрачається на нагрів корпуса установки. Для цього визначаємо об’єм та густину матеріалу корпуса установки:

$$V_1 = 125 \cdot \frac{\text{®}}{4}(8^2 - 7{,}6^2) = 125 \cdot 0{,}785 \cdot 6{,}3 = 618{,}18 мм^3;$$

$$V_2 = 125 \cdot \frac{\text{®}}{4}(30^2 - 29{,}4^2) = 125 \cdot 0{,}785 \cdot 35{,}7 = 3503 мм^3;$$

$$V_T = V_1 + V_2 = 618{,}18 + 3503 = 4121 мм^3;$$

$$° = \frac{100 \cdot 19{,}3 \cdot 21{,}02}{80 \cdot 21{,}2 + 20 \cdot 19{,}3} = 19{,}48 г/см^3.$$

Визначаємо теплоту $Q_{серед.}$, яка витрачається на нагрів середовища (повітря) в корпусі установки. Для цього визначаємо об’єм середовища (повітря) в корпусі установки:

Визначаємо об’єм установки:

$$V_p = \text{®} R^2 \cdot H = \frac{\text{®} D^2}{4} \cdot H = \frac{3{,}14 \cdot 160^2}{4} \cdot 280 = 5626880 мм^3;$$

$$V_{газу} = V_p - V_{зр} - V_{п.с} - V_{пд} - V_T - V_{кр} - V_{нагр}; \qquad (25)$$

$$V_{газу} = 5626880 - 42390 - 4121 - 15000 - 7065 - 785 - 8518{,}67 =$$

$$= 5549000 мм^3 \approx 5{,}54 дм^3.$$

$$c_{серед} = c_{повітря} = 1050 \frac{Дж}{кг \cdot K}, m_{серед} = 0{,}00554 \cdot 0{,}596 = 0{,}0033\ кг;$$

$$Q_{серед} = m_{серед} c_{серед} {}^{-\prime}_{стаб.} = 0,0033 \cdot 1050 {}^{-\prime}_{стаб.} = 3,465 {}^{-\prime}_{стаб.} \cdot$$

Підставивши отримані значення в (5), маємо вираз:

$$\sum Q_{21} = Q_{зр.} + Q_{шт.} + Q_{ст.} + Q_{корп.} + Q_{терм.} + Q_{серед.} = 4144,754 {}^{-\prime}_{стаб.} \quad (26)$$

Висновки

Правильний вибір реактора, його розрахунок, оптимізація конструкції та умов проведення процесу є досить складною задачею, яка вимагає необхідних знань в області фізики та хімії. Саме тому застосування моделей хімічних реакторів значно полегшує проведення розрахунку, що в подальшому дозволяє успішно провести процес СВС.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Amosov, A. Azides as reagents in SHS processes / A. P. Amosov, G. Bichurov, N. Bolshova, V. Erin, A. Makarenko, Y. Markov. // International Journal Of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 1992. – № 2, vol. I. – P. 239-245.
2. Barzykin V. V., High-temperature synthesis in a thermal explosion regime / V. V. Barzykin // International Journal Of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 1993. – N 4, v. 2. – P. 390-405.
3. Игнатов, И. И. Математические модели теплообмена в ДСП / И. И. Игнатов // Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей. – М. : ВНИИЭТО, 2005. – С. 17-19.
4. Тимошпольский, В. И. Промышленные теплотехнологии: моделирование нелинейных процессов : учеб. для вузов / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. П. Несенчук. – Минск : Высшая школа, 2000. – 319 с.
5. Яловая, Е. Н. Разработка математической модели плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи при исследовании влияния режимов работы энерготехнологического оборудования на продолжительность плавки / Е. Н. Яловая, В. Ю. Болотов // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2007. – № 8. – С. 211-216.
6. Явойский, В. Н. Теория продувки сталеплавильной ванны / В. Н. Явойский, Г. А. Дорофеев, И. Л. Повх. – М. : Металлургия, 1974. – 496 с.
7. Юдаев, Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача / Б. Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1988. – 479 с.
8. Солодов, А. П. Практикум по теплопередаче : учеб. пособ. / А. П. Солодов, Ф. Ф. Цветков, А. В. Елисеев и др. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
9. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, Л. А. Самарский. – М. : Наука, 1977. – 736 с.
10. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М. : Высш. шк., 1986. – 469 с.

Отримано редакцією 16.03.2013 р.

Самчук Людмила Михайлівна, кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри комп'ютерного проектування верстатів та технологій машинобудування. Луцький національний технічний університет.
E-mail: Samchuk04@yandex.ua