

УДК 536.24, 621.576.5

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСО- ОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ У МЕТАЛОГІДРИДНИХ УСТАНОВКАХ

Н. А. Чорна,

канд. техн. наук

nataliyachernaya7@gmail.com

В. В. Ганчин

Інститут проблем
машинобудування
ім. А.М. Підгорного
НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10

Водень як екологічно чистої енергоносії знаходить все більш широке використання в різних сферах економіки індустріально розвинених країн, в першу чергу, для поліпшення екологічної ситуації. Металогідридні установки незалежно від області застосування є енергоперетворювальними об'єктами, тому розробка науково-технічних принципів їх утворення – новий науковий напрям промислової теплоенергетики. У роботі розглянуто особливості процесу тепломасообміну в системі «водень-метал», що протікає в металогідридних установках. Запропоновано математичну модель нестационарних процесів тепломасообміну стосовно металогідридних пристроїв складної конструкції. Наведено результати розрахунково-теоретичних досліджень, виконаних авторами щодо перспектив застосування сучасних металогідридних технологій. На підставі розрахунково-теоретичного дослідження проаналізований вплив точності задання коефіцієнта тепловіддачі на динаміку десорбції водню. Виділені основні чинники, що впливають на вибір геометричних розмірів металогідридного елемента. Особливістю моделі є універсальність, що дає можливість застосування її під час моделювання різних типів енергоперетворювальних металогідридних установок, оптимізації конструкції та режимів роботи проєктованих металогідридних пристроїв. Впровадження запропонованих технологічних рішень зі створення металогідридного устаткування відкриє перспективи широкого кола спеціалізованих енергоперетворювальних установок. Це дозволить підвищити рівень використання вторинних енергетичних ресурсів на підприємствах різних галузей, створить реальні передумови для зменшення теплового забруднення навколишнього середовища й буде важливим кроком на шляху реалізації програми інтеграції економіки України в єдину загальноєвропейську систему.

Ключові слова: енергоперетворювальні установки, тепломасообмінні процеси, водень, металогідрид, математичне моделювання.

Вступ

Увага до використання водню як альтернативного виду палива існує вже не одне десятиріччя. Це обумовлено як досягнутим за останнім часом технологічним прогресом у розглянутій області, так і привнесеними економічними обставинами, що пов'язані з високою ціною на викопні енергетичні ресурси та політичними аспектами формування ринку енергоносіїв. Не в останню чергу перспективи розвитку екологічно чистої енергетики визначаються забрудненням навколишнього середовища продуктами згоряння та прогнозованих змін клімату в результаті парникового ефекту. Воднева енергетика забезпечить більш високі і стійкі темпи економічного розвитку, зменшить загрозу незворотних змін клімату. Використання новітніх металогідридних технологій дозволить істотно інтенсифікувати розвиток водневої енергетики. Металогідридні пристрої, незалежно від області застосування, є енергоперетворювальними об'єктами, тому розробка науково-технічних принципів їхнього створення є новим науковим напрямом сучасної теплоенергетики [1, 2]. У цих пристроях основним робочим вузлом є металогідрид (МГ), що грає роль енергоперетворювального елемента, в якому енергія споживається у формі теплоти і потім трансформується в потенційну енергію стисненого газу або частково перетворюється в енергетично нерівноважні форми водню.

Постановка проблеми

Під час проєктування металогідридних пристроїв особлива роль приділяється методам математичного моделювання, що дозволяють знизити матеріальні та тимчасові витрати порівняно з різноманітними експериментальними дослідженнями. На основі результатів чисельних експериментів можна краще зрозуміти суть фізичних процесів, що протікають у пристроях, оптимізувати конструкції та вибрати найкращі режимні параметри. Внаслідок складності фізико-хімічних процесів в металогідридних системах математичні моделі, що описують теплофізичні та гідравлічні властивості акумулювального середовища, кінетику реакцій сорбції-десорбції водню, теплообмін між газовою й твердою фазами, поки ще недостатньо вивчені. Саме тому вивчення процесів тепломасообміну в розглянутих середовищах і створення надійних математичних моделей для їхнього описання здобувають першочергове значення під час розробки ефективних металогідридних систем.

© Н. А. Чорна, В. В. Ганчин, 2018

Викладення основної частини дослідження

В ПМаш НАН України розроблена математична модель термосорбційної взаємодії водню з металогідридом, що описується рівняннями переносу тепла й маси у разі в'язкісного режиму фільтрації водню крізь дисперсний шар металогідриду [3–7]. На відміну від раніше описаних, ця модель враховує:

- внесок конвективного переносу в загальний тепловий потік;
- рівноважні співвідношення, що описують зв'язок між тиском, температурою й концентрацією водню в металогідриді у всьому діапазоні концентрацій;
- хімічну кінетику сорбції (десорбції).

Такий підхід максимально відповідає реальним умовам експлуатації енергоперетворювальних металогідридних систем. На цей час модель реалізована чисельним методом у вигляді пакета програм на мові Java у середовищі Windows для PC-сумісних персональних комп'ютерів [8–10].

Математична модель процесу тепломасообміну в МГ набуває такого вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\beta c_{H_2}}{c_p} J \frac{\partial T}{\partial r}; \quad (1)$$

$$q_s \rho \frac{\partial \chi}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \beta c_{H_2} J \frac{\partial T}{\partial r}; \quad (2)$$

$$\chi(\Theta) = 2 \ln \left(\frac{\Theta}{1 - \Theta} \right) + \frac{H_1(\Theta)}{RT}; \quad (3)$$

$$\frac{1}{\xi R_{H_2}} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\Pi p}{T} \right) = \frac{J p}{r} + p \frac{\partial J}{\partial r} + J \frac{\partial p}{\partial r} - \rho \frac{\partial \chi}{\partial \tau}; \quad (4)$$

$$J = h \frac{\Pi^3}{\mu} \frac{p}{\xi R_{H_2} T} \frac{d_{cep}^2}{(1 - \Pi)^2} \frac{\partial p}{\partial r}; \quad (5)$$

$$\frac{d\chi}{d\tau} = A \cdot \frac{p(T, \chi)}{p_d(T, \chi) \cdot f_{\text{пт.}} \cdot \Delta\tau \cdot \Delta\mu'}; \quad (6)$$

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R_{H_2} T, \quad (7)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності гідриду; β – поправковий коефіцієнт; c_{H_2} – коефіцієнт теплоємності водню; c – коефіцієнт теплоємності гідриду; ρ – густина гідриду; J – щільність потоку водню; q_s – тепловий ефект реакції термохімічної взаємодії гідриду з воднем; λ – коефіцієнт теплопровідності; Θ – ступінь заповнення міжвузлової металогідридної матриці атомами водню; $H_1(\Theta)$ – концентраційна залежність парціальної мольної ентальпії взаємодії між атомами водню; Π – пористість металогідриду; ξ – коефіцієнт стисливості газу; h – коефіцієнт фільтрації; d_{cep} – середній еквівалентний діаметр частинки гідриду; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; p_d – тиск десорбції; $f_{\text{пт.}}$ – питома площа; μ' – хімічний потенціал; $A = \Delta G_0 + RT \ln p$ – комплексна величина; ΔG_0 – зміна енергії Гіббса; v – об'єм; a, b – віріальні коефіцієнти.

Систему рівнянь (1)–(7) замикають початкові й граничні умови 3-го роду.

Виконання теплотехнічних розрахунків металогідридних систем припускає заданими не тільки термосорбційні, але й теплофізичні характеристики застосованих матеріалів. Наявні дані про теплофізичні властивості металогідридів носять уривчастий характер і не враховують ряд факторів, істотних для процесів теплопереносу під час взаємодії металогідриду із воднем. Відсутність цих даних не дозволяє встановити залежності теплофізичних характеристик від стадії процесу у реальному діапазоні зміни режимних параметрів, що вносить істотну похибку в результати розрахунку конструкції металогідридних елементів.

Одним з найбільш ефективних шляхів ідентифікації теплофізичних характеристик є застосування інструментарію обернених задач теплопровідності, зокрема, для визначення коефіцієнтів ефективної теплопровідності металогідридів і його залежності від параметрів процесу взаємодії з воднем [11]. Математична модель тепломасообміну в металогідриді в нелінійній постановці обумовлена залежністю теплофізичних властивостей і структурних характеристик МГ від параметрів термосорбційного процесу.

Ітераційний алгоритм розв'язання системи диференціальних рівнянь «водень-метал»

Запропонована вище задача (1)–(7) є крайовою задачею з умовами Стефана на межі розподілу двох фаз металогідрид – водень. Для розв'язання такого класу задач розроблені різні числові методи, які можна розділити на два класи. До першого класу можна віднести методи, які в своїй сіткової реалізації так чи інакше намагаються підлаштувати сітку таким чином, щоб для кожного моменту часу вузли сіткової моделі проходили межею поділу фаз. Такі методи добре підлаштовані до розв'язання одновимірних задач. Для дво- і тривимірних задач алгоритми, що ґрунтуються на перебудові сіток згідно з межею розподілу двох фаз, в плані проведення обчислювального експерименту є досить трудомісткими. До другого класу задач належать такі методи, які за допомогою деяких перетворень крайову задачу з умовами Стефана на межі розподілу двох фаз замінюють на крайову задачу з коефіцієнтами, що враховують стрибок теплового потоку на межі розподілу фаз [12, 13]. Використовуючи такий підхід, крайову задачу можна переписати в такому вигляді з граничними і початковими умовами 3-го роду:

$$\begin{aligned} & (c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} + q_S \rho_{\Gamma} \chi_0 \delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \\ & = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \beta h \frac{d_{\text{cep}}^2}{\xi R_{\text{H}_2}} c_{\text{H}_2} \frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2} \frac{p}{\mu T} \langle \operatorname{grad} p, \operatorname{grad} T \rangle \\ & \frac{1}{\xi \cdot R_{\text{H}_2}} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\Pi p}{T} \right) + \rho_{\Gamma} \chi_0 \delta(p - p^*) \frac{\partial p}{\partial \tau} = h \frac{d_{\text{cep}}^2}{\xi \cdot R_{\text{H}_2}} \operatorname{div} \left(\frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2} \frac{p}{\mu T} \operatorname{grad} p \right), \end{aligned} \quad (8)$$

де $\delta(T - T^*)$ та $\delta(p - p^*)$ – дельта функція Дірака; T^* та p^* – температура та тиск десорбції.

Відразу зауважимо, що за такої постановки враховується умова з'єднання на межі контакту двох фаз. Так, у роботі [13] зазначено, що під час чисельної реалізації використовувати функцію Дірака, як вона визначена, не є можливим. Тому у разі чисельної реалізації цього підходу проводять згладжування функції Дірака різними методами [12, 13].

Для числової реалізації розв'язку системи з двох нелінійних рівнянь в частинних похідних параболічного типу застосуємо неявну різницеву схему для тимчасової координати. Тоді систему з двох нелінійних параболічних рівнянь в частинних похідних можна записати як послідовність систем двох нелінійних стаціонарних рівнянь в частинних похідних

$$\begin{aligned} & (c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} + q_S \rho_{\Gamma} \chi_0 \delta(T_i - T^*)) \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta \tau} = \\ & = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T_i) + \beta h \frac{d_{\text{cep}}^2}{\xi R_{\text{H}_2}} c_{\text{H}_2} \frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2} \frac{p_i}{\mu T_i} \langle \operatorname{grad} p_i, \operatorname{grad} T_i \rangle \\ & \left(\frac{1}{\xi \cdot R_{\text{H}_2}} \frac{\Pi}{T_i} + \rho_{\Gamma} \chi_0 \delta(p_i - p^*) \right) \frac{(p_i - p_{i-1})}{\Delta \tau} = h \frac{d_{\text{cep}}^2}{\xi \cdot R_{\text{H}_2}} \operatorname{div} \left(\frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2} \frac{p_i}{\mu T_i} \cdot \operatorname{grad} p_i \right), \end{aligned} \quad (9)$$

де T_{i-1} та p_{i-1} – розв'язок з попереднього тимчасового шару; $\Delta \tau$ – крок за часової координати.

Для розв'язання системи з двох нелінійних рівнянь стаціонарного типу на кожному часовому кроку лінеаризуємо систему таким чином:

$$\begin{aligned}
 & \left(c_r \rho_r + q_s \rho_r \chi_0 \delta (T_{i,j-1} - T^*) \right) \frac{T_{i,j} - T_{i-1}}{\Delta \tau} = \\
 & = \operatorname{div} (\lambda \cdot \operatorname{grad} T_{i,j}) + \beta h \frac{d_{\text{cep}}^2}{\xi R_{\text{H}_2}} c_{\text{H}_2} \frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2} \frac{p_i}{\mu T_{i,j-1}} \langle \operatorname{grad} p_{i,j-1}, \operatorname{grad} T_{i,j-1} \rangle \\
 & \left(\frac{1}{\xi \cdot R_{\text{H}_2}} \frac{\Pi}{T_i} + \rho_r \chi_0 \delta (p_{i,j-1} - p^*) \right) \frac{(p_{i,j} - p_{i-1})}{\Delta \tau} = h \frac{d_{\text{cep}}^2}{\xi \cdot R_{\text{H}_2}} \operatorname{div} \left(\frac{\Pi^3}{(1 - \Pi)^2} \frac{p_{i,j-1}}{\mu T_{i,j-1}} \cdot \operatorname{grad} p_{i,j} \right), \quad (10)
 \end{aligned}$$

де $T_{i,j-1}$ та $p_{i,j-1}$ – розв'язок, отриманий на попередній ітерації; $T_{i,j}$ та $p_{i,j}$ – розв'язок на поточній ітерації для кожного часового кроку.

Для запуску ітераційного процесу на першому етапі для деякої часової координати як початкове наближення вибирається розв'язок з попереднього часового кроку. Отримання просторової залежності шуканих функцій для кожного лінійного рівняння можна застосувати метод скінченних елементів [14]. Ітераційний процес продовжується, поки відносні похибки для функцій $T_{i,j}$ та $p_{i,j}$ не стануть менше, ніж ε_T та ε_p відповідно.

Числовий експеримент

За допомогою математичної моделі термосорбційної взаємодії металогідриду з воднем проведено порівняння результатів з експериментальними даними процесу десорбції водню для МГ LaNi_5H_x . Числовий експеримент проводився за таких умов: конструкція малогабаритного генератора-сорбера (МГС) довжиною $L=0,15$ м з внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 0,04$ м оснащена теплопередавальною матрицею, яка конструктивно виконана з мідних пластин оребрення з товщиною $\delta=1,0 \cdot 10^{-4}$ м. Пакет оребрення набрано з 74 пластин з відстанню між ними $l = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м. Для теплового впливу на металогідрид МГС потоком теплоносія, що омиває його зовнішню поверхню, використаний сталевий тонкостінний стакан, що утворює із зовнішньою поверхнею МГС канал. Товщина кільцевого каналу для теплоносія становила $5,0 \cdot 10^{-4}$ м. Потік теплоносія, що омиває зовнішню поверхню МГС, має температуру 338 К, початкова температура шару МГ $T_0 = 284$ К, початковий тиск водню $p_1=0,1$ МПа, тиск десорбції водню $p_2=0,36$ МПа, витрата гарячої води $G_{\text{г.в.}}=0,017$ кг/с. Насипна густина шару МГ LaNi_5H_x становила $\rho 3810$ кг/м³ [15].

Під час розв'язання задач тепломасообміну в металогідриді важливим фактором є коректне задання граничних умов. За граничних умов 3-го роду, що визначають закон вільного теплообміну з навколишнім середовищем на границях реактора для будь-якого моменту часу, важливою величиною є коефіцієнт тепловіддачі. Оскільки в умовах експерименту не було надано значення коефіцієнта тепловіддачі, згідно з [16] для обраної конструкції МГС значення α дорівнювало 3337 Вт/м²·К, що відповідає значенню числа Нуссельта за ламінарною течією для плоскої щілини, що обігривається з однієї сторони.

На рис. 1 подано розрахункові та експериментальні залежності масової витрати M від часу τ [15].

Найбільш інтенсивне протікання реакції спостерігається на ділянці 0–80 с. Це пов'язано із властивістю гідридів поглинати та виділяти початкові порції водню з підвищеними швидкостями. Із зменшенням температурного градієнта поблизу зони реакції в міру видалення її від нагрівальної поверхні динаміка водню зменшується. Відхилення значень масової витрати десорбованого водню, що отримані в результаті розрахунку й експерименту, не перевищували 4%.

Відповідність розробленої математичної моделі реальній природі досліджуваного явища дозволила розглядати її як досить дієвий інструмент для аналізу впливу різних факторів на динаміку водню із шару металогідриду.

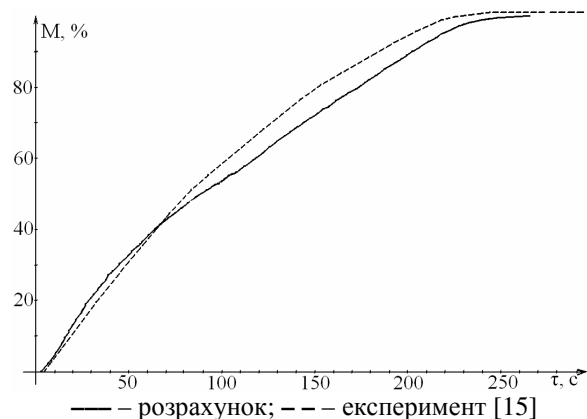


Рис. 1. Характер зміни масової витрати M десорбованого водню шару металогідриду від часу τ

За допомогою математичної моделі проведено дослідження та визначено, наскільки коректно треба задавати коефіцієнт тепловіддачі під час розв'язання задач тепломасообміну.

На рис. 2 наведено розрахункові залежності масової витрати M десорбованого водню з шару МГ від коефіцієнта тепловіддачі. Значення коефіцієнта тепловіддачі становили 3337; 700; 500; 400 Вт/(м²·К).

З рисунка видно, що зі зменшенням коефіцієнта тепловіддачі час виділення водню із шару МГ помітно збільшується. Розрахунки показали, що у разі зменшення α на 15% тривалість процесу збільшується на 35%. Отже, можна зробити висновок про яскраво виражений вплив коефіцієнта тепловіддачі за інтенсивного постійного підведення теплоти до нагрівальної поверхні на швидкість виділення водню із шару МГ.

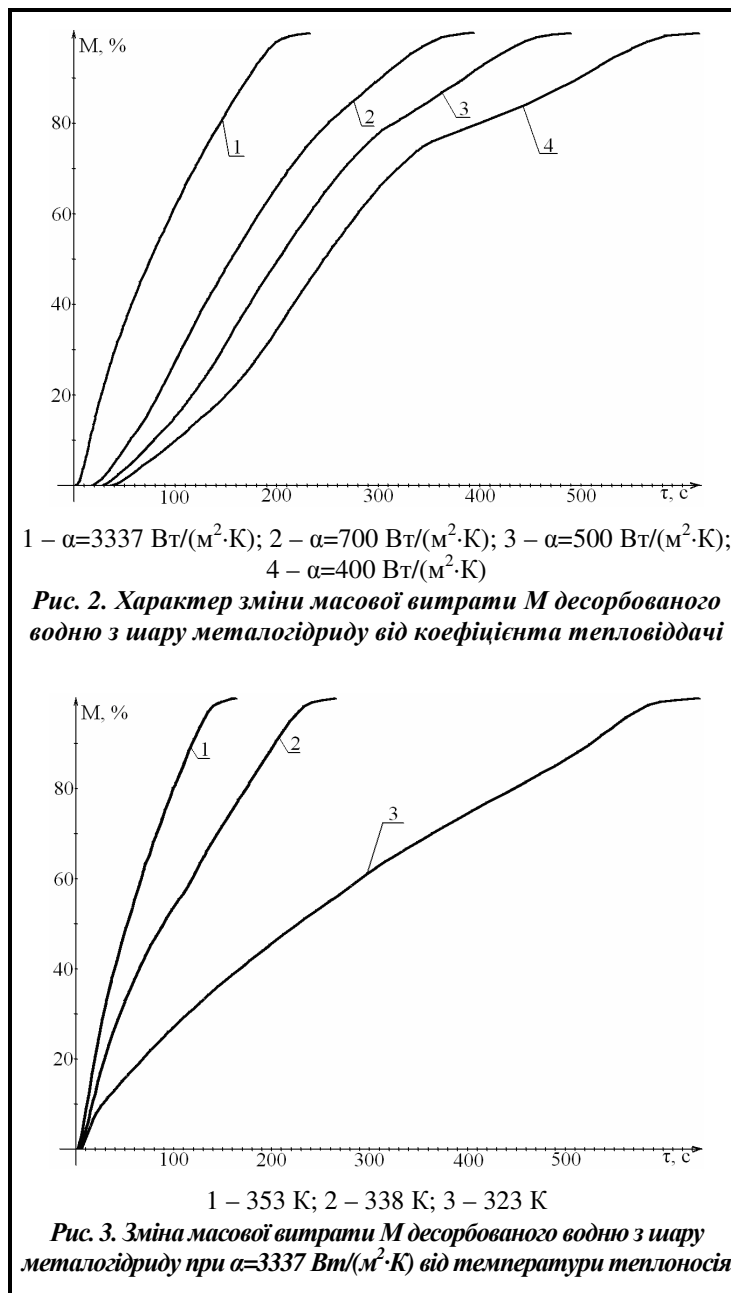
Досліджено вплив температури теплоносія на генерацію водню (рис. 3).

Під час конструювання металогідридних систем із заданим типом металогідриду, вибір якого обумовлений термосорбційними характеристиками, необхідно прагнути до скорочення тривалості циклів сорбція-десорбція водню. Це можна здійснювати шляхом підвищення теплових навантажень, реалізованих у металогідридних елементах, що досягається за рахунок збільшення питомої площі поверхні теплообміну, віднесеної до одиниці маси металогідриду.

Для вищевикладаних умов експерименту на рис. 4 подано ізолінії просування теплового фронту в процесі десорбції водню в шарі металогідриду LaNi_5H_x . Ізолінії наведені для часу 60, 90, 120, 150, 180, 210 с.

Рис. 4 ілюструє зонний характер фазового переходу в шарі металогідриду. Перенесення теплоти кондукцією у металогідриді здійснюється через тверду фазу зонами зіткнення частинок металогідриду та шляхом теплопровідності в газових порах, заповнених воднем. Поширення теплоти за рахунок фільтрації водню газовими порожнинами підкоряється законам конвективного переносу теплоти з урахуванням особливостей газодинаміки, обумовленої дрібнодисперсною структурою та позонним масообміном між твердою та газоподібною фазами. Ширина зони збільшується в міру видалення її як від нагрівальної поверхні, так і від пластини оребрення.

Висота пластини оребрення, як і частота установки пластин, головним чином впливає на просування теплового фронту в МГ. Тепло надходить до пластини оребрення як від нагрівальної поверхні, так і з бічних поверхонь від збіднених зон шару МГ. Якщо ж піти шляхом збільшення тривалості процесу виходячи з теплової інерційності шару МГ, то, крім зменшення продуктивності, це призведе до зниження економічності через втрати теплоти, що обумовлюються перегріванням шарів МГ, розташованих поблизу нагрівальної поверхні.



Найсуттєвіший вплив на динаміку виходу водню чинять внутрішній термічний і гідравлічний опори металогідриду, що накладає обмеження на геометричні розміри металогідридного елемента за заданої видаткової характеристики системи. Тому висота шару металогідриду повинна вибиратися виходячи з умов мінімізації ексергетичних втрат, викликаних перегріванням зон шару МГ поблизу нагрівальної поверхні, а також шляхом оптимізації співвідношення маси металоконструкції до маси гідриду.

Висновки

Розроблена математична модель нестационарних процесів тепломасообміну щодо металогідридних пристроїв складної конструкції. На підставі розрахунково-теоретичного дослідження проаналізований вплив точності задання коефіцієнта тепловіддачі на динаміку десорбції водню. Виділені основні чинники, що впливають на вибір геометричних розмірів металогідридного елемента. Наведена математична модель пористого середовища та програмних засобів, що її реалізують, надалі може бути використана для оптимізації конструкції та режимів роботи проєктованих металогідридних пристроїв у системах транспортування, зберігання й енерготехнологічної переробки водню.

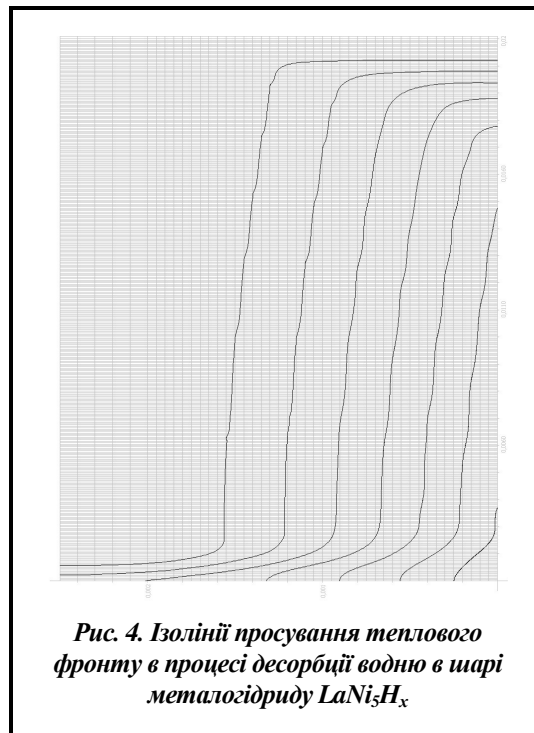


Рис. 4. Ізолії просування теплового фронту в процесі десорбції водню в шарі металогідриду $LaNi_5H_x$

Література

1. Соловей В. В., Ивановский А. И., Черная Н. А. Энергосберегающие технологии генерации и энерготехнологической переработки водорода. *Компрессор. и энерг. машиностроение*. 2010. № 2(20). С. 21–24.
2. Соловей В. В., Ивановский А. И., Черная Н. А. Применение термосорбционных компрессоров для компримирования водорода. *ВЭБ-МПП-2009*: сб. тр. 6-го междунар. симп. (Москва, 5–6 нояб. 2009). М., 2009. С. 79–92.
3. Мацевитый Ю. М., Соловей В. В., Черная Н. А. Повышение эффективности металлгидридных элементов теплоиспользующих установок. *Пробл. машиностроения*. 2006. Т. 9. № 2. С. 85–93.
4. Соловей В. В., Чорна Н. А., Кошельник О. В. Розробка науково-технічних принципів створення тепловикористовуючих металогідридних систем *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2011. № 7(89). С. 67–73.
5. Кошельник О. В., Чорна Н. А. Розробка та аналіз схем високоефективних водневих енергоперетворюючих установок. *Вісн. НТУ ХПИ*. Енергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2012. № 7. С. 170–174.
6. Соловей В. В., Кошельник, А. В., Черная Н. А. Моделирование тепломассообменных процессов в металлгидридных теплоиспользующих установках. *Пром. теплотехника*. 2012. Т. 34. № 2. С. 48–53.
7. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях (за ред. В. В. Скорохода, Ю.М. Солоніна). К.: «КІМ», 2015. 294 с.
8. Чорна Н. А. Удосконалення математичної моделі тепломасообмінних процесів у водневих металогідридних системах. *Пробл. машиностроения*. 2013. Т. 16 № 3. С. 68–72.
9. Кошельник О. В., Чорна Н. А. Перспективи використання водневих енергоперетворюючих систем для утилізації теплових вторинних енергоресурсів високотемпературних теплотехнологічних комплексів. *Пробл. машиностроения*. 2014. Т. 17. № 2. С. 46–53.
10. Чорна Н. А., Зіпунніков М. М. Удосконалення моделі тепломасообмінних процесів у водневих металгідридних системах. *Екологія и пром-сть*. 2015. № 4. С. 77–80.
11. Мацевитый Ю. М. Обратные задачи теплопроводности: в 2 т. Т. 2. Приложения. Киев: Наук. думка, 2003. 392 с.
12. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 784 с.
13. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана. *Журн. вычисл. математики. и мат. физики*. 1965. Т. 5. № 5. С. 816–827.
14. Рояк М. Э., Соловейчик Ю. Г., Шурина Э. П. Сеточные методы решения краевых задач математической физики. Новосибирск: Изд-во Новосиб. техн. ун-та, 1998. 120 с.
15. Ивановский А. И. Повышение эффективности сжатия водорода в металлгидридном термосорбционном компрессоре: дис. ... канд. техн. наук / Ин-т проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины. Харьков, 1990.
16. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

Надійшла до редакції 27.06.2018