

УДК 541.44, 546.11

В. В. СОЛОВЕЙ, докт. техн. наук

Н. А. ЧОРНА, канд. техн. наук

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, м. Харків

О. В. КОШЕЛЬНИК, канд. техн. наук

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

РОЗРОБКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПРИНЦИПІВ СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВИКРИСТОВУЮЧИХ МЕТАЛОГІДРИДНИХ СИСТЕМ

Определены структура и основные этапы разработки металлгидридных систем для энерготехнологической переработки водорода, что дает возможность провести расчеты работы системы и полностью определить комплекс конструктивных и режимных параметров, которые характеризуют ее общую эффективность.

Визначено структуру та основні етапи розробки металогідридних систем для енерготехнологічної переробки водню, що дає можливість провести розрахунки роботи системи та повністю визначити комплекс конструктивних та режимних параметрів, які характеризують її загальну ефективність.

Вступ

Актуальність проблеми застосування водневих технологій в різних галузях промисловості та енергетиці викликає підвищений інтерес в багатьох країнах світу. При цьому основними тенденціями є зниження витрат енергії, підвищення ККД пристроїв, експлуатаційної надійності технологічного обладнання та забезпечення його стабільної роботи, а також зменшення забруднення довкілля. Напрацьовані на сьогоднішній день теоретичні та експериментальні дані дозволяють переходити до створення ефективних енергоперетворювальних водневих комплексів з використанням металогідридних технологій [1].

Вибір й обґрунтування напрямку досліджень

Тепловикористовуючі установки на базі термосорбційних компресорів (ТСК) знаходять все більш широке застосування на практиці, що свідчить про наявність техніко-економічної доцільності здійснення термохімічних енергозберігаючих технологій в промислових масштабах [2]. Тому підвищення термодинамічної ефективності ТСК, які є основними енергоперетворюючими елементами водневих установок різного цільового призначення, являє собою актуальну задачу.

Розробка та реалізація методів моделювання роботи металогідридних систем пов'язана зі значними труднощами, які викликані насамперед необхідністю врахування складного взаємозв'язку фізико – хімічних процесів, таких як зміна фазового стану робочих тіл, нерівномірність протікання процесів, тепло- і масообмін між робочим тілом, елементами конструкції генератора-сорбера та ін.

Це потребує розробки ефективного обчислювального алгоритму й створення на його основі програм для моделювання роботи елементів металогідридних систем та дослідження їх параметричних характеристик. Реалізація цього завдання дозволить із незначними витратами й досить оперативно вирішувати питання розробки таких систем та вибору ефективних режимів їх роботи.

Викладення основної частини дослідження

На рис. 1 представлені основні етапи моделювання металогідридних енергоперетворювальних систем. Тут можна виділити шість взаємопов'язаних модулів, які відображають основні етапи створення металогідридних систем.

В першу чергу необхідно визначити кількість генераторів-сорберів (ГС) для термосорбційного компресора (модуль 1). Основною вимогою при цьому є забезпечення безперервної подачі водню споживачеві у заданому об'ємі. Здійснення безперервної подачі

робочого тіла споживачеві системою, яка складається з ряду елементів – джерел робочого тіла, що генерують його періодично, може бути забезпечено у випадку безперервного проходження одного за іншим процесів генерації. Подібною системою є термосорбційний компресор, що складається з декількох ГС, робота яких організована таким чином, що фази нагнітання водню кожним з них, чергуючись у часі, зливаються в безперервний процес подачі стиснутого водню в магістраль високого тиску компресора

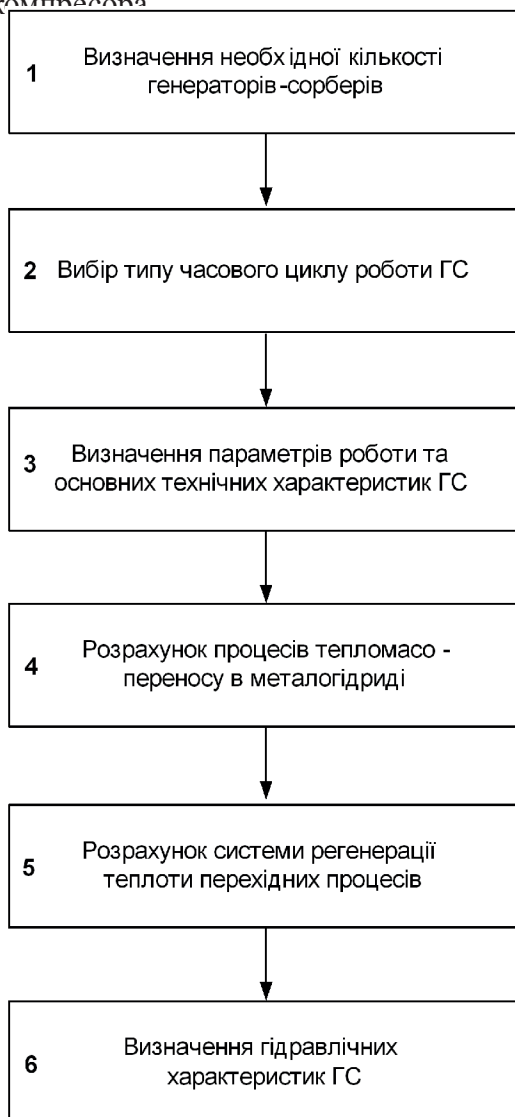


Рис. 1. Основні етапи моделювання металогідридних енергоперетворювальних систем

Далі обирається тип часового циклу роботи генератора-сорбера (модуль 2). Вибір типу циклів залежить від тривалості циклів всмоктування та нагнітання, а також потужності підводу та відводу теплоти. Стосовно роботи ТСК найбільш прийнятним є симетричний цикл, що показано авторами роботи [4]. Умовою реалізації даного циклу є рівність потужностей підведення і відведення теплоти.

Важливим етапом проектування металогідридних систем є визначення параметрів роботи та характеристик генераторів-сорберів (модуль 3). При цьому слід враховувати, що режим роботи генераторів-сорберів повинен задовольняти як умові безперервності подачі водню, так й умові забезпечення найбільшого ККД. Це потребує визначення ряду ключових параметрів, що характеризують енергетичну ефективність роботи компресору – тиску

нагнітання, ступеня стиснення, тривалості циклів та ін.

Одним з основних етапів тут є модуль, в якому здійснюється розрахунок процесів тепломасопереносу в шарі металогідриду. Враховуючи складність процесів, що проходять в металогідридному шарі та істотний вплив на них конструктивних і технологічних параметрів ГС, найбільш ефективним засобом вирішення цієї задачі є застосування методів математичного моделювання.

Математична модель процесу тепломасопереносу в металогідридах відрізняється необхідністю врахування значної кількості факторів. Особливо істотним є вплив інтенсивності підведення теплоти до металогідриду. У зв'язку із цим математична модель повинна складатися з декількох логічно-структурних елементів, що описують зв'язок процесів, які протікають в металогідриді та зміни його параметрів у поточному процесі. Відповідну математичну модель було створено в відділі водневої енергетики Інституту проблем машинобудування НАН України [5]. В її основі лежить система наступних рівнянь: рівняння теплопровідності; рівняння тепломасопереносу для металогідридного елемента на межі розподілу фаз збідненого і насиченого воднем металогідриду (МГ); рівняння, що описує зв'язок між тиском, температурою фазового переходу і масовістом водню; рівняння нерозривності; рівняння для визначення щільності потоку водню та рівняння кінетики.

У зв'язку зі складністю досліджуваних процесів при побудові математичної моделі зроблені припущення:

- режим фільтрації водню – в'язкісний;
- механізм переносу тепла обумовлений теплопровідністю, конвекцією, фільтрацією повільного водню в порах гідриду;
- масоперенос відбувається по нормалі до поверхні, що гріє;
- дифузійна складова масопереносу відсутня.

З урахуванням прийнятих припущень математична модель процесу взаємодії водню з металогідридами включає наступні рівняння:

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

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

$$\chi(\Theta) = 2 \ln \left(\frac{\Theta}{1 - \Theta} \right) + \frac{H_1(\Theta)}{R_{H_2} T}; \quad (3)$$

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

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

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R_{H_2} T; \quad (6)$$

$$-\lg(1 - \chi / \chi_\infty)^{1/3} = k\tau, \quad (7)$$

де T – температура МГ, К;

τ – час, с; a_r – коефіцієнт температуропровідності гідриду, м²/с;

β – поправковий коефіцієнт;

c_{H_2} – коефіцієнт теплоємності водню, Дж/(кг·К);

c_r – коефіцієнт теплоємності гідриду, Дж/(кг·К);

ρ_r – густина гідриду, кг/м³;

J – щільність потоку водню, кг/(м²·с);

q_s – тепловий ефект реакції термохімічної взаємодії МГ з воднем, Дж/кг;

χ – питомий масовміст водню в МГ, кг/кг;

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

Θ – ступінь заповнення міжвузлів металогідридної матриці атомами водню;

$H_1(\Theta)$ – концентраційна залежність парціальної мольної ентальпії взаємодії між упродовженими атомами водню;

R_{H_2} – газова стала для водню, Дж/(кг·К);

p – тиск водню, Па;

Π – пористість МГ;

ξ – коефіцієнт стисливості газу;

h – коефіцієнт фільтрації;

$d_{сер}$ – середній еквівалентний діаметр частинки гідриду, м;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

k – константа швидкості, що пов'язує швидкість реакції з концентраціями реагуючих речовин, с⁻¹;

p_p – рівноважний тиск у системі «металогідрид – водень», Па;

v – об'єм, м³;

a, b – віріальні коефіцієнти.

Систему рівнянь (1) – (7) замикають початкові та граничні умови III роду.

На рис. 2 схематично представлена концепція створення моделі процесу тепломасопереносу в металогідридах.

Вона складається з окремих взаємозалежних блоків, які відображають конструктивні параметри та теплофізичні характеристики шару, а також їхній реальний зв'язок. Тут можна виділити наступні блоки: 1 – блок вихідних даних; 2 – блок крайових умов; 3 – блок з визначення теплофізичних властивостей і розрахунку допоміжних коефіцієнтів; 4 – блок, що реалізує алгоритм розрахунку температурних полів; 5 – блок, що реалізує алгоритм розрахунку полів тиску; 6 – блок, що реалізує алгоритм розрахунку полів масовмісту водню; 7 – блок, що враховує хімічну кінетику процесу; 8 – блок перевірки збіжності балансів у циклах і визначення часу процесу тепломасопереносу; 9 – блок обробки та виводу результатів розрахунків.

У блоках 1, 2 задаються необхідні дані для розрахунку обраного для дослідження об'єкту. Блок 3 містить у собі модулі визначенню теплофізичних властивостей і розрахунку коефіцієнтів тепломасопереносу. Після цього розраховуються допоміжні коефіцієнти для визначення температурних полів та полів тисків об'єкту. По закінченню всіх перерахованих вище розрахунків проводиться перевірка збіжності балансових характеристик, визначення масовмісту водню та вивід отриманих даних.

У випадку застосування системи регенерації теплоти перехідних процесів ТСК, що дозволяє скоротити витрати енергії та підвищити ККД термосорбційних компресорних установок, додатково виникає необхідність вирішення ряду задач, а саме підбору регенеративних теплообмінних апаратів, вибору проміжного теплоносія, теплоакумуючих елементів та узгодження режимів роботи генераторів-сорберів та регенераторів (модуль 4, рис. 1).

Для застосування в таких системах були запропоновані регенеративні теплообмінні апарати з теплоакумуючою матрицею, яка виготовляється із матеріалів з фазовим переходом. ТО даної конструкції мають незначні габаритні характеристики при використанні в якості насадки недорогих хімічних сполук, що серійно випускаються у даний час промисловістю [6].

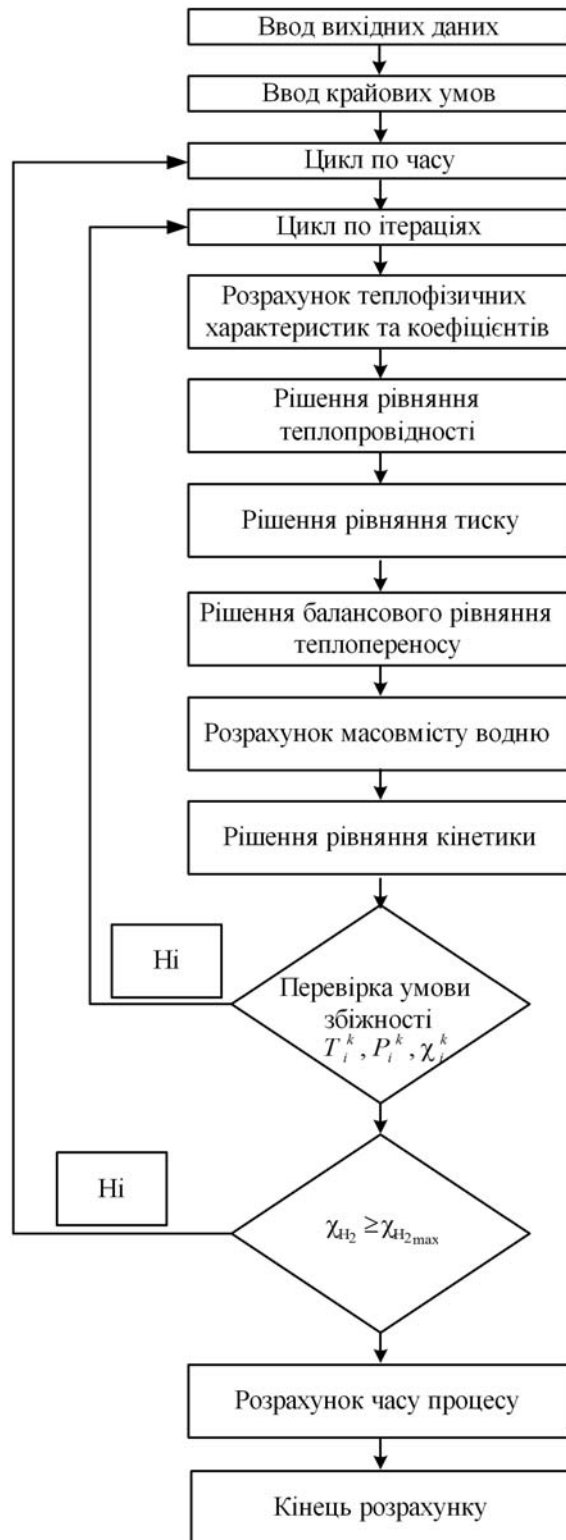


Рис. 2. Блок-схема моделі процесу тепломасопереносу в металогідридах

На рис. 3 наведено основні етапи проектування системи регенерації теплоти перехідних процесів ТСК. На початковій стадії проектування визначається тип та конструкція теплообмінних апаратів для системи регенерації теплоти перехідних процесів ТСК. Далі вирішуються питання вибору матеріалу теплоакумуючих елементів теплообмінників та типу проміжного теплоносія (якщо система передбачає його наявність). Проведення теплового розрахунку дає можливість визначити конструктивні та режимні параметри системи.

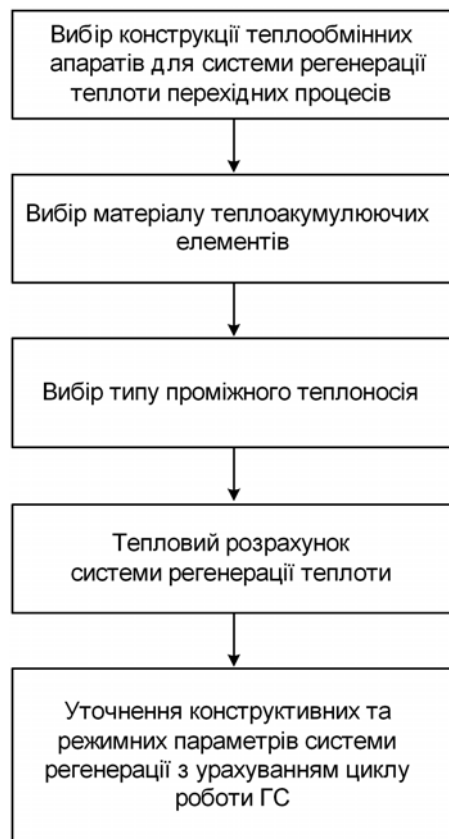


Рис. 3. Основні етапи проектування системи регенерації теплоти перехідних процесів ТСК

Після цього необхідно здійснити узгодження параметрів роботи системи регенерації теплоти з циклом роботи генераторів-сорберів шляхом уточнення конструктивних параметрів ТО або підбору відповідного теплоакумулюючого матеріалу.

Останнім етапом (модуль 6, рис. 1) при проведенні дослідження металогідридних систем є визначення гідравлічних характеристик системи з метою мінімізації загального гідравлічного опору та зменшення витрат енергії на його подолання. Основну увагу тут потрібно приділити визначенню гідравлічного опору генераторів-сорберів, фільтрів і газорозподільного механізму металогідридної установки.

Висновки

Таким чином, в результаті узагальнення інформації, яку отримано при проведенні розрахунково-теоретичних і експериментальних досліджень термосорбційних процесів, було розроблено загальну методику створення та дослідження металогідридних тепловикористовуючих систем. Методика враховує взаємозв'язок складних фізико-хімічних процесів та особливості роботи кожного елемента системи. Застосування даної методики дає можливість провести на основі розрахунків прогнозування режимів роботи системи та повністю визначити комплекс конструктивних та режимних параметрів, які характеризують загальну ефективність її роботи.

Список літератури

1. Гриценко А. В., Соловей В. В. Водневі технології – інноваційна складова енергетичної стратегії України // Сб. науч. трудов «Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета». – 2010. – Вып. 3. – С. 58–63.
2. Развитие водородгидридной техники и технологии / В. В. Соловей, В. М. Кошельник, Ю. Ф. Шмалько, А. В. Кошельник // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2006. – № 1. – С.

31–37.

3. Соловей В. В., Ивановский А. И., Черная Н. А. Энергосберегающие технологии генерации и энерготехнологической переработки водорода // Компрессорное и энергетическое машиностроение – 2010. – № 2 (20). – С. 21–24.

4. Мацевитый Ю. М., Соловей В. В., Черная Н. А. Повышение эффективности металлгидридных элементов теплоиспользующих установок // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 2. – С. 85–93.

5. Соловей В. В., Черная Н. А. Использование математического моделирования для разработки и создания эффективной конструкции металлгидридного аккумулятора водорода // Сб. трудов 5 Межд. симпозиума ВЭБ-МПП-2008 (5–6 ноября 2008 г.). – Москва, 2008. – С. 53–57.

6. Кошельник О. В. Розробка енергоефективних термосорбційних компресорів з системою регенерації теплоти перехідних процесів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2010. – № 54. – Тем. вип. «Хімія, хімічна технологія та екологія». – С. 16 – 20.

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL PRINCIPLES IN MAKING HEAT APPLYING METALLHYDRIDE SYSTEMS

V.V. Solovey, D-r. Tech. Sci.
N.A. Chorna, Cand. Tech. Sci
O.V. Koshelnik, , Cand. Tech. Sci.

A structure and basic design stages of the metal hydride systems for energy technological hydrogen processing have been determined. It allows to calculate system operation and completely to define a complex of structural and operation parameters which characterize its general effectiveness.

Поступила в редакцию 23.03 2011 г.