

М. Р. ТКАЧ, Б. Г. ТИМОШЕВСЬКИЙ, А. Ю. ПРОСКУРІН, Ю. М. ГАЛИНКІН

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**МЕТАЛОГІДРИДНИЙ АКУМУЛЯТОР-КОМПРЕСОР ВОДНЮ
З АВТОМАТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ**

Представлено конструкцію металогідридного акумулятора-компресора водню, який може використовуватись у складі систем видобутку, зберігання та стиснення водню. Ємність розробленого зразка складає 40 кг водню, маса 4,8 тон, максимальний тиск 15 МПа. Базовий металогідридний матеріал, на основі якого розроблено дану модель акумулятора-компресора – $\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$, його зворотна сорбційна ємність визначена експериментально, та складає не менше 1,38 % за масою. Особливістю розробленого акумулятора-компресора є використання повітряного охолодження, наявність системи автоматичного управління та контролю, що дозволяє проводити ряд операцій у автоматичному режимі, використання програмного, електричного та механічного захисту від перевищення тиску, що забезпечує безпечну експлуатацію розробленої моделі. Акумулятор-компресор виготовляється у вигляді сталевго короба, в якому розміщені шість блоків (капсул). Блок, відповідно, виконаний у вигляді сталевго коаксіального багатопарового циліндра, на зовнішній стороні якого розташований нагрівальний елемент і шар теплоізоляції. В середині циліндра розташована герметична капсула, заповнена металогідридним матеріалом. Капсули з'єднані між собою і колектором через систему трубопроводів. Також система трубопроводів оснащена вентилем входу, який з'єднує утворений об'єм з зовнішнім ресивером. Акумулятор-компресор оснащено зовнішнім ресивером, до якого під'єднано водневий, вакуумний, живильний та витратний контури. Кожен контур оснащено електромагнітним клапаном, а також вимірювальними пристроями, що дає змогу здійснювати автоматичний контроль параметрів та автоматичне управління пристроєм відповідно до режиму роботи. Реалізовані режими дозволяють проводити сорбцію та десорбцію водню, активацію металогідридного матеріалу, перевірку герметичності розрідженням тиском та надлишковим тиском. Наведено перелік вимірювального обладнання, на базі якого розроблена система автоматичного управління та контролю, схему підключення первинних перетворювачів, зовнішній вигляд інтерфейсу розробленого програмного забезпечення.

Ключові слова: водень; акумулятор-компресор; система автоматичного керування та контролю; металогідрид; модуль; сорбція.

Вступ

Перспективним напрямком розвитку транспорту є використання водню у якості палива, про це свідчить виникнення ряду моделей автомобільного, залізничного та водного транспорту [1 – 3]. Розповсюдження водневого транспорту обумовлене розвитком об'єктів водневої інфраструктури, це насамперед станції продукування, зберігання водню та заправні станції. При цьому, одним з найбезпечніших є спосіб зберігання водню у вигляді металогідридних з'єднань [4]. На сьогодні відомо близько двох тисяч металогідридних матеріалів, які характеризуються можливістю зворотно поглинати водень та утримувати його у зв'язаному стані [5, 6]. Використання металогідридних з'єднань дозволяє суттєво знизити маси та габарити систем зберігання та транспортування водню, а також вирішити проблему вибухонебезпечності водню при його використанні в енергетичних та технологічних установках.

1. Постановка задачі

Вітчизняною та зарубіжною промисловістю освоєно ряд пристроїв, що використовуються для зберігання, стиснення та очищення водню, а також для енергоперетворення теплових насосів та теплоутилізуючих пристроїв [8 – 10]. Попри велику кількість розроблених моделей, в окремих випадках доцільно проводити розробку конструкції водневого акумулятора з врахуванням особливостей експлуатації системи, в яку цей акумулятор має бути інтегрований.

Мета даної роботи – розробка проекту водневого металогідридного акумулятору-компресору оригінальної конструкції, для системи видобутку водню з сірководню Чорного моря.

2. Виклад основного матеріалу

Базовий металогідридний матеріал, на основі якого розроблено модель акумулятора компресора є

$\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$. Зазначений матеріал обрано з поміж шести зразків матеріалу лантанової групи зважаючи на його термодинамічні характеристики. Властивості кожного зразку визначено експериментально, сорбційна ємність водню для $\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$ складає не менше 1,38 % за масою [7].

Особливостями конструкції є інтегрована система управління, використання повітряного охолодження при зарядці воднем, можливість роботи у якості водневого компресора. Окрім цього, значна увага приділена питанням безпечної експлуатації, для чого акумулятор оснащено програмними, електричними та механічними запобіжниками, що всі разом утворюють систему безпечної експлуатації.

Акумулятор-компресор водню представляє собою металічну конструкцію, яка виконана у вигляді набору модулів. Модульний принцип дозволяє зберегти працездатність конструкції у разі виходу з ладу окремих елементів, зменшити кількість водню що може потрапити до навколишнього середовища у наслідок аварійної розгерметизації водневого контуру, спростити транспортування. Металогібридний

акумулятор - компресор водню містить в собі дві секції, кожна з яких складається з двадцяти модулів, об'єднаних системою трубопроводів з запірною арматурою та електричними кабелями. Кожний модуль оснащено фільтром, запобіжною мембраною, рядом технологічних систем. Характеристики акумулятора-компресора наведено в таблиці 1.

Кожен модуль виготовляється у вигляді сталевго короба, в якому розміщені шість блоків (капсул). Блок, відповідно, виконаний у вигляді сталевго коаксіального багат шарового циліндра, на зовнішній стороні якого розташований нагрівальний елемент і шар теплоізоляції. Загальний вигляд модуля акумулятора водню показаний на рис.1. У середині циліндра розташована герметична капсула, заповнена металогібридним матеріалом. Капсули з'єднані між собою і колектором через систему трубопроводів. Також система трубопроводів оснащена вхідним вентилям, який через фільтр з'єднує акумулятор-компресор зі споживачем. Трубопроводи, капсули та нагрівальні труби виготовляються з нержавіючого матеріалу 12Н18Н10Т.

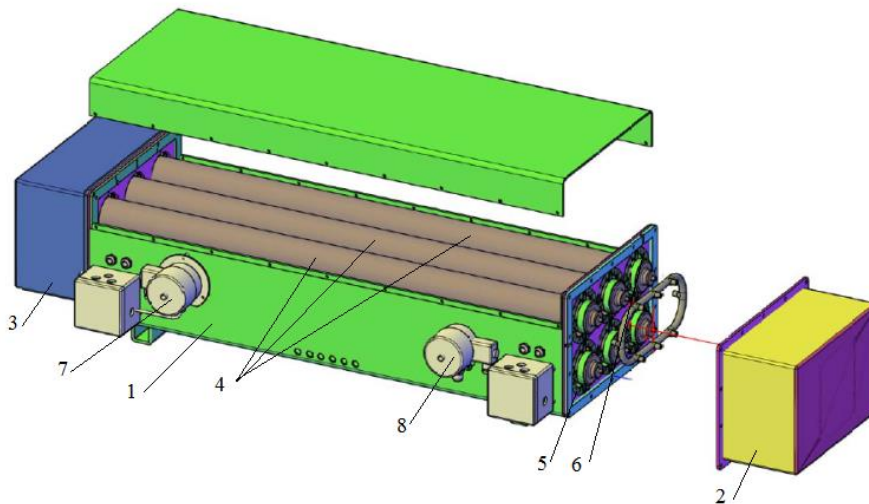


Рис. 1. Модуль акумулятору-компресору водню:

- 1 – корпус металогібридного акумулятору-компресора, 2 – передня кришка, 3 – задня кришка,
4 – капсули з металогібридним матеріалом, 5 – фланці нагрівальних трубопроводів,
6 – з'єднувальний колектор

Таблиця 1

Технічні характеристики акумулятора водню

№ з/п	Найменування показників	Значення
1	Ємність металогібридного акумулятора-компресора водню при температурі 20-35 °С і тисках 0,2 ... 1 МПа, кг (не менше)	40,0
2	Тиск, що розвивається металогібридним акумулятором-компресором водню при нагріванні до 200 °С, МПа	15,0
3	Робочий тиск водню при заряді на вході, МПа	0,4...1,6
4	Напруга живлення ланцюга нагрівачів, В (не більше)	240
5	Рід струму живлення ланцюгів нагрівачів	постійний
6	Габаритні розміри металогібридного акумулятора-компресора водню, м (не більше)	4,0 2,8 2,0

Діаметр з'єднувальних трубопроводів 8 мм, товщина стінки 1 мм, швидкість водню усередині трубопроводів забезпечує ламінарний режим течії. Трубопроводи мають ділянки для компенсації термічних деформацій.

З лівого боку коробка встановлений захисний кожух з вентилятором охолодження і шиберам. З правого боку встановлений захисний кожух з рухомою заслінкою, що забезпечує спрямований проток охолоджуючого повітря. Металогідрідний акумулятор водню забезпечує роботу при мінімальних вимогах до технічного обслуговування і нагляду.

Додатково пристрій оснащено зовнішнім ресивером, до якого під'єднано водневий, вакуумний, живильний та витратний контури. Кожен контур з'єднуються шляхом відкриття відповідного електромагнітного клапана, використовуються клапани фірми GSR ® production, тип 52 NC.

Робота акумулятору-компресора побудована на здатності металогідридів поглинати водень при відведенні тепла реакції (охолодженні) та виділяти при – при підведенні. При цьому охолодження здійснюється за рахунок продувки повітрям з температурою навколишнього середовища, в якому відсутня крапельна волога і механічні частинки. Для подачі охолоджуючого повітря використовуються вентилятори. Перетин повітряних каналів і тиск нагнітання достатні для подолання аеродинамічного опору охолоджуючих каналів акумулятора водню і забезпечення турбулентного режиму течії.

В якості нагрівальних елементів використовуються нагрівальні кабелі, які забезпечують температуру нагрівання до 873 К (600 °C). В якості з'єднувальних елементів використовуються відповідні за призначенням виробу фірми-виробника такого кабелю.

При роботі акумулятору, електромагнітні клапани повинні бути ввімкнені у строго заданій послідовності для забезпечення правильного напрямку циркуляції водню.

У процесі роботи система автоматичного управління і контролю проводить визначення параметрів кожного контуру, дотримання параметрів у визначених межах шляхом з'єднання контурів, підключення нагрівачів або охолоджувачів, діагностику всіх датчиків чим забезпечує роботу акумулятора на режимі, обраному оператором, при цьому проводиться виведення повідомлень про успішне виконання режиму або про виявлену несправність.

Під час роботи на кожному режимі, комп'ютерний блок вимірює тиск в дев'яти точках, температуру в шести точках, рис. 2. Тиск перетворюється в аналоговий сигнал 4-20 мА первинних перетворювачах Honeywell STG974 або Honeywell STD110.

Сигнал від первинних перетворювачів через нормалізатор SG-3081, надходить до термінальної плати DN 37, і через кабель CA3710D, до розширювальної плати PCI-826LU. Нормалізатор оберігає комп'ютерний блок від пошкоджень а разі виникнення позаштатної ситуації. При цьому нормалізатори і датчики тиску живляться напругою 24 В, живлення всіх датчиків тиску здійснюється через гальванічно розв'язане джерело PW-3090-24-S, яке, в свою чергу, живиться від перетворювача 380В/24В Delta CliQ DRP 24V480W.

Первинними перетворювачами температури є термометри опору з градуванням Pt100 з яких, аналогічно сигналу первинних перетворювачів тиску, інформація про температуру через нормалізатор SG-3013 надходить до блоку обробки інформації. За подібною схемою побудовані ділянки визначення витрати. Перелік первинних перетворювачів та діапазони вимірювання наведено в табл.2.

Живлення електромагнітних клапанів здійснюється від контакторів. Силовий кабель підключений від джерела CliQ DRP 24V480W. Сигнальний кабель підключений нормально розімкненим контактом на платі реле DB 16R. Плата реле управляється комп'ютерним блоком відповідно алгоритму, через плату розширення PCI-826LU.

Обробка сигналів первинних перетворювачів та генерація керуючих команд здійснюється системним блоком Advantech PPC3190, який доповнено оперативною пам'яттю DRAM Module DDR3L - 4 Gb, жорстким диском Samsung SSD і PCI платою розширення PCI-826LU. При цьому системний блок використовує розроблене спеціалізоване програмне забезпечення, інтерфейс якого наведено на рис. 3.

Інтерфейс системи автоматичного управління та контролю виконаний у вигляді мнемосхеми, на якій первинні перетворювачі (датчики) позначені з урахуванням системи та ділянки, на якій вони розташовані. При цьому фоновий колір змінюється відповідно до режиму.

Всього розроблено та реалізовано п'ять режимів роботи, два з яких експлуатаційні («Сорбція» та «Десорбція»), три – технологічні («Активация», «Перевірка герметичності вакуумом», «Перевірка герметичності надлишковим тиском»). Алгоритм роботи одного з режимів (режим «Десорбція») наведено у вигляді блок-схеми, рис. 4.

Режим роботи визначається надходженням дискретного сигналу монітора, вибір режиму виконує оператор. Розроблений акумулятор водню є складним технологічним пристроєм, призначеним для безпечного зберігання водню.

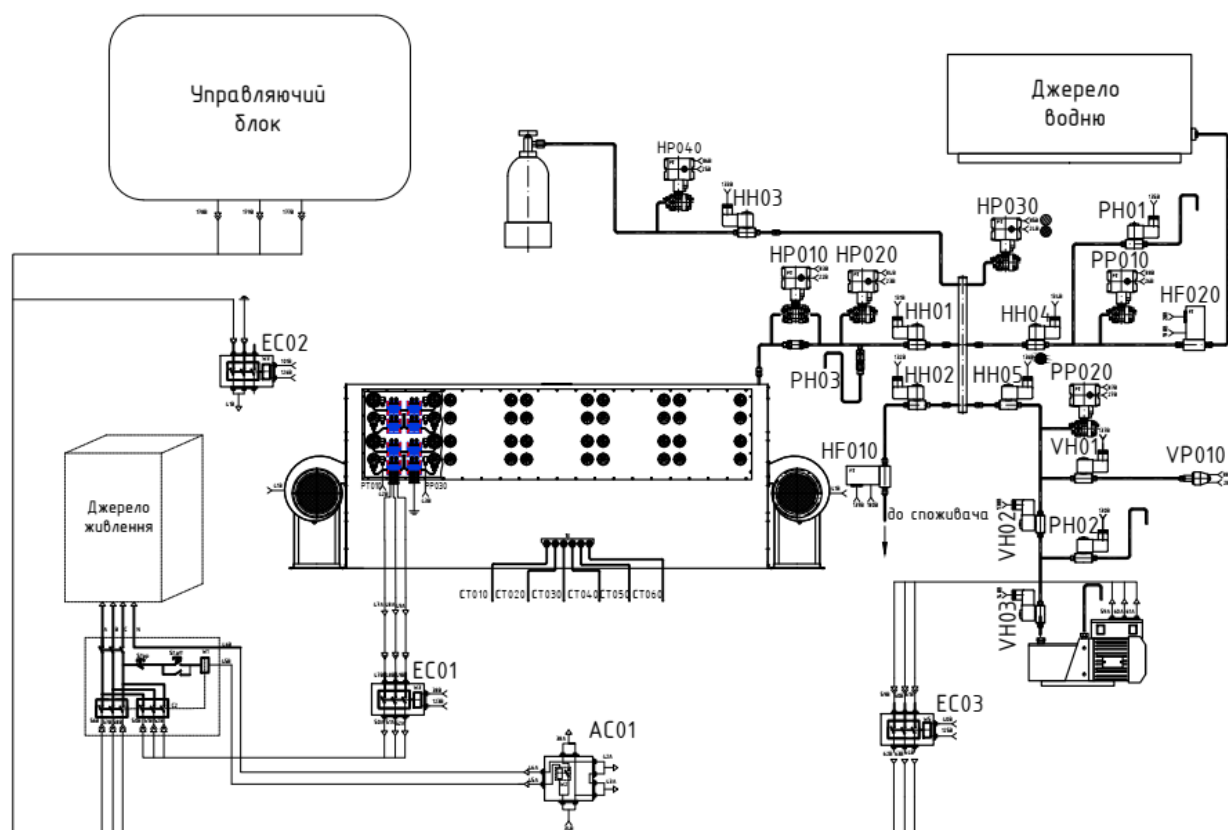


Рис. 2. Схема підключення вимірювального обладнання

Таблиця 2

Перелік первинних перетворювачів системи автоматичного управління та контролю

№	Найменування параметра, розмірність	Позначення датчиків	Діапазон вимірів	Тип датчик або джерело сигналу	Характер сигналу
1	Тиск водню, МПа	HP020...030, HP060, VP010	0...15	STG974 "Honeywell"	Аналоговий 4...20 мА
2	Перепад тиску водню на фільтрі, МПа	HP010	0...500	STD110 "Honeywell"	Аналоговий 4...20 мА
3	Витрата водню, л/хв	HF010, HF020	0...500	PARKER PORTER Model 523	Аналоговий 4...20 мА
4	Вакуум в системі, Па	VP020	13,3...106	"Agilent Covectorr"	Аналоговий 1 В
5	Контролер вакуумного датчика	VK015	13,3...106	XGS-600	Аналоговий, 1v/dec LOG, 0...10 V FS
6	Температура в трубах, °C	PT010	0...500	WIKA 73	Аналоговий, Pt 100
7	Тиск водню на виході з капсул, МПа	PP010	0...160	WIKA PGS21.1x0	-

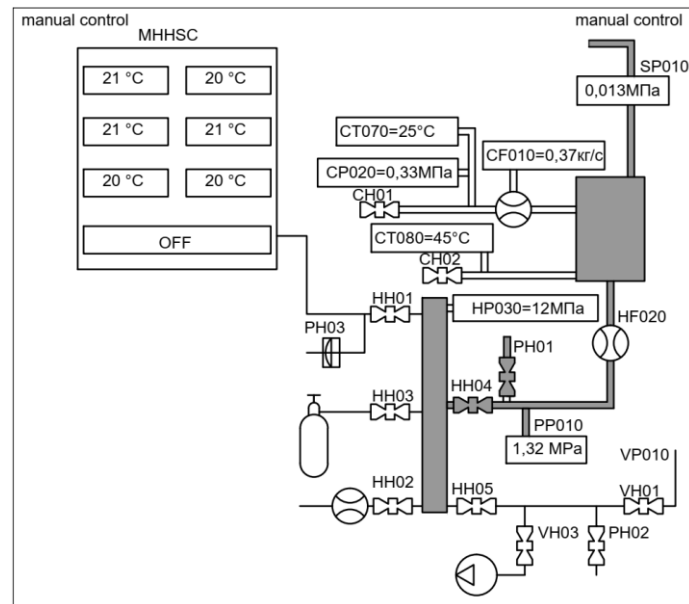


Рис. 3. Інтерфейс програмного забезпечення системи автоматичного управління та контролю

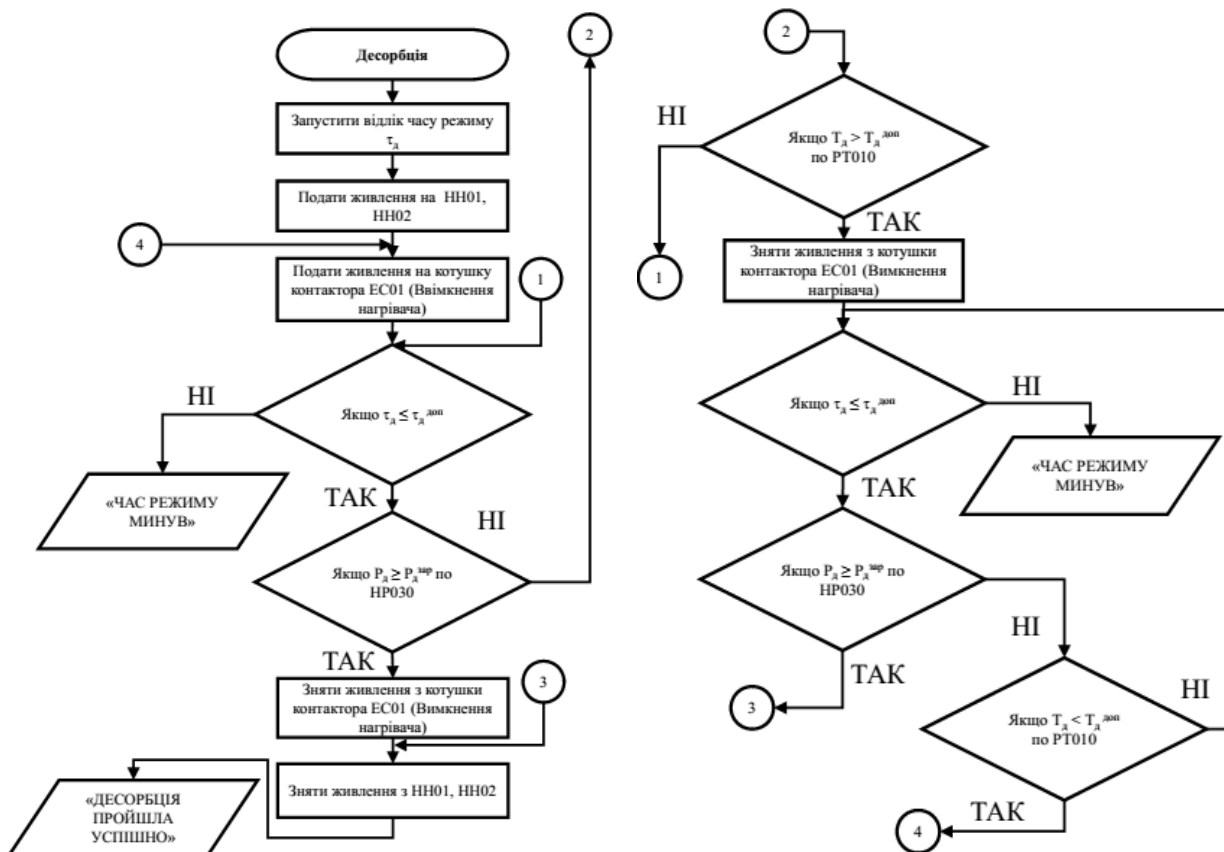


Рис. 4. Блок схема режиму «Десорбція»

Окрім цього такий акумулятор виконує функцію чистової очистки водню від сторонніх домішок, а також функцію водневого компресора, оскільки поглинення водню відбувається при відносно низькому (0,1...0,5 МПа) тиску, а видача споживачеві можлива при тиску до 15 МПа.

Висновки

Розроблено металогідридний акумулятор-компресор водню ємністю 40 кг водню. Особливістю розробленого зразка є використання повітряного охолодження та автоматизованої системи управлін-

ня. Додатково розроблений зразок оснащено програмним, електричним та механічним захистом для забезпечення безпечної експлуатації.

Визначено склад системи автоматичного управління та контролю. Розроблено алгоритм роботи водневого металогідридного акумулятора компресора водню на п'яти режимах.

Розроблене унікальне програмне забезпечення, що дозволяє проводити активацію металогідридного матеріалу, очищення контурів від шкідливих домішок, сорбцію та десорбцію водню в автоматичному режимі.

Література

1. Toyota Reveals Exterior, Japan Price of Fuel Cell Sedan [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3286486/>. – 9.06.2020.

2. Barrett, S. Fuel Cells Bulletin [Text] / S. Barrett. – 2016. – Vol. 2016, Issue 9. – P. 3.

3. На борту Energy Observer. Как устроен первый в мире катamarан на водороде [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sudostroenie.info/novosti/27131.html>. – 9.06.2020.

4. Кривцова, В. И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения водорода на автотранспортных средствах [Текст] / В. И. Кривцова, Ю. П. Ключка. – Харьков : НУГЗУ, 2013. – 236 с.

5. Колачёв, Б. А. Сплавы-накопители водорода [Текст] : справочник / Б. А. Колачёв, Р. Е. Шалин, А. А. Ильин. – М. : Металургия, 1995. – 384 с.

6. Broom, D. P. Hydrogen Storage Materials. The Characterisation of Their Storage Properties [Text] / Darren P. Broom. – Springer, 2011. – 254 p. – ISBN 978-0-85729-220-9.

7. Галынкин, Ю. Н. Экспериментальное исследование компонентов рабочего тела металлогидридной утилизационной установки непрерывного действия [Текст] / Ю. Н. Галынкин // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2015. – № 4 (460). – С. 30-33.

8. Visaria, M. Enhanced heat exchanger design for hydrogen storage using high-pressure metal hydride: Part 1. Design methodology and computational results [Text] / M. Visaria, I. Mudawar, T. Pourpoint // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2011. – № 54. – P. 413–423.

9. Visaria, M. Enhanced heat exchanger design for hydrogen storage using high-pressure metal hydride – Part 2. Experimental results [Text] / M. Visaria, I.

Mudawar, T. Pourpoint // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011. – № 54. – P. 424–432.

10. Numerical study on a two-stage Metal Hydride Hydrogen Compression system [Text] / E. I. Gkanas, D. M. Grant, A. D. Stuart et al // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – No. 645(S1). – P. 18-22.

References

1. Toyota Reveals Exterior, Japan Price of Fuel Cell Sedan. Available at: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3286486/> (accessed 9.06.2020)

2. Barrett, S. Fuel Cells Bulletin. 2016, vol. 2016, issue 9, pp. 3.

3. На борту Energy Observer. Kak ustroen pervyj v mire katamaran na vodorode. Available at: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/3286486/> (accessed 9.06.2020)

4. Krivcova, V. I., Kljuchka, Ju. P. Pozharovzryvobezopasnost' sistem hranenija vodoroda na avto-transportnyh sredstvah [Fire and explosion safety of hydrogen storage systems in motor vehicles]. Har'kov, NUGZU Publ., 2013. 236 p.

5. Kolachjov, B. A., Shalin, R. E. Il'in, A. A. Splavy-nakopiteli vodoroda: spravocnik [Hydrogen Storage Alloys: reference]. Moscow, Metalurgija Publ., 1995. 384 p.

6. Broom, D. Hydrogen Storage Materials. The Characterisation of Their Storage Properties, Springer, 2011. 254 p. – ISBN 978-0-85729-220-9.

7. Halynkin, Y. N. Jekspierimental'noe issledovanie komponentov rabochego tela metallogidridnoj utilizacionnoj ustanovki nepreryvnogo dejstviya [An experimental study of the components of a working fluid of a metal hydride recycling plant of continuous operation] Zbirnik naukovih prac NUK [Collection of scientific publications NUS]. Mikolaiv, NUK, 2015, no. 4 (460), pp. 30-33.

8. Visaria, M. Mudawar, I. Pourpoint, T. Enhanced heat exchanger design for hydrogen storage using high-pressure metal hydride: Part 1. Design methodology and computational results International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, no. 54, pp. 413-423.

9. Visaria, M. Mudawar, I. Timothée, P Pourpoint T. Enhanced heat exchanger design for hydrogen storage using high-pressure metal hydride. Part 2. Experimental results International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, no. 54, pp. 424-432.

10. Gkanas, E. I. Grant, D. M. Stuart, A. D., Pickering, L. Walker, G. S. Numerical study on a two-stage Metal Hydride Hydrogen Compression system [Text] Journal of Alloys and Compounds, 2015, no. 645(S1), pp. 18-22.

МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЙ АККУМУЛЯТОР-КОМПРЕССОР ВОДОРОДА С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, А. Ю. Проскурин, Ю. Н. Галынкин

Представлено конструкцию металлгидридного аккумулятора-компрессора водорода, который может использоваться в составе систем добычи, хранения и сжатия водорода. Емкость разработанного образца составляет 40 кг, масса 4,8 тонн, максимальное давление сжатия 15 МПа. Базовый металлгидридный материал, на основе которого разработана данная модель аккумулятора-компрессора - $\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$, его обратная сорбционная емкость определена экспериментально, и составляет не менее 1,38% по массе. Особенностью разработанного аккумулятора-компрессора является использование воздушного охлаждения, наличие системы автоматического управления и контроля, которое позволяет проводить ряд операций в автоматическом режиме, использование программной, электрической и механической защиты от превышения давления, обеспечивает безопасную эксплуатацию разработанной модели. Аккумулятор-компрессор производится в виде стального короба, в котором размещены шесть блоков (капсул). Блок, соответственно, выполнен в виде стального коаксиального многослойного цилиндра, на внешней стороне которого расположен нагревательный элемент и слой теплоизоляции. В середине цилиндра расположена герметичная капсула, заполненная металлгидридным материалом. Капсулы соединены между собой и коллектором через систему трубопроводов. Также система трубопроводов оснащена вентилем входа, соединяющим образовавшийся объем с внешним ресивером. Аккумулятор-компрессор оснащен внешним ресивером, к которому подключен водородный, вакуумный, питательный и расходный контуры. Каждый контур оснащен электромагнитным клапаном, а также измерительными устройствами, что дает возможность осуществлять автоматический контроль параметров и автоматическое управление устройством в соответствии с режимом работы. Реализованные режимы позволяют проводить сорбцию и десорбцию водорода, активацию металлгидридного материала, проверку герметичности разреженным давлением и избыточным давлением. Приведен перечень измерительного оборудования, на базе которого разработана система автоматического управления и контроля, схему подключения первичных преобразователей, внешний вид интерфейса разработанного программного обеспечения.

Ключевые слова: водород; аккумулятор-компрессор; система автоматического управления и контроля; металлгидрид; модуль; сорбция.

METAL HYDROGEN ACCUMULATOR-COMPRESSOR WITH AUTOMATIC CONTROL AND MONITORING SYSTEM

M. Tkach, B. Tymoshevskyy, A. Proskurin, Y. Halynkin

A project of metal hydride hydrogen compressor is presented, which can be used as an element of refueling complexes, hydrogen storage and compression systems. The capacity of the developed sample is 40 kg of hydrogen, the mass is 4,8 ton, and the maximum compression pressure is 15 MPa. The base metal hydride material on the basis of which this compressor battery model is developed is $\text{LaNi}_{4.5}\text{Al}_{0.5}$. the sorption capacity of hydrogen of which is determined experimentally, and is at least 1.38 % by weight. A feature of the developed compressor battery is the use of air cooling, the presence of an automatic monitoring and control system, I allow a number of operations to be performed in automatic mode, and the use of software, electrical and automatic protection against overpressure. Each accumulator-compressor is made in the form of a steel box in which six blocks (capsules) are placed. The block, respectively, is made in the form of a steel coaxial multilayer cylinder, on the outer side of which there is a heating element and a layer of thermal insulation. In the middle of the cylinder is a sealed capsule filled with metal hydride material. Capsules are interconnected with the collector through a piping system. Also, the piping system is equipped with an inlet valve connecting the volume formed with an external receiver. The battery-compressor is equipped with an external receiver, to which a hydrogen, vacuum, nutrient and consumable outline is connected. Each circuit is equipped with an electromagnetic valve, as well as measuring devices, which makes it possible to carry out automatic control of parameters and automatic control of the device in accordance with the operating mode. A list of equipment is presented, on the basis of which a system of automatic control and monitoring, a block diagram of the main operating modes, an interface of the developed software are developed. Depending on the mode chosen by the operator, the automatic control and monitoring system allows activation of metal hydride materials, purification of contaminants of harmful impurities, sorption and desorption of hydrogen.

Keywords: hydrogen; accumulator-compressor; automatic control system; metal hydride; module; sorption.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Тимошевський Борис Георгійович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Проскурін Аркадій Юрійович – канд. тех. наук, доцент, доцент каф. «Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація», Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Галинкін Юрій Миколайович – канд. техн. наук, викл. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Mykhaylo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-4944-7113, Scopus Author ID: 57202210289, <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=XqfGS0wAAAAAJ>

Boris Tymoshevskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: borys.tymoshevskiy@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-4649-702X, Scopus Author ID: 6506269318.

Arkadii Proskurin – Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of Internal Combustion Engines, Plants and Technical Exploitation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: arkadii.proskurin@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0002-5225-6767, Scopus Author ID: 57203617130, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=LCGxGC8AAAAAJ&hl=uk>

Yurii Halynkin – Candidate of Engineering Sciences, Lecturer of Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua, ORCID Author ID: 0000-0001-5272-4156, Scopus Author ID: 57204396250, https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=ix_y1CwAAAAAJ