

Improvement of Hydrogen Absorption and Desorption for AB₅-Alloy by a Spiral Heat Exchanger

K.V. Agapov^{1,3}, D.O. Dunikov^{1,2}, K.D. Kuzmin³, E.V. Stoyanov³

¹National Research University, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russia

²Joint Institute of High Temperature (RAS), Moscow, 125412, Russia

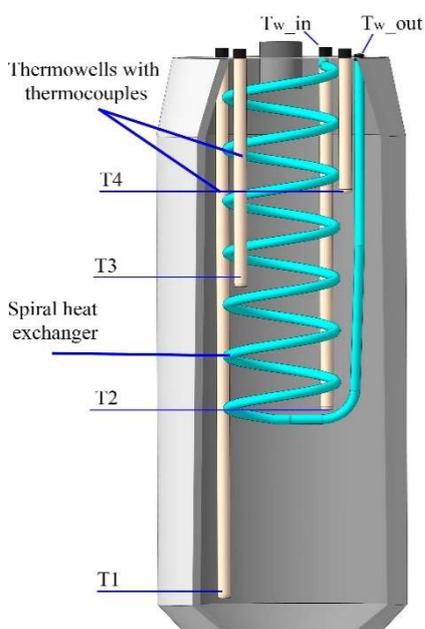
³InEnergy LLC, Moscow, 115201, Russia

agapovkv@mail.ru

Abstract

Experimental studies were performed with metal hydride powder La_{0.75}Ce_{0.25}Ni₅ in the current work. Own choice of AB₅-alloy conditioned by sufficient mass content of hydrogen (up to 1.4%), moderate pressure – at 45° C about 4 MPa and commercial cost. A spiral heat exchanger was placed in a hydrogen tank with a hydraulic volume of 12 liters, and it occupies 65 % of the total height of the tank. Thus, part of the metal hydride was out of direct contact with the thermal surface of the heat exchanger. In chemical processes the coil either removed heat or brought. It is noted that the duration of the fuel cell was twice as high when in the process of desorption heat was supplied to the system. Energy costs for own needs of heating and water circulation amounted to 220 W, and the useful power generated by the fuel cell – 800 W. Thermocouples located at different levels of the tank showed an average temperature difference from 3 to 7.5° C when passed absorption or desorption H₂.

Keywords: hydrogen, hydrogen storage, heat and mass transfer, metal hydride



Charging time with cooling, sec	1920
Charging time without cooling, sec	2650
Discharging time with heating, sec	7240
Discharging time without heating, sec	3291

УДК 621.352.6

Повышение скорости абсорбции и десорбции водорода для сплава типа АВ₅ за счёт использования спирального теплообменника

К.В. Агапов^{1,3}, Д.О. Дуников^{1,2}, К.Д. Кузьмин³, Е.В. Стоянов³

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, Москва, 111250, ул. Красноказарменная, д.14

²Объединённый институт высоких температур РАН
Россия, Москва, 125412, ул. Ижорская, д.13, стр.2

³ООО «ИнЭнерджи»,
Россия, Москва, 115201, 2-й Котляковский пер. 18,

agapovkv@mail.ru

Аннотация

В текущей работе были выполнены экспериментальные исследования энергетической системы на основе металлгидридного порошка La_{0.75}Ce_{0.25}Ni₅. Выбор сплава АВ₅ обуславливался достаточным массовым содержанием водорода (до 1.4 %), умеренным давлением при 45°С порядка 4 МПа и коммерческой стоимостью. Для проведения измерений в баллон объёмом 12 л был помещён змеевиковый теплообменник, причём занимает он 65 % от общей высоты баллона. Таким образом, часть металлгидрида оказывается вне непосредственного контакта с тепловой поверхностью змеевика. При химических процессах змеевик либо отводил тепло, либо подводил. При этом отмечается, что продолжительность работы топливного элемента была в два раза выше, когда при десорбции к системе подводили тепло извне. Затраты на собственные нужды подогрева и циркуляции воды составили 220 Вт, а полезная мощность, вырабатываемая топливным элементом – 800 Вт. Термопары, расположенные на разных уровнях баллона, показывают в среднем перепад температур от 3 до 7.5°С при поглощении или выделении H₂. Сделаны предположения по улучшению работы в дальнейшем.

Ключевые слова: водород хранение водорода, теплообмен, металлгидрид

Список обозначений

A	– редкоземельный металл, образующий стабильный гидрид
B	– переходный металл, не образующий стабильный гидрид
T	– показания термопары (температура)
α-фаза	– образование твёрдого соединения
β-фаза	– образование гидридной фазы металла
ΔQ	– количество теплоты в реакции абсорбции или десорбции водорода
1...4	– порядковый номер термопары
w _{вх}	– температура воды на входе в баллон
w _{вых}	– температура воды на выходе из баллона
x, y, z	– число атомов вещества

1. Введение

Для развития альтернативной энергетики в стране, водород, полученный из процессов риформинга углеводородов, электролиза, использования возобновляемых источников энергии (сюда относится использование биотоплива, солнечной энергии, ветровой, геотермальной [1, 2]) необходимо хранить в каком-то виде. Одним из интересных направлений исследований и практических работ в данной области является хранение водорода в структуре металлической решётки [3–6].

Выделяют два направления для металлогидрида: 1) хранение водорода; 2) тепловая область применения, когда в результате абсорбции или десорбции водорода происходит экзотермическая или эндотермическая реакции [7, 8]. Системы, основанные на металлогидриде, могут иметь следующие назначения: система охлаждения; водородный компрессор; тепловой насос [9, 10]. Сплав металлогидрида должен соответствовать определённым требованиям для водородной энергетики, сюда относят сохранение свойств в плане кинетики водорода, процентная ёмкость хранения водорода, частицы сплава не должны агломерировать друг с другом, иначе будет уменьшаться эффективность сделанной системы хранения водорода [11]. Достоинствами металлогидридных соединений можно назвать такие пункты, как хорошие свойства по хранению водорода- низкое давление хранения и массовое содержание в металлогидриде от 0.7 до 5.5 % в зависимости от типа химического соединения [12].

Первый этап соединения металл–водород включает в себя массоперенос молекул водорода на поверхность раздела фаз твёрдое тело–газ. Затем происходит хемосорбция молекул водорода на поверхности интерметаллического соединения (металлогидрида уже в дальнейшем). Водород, распадаясь на атомы, диффундирует в объём кристаллической решётки интерметаллического соединения, формируя твёрдую фазу, которая называется α -фаза. В α -фазе атомы водорода хаотично распределяются внутри решётки. Далее при увеличении давления и концентрации водорода образуется гидридная фаза металла, β -фаза [13]. В β -фазе атомы водорода лежат уже организованно внутри металла, что показано на рис. 1.

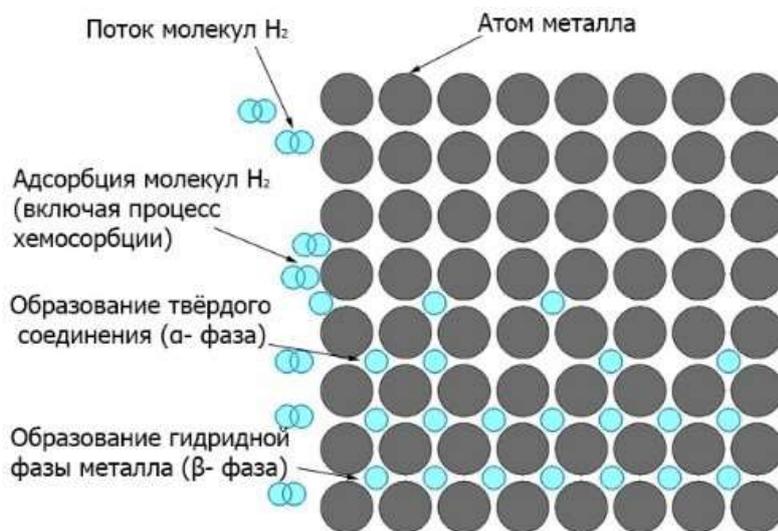


Рис. 1. Модель включения молекул водорода в структурную решётку металлогидрида

Химическую реакцию можно описать следующим выражением [14]:



где А – редкоземельный металл, образующий стабильный гидрид; В – переходный металл, не образующий стабильный гидрид; ΔQ – количество теплоты, которое идёт со знаком плюс или минус в зависимости от типа реакции.

Для снижения стоимости металлгидрида, к примеру, системы LaNi_5 , редкоземельный элемент, лантан, часто представлен мишметаллом (сочетание редкоземельных элементов, которые дешевле производить за счёт разделения крупных массовых элементов или лёгких металлов, таких как церий) [15]. Тогда соединение может быть $\text{La}_{1-d}\text{Ce}_d\text{Ni}_5$.

Металлогидридные системы, разработанные в ОИВТ РАН, применяются как для хранения, так и для очистки водорода, например, в работе [16] описано разделение смеси водорода и углекислого газа, для интенсификации теплообмена в данной системе реализован контур охлаждения в виде рубашки и трубки Фильда.

В [17] сообщается, что был выполнен металлгидридный контейнер для хранения водорода. Он представляет собой трубчатый корпус, внутри которого расположен теплообменный контур для интенсификации теплопереноса в порошке металлгидрида, размещённого в межтрубном пространстве.

Численное моделирование теплообменного контура металлгидридного реактора было выполнено в работах [18, 19] с использованием программного пакета COMSOL, и был сделан вывод о том, что спиральный теплообменный аппарат помогает увеличить общий коэффициент теплопередачи внутри реактора и улучшить динамику абсорбции, десорбции.

В работе [20] исследованы 4 различных типа теплообменников для металлгидридного сплава: единая трубка внутри реактора; спиральный теплообменник; охлаждение внешней конвекцией и внешнее охлаждение посредством поперечных рёбер. Результаты показывают, что реакторы со спиральным и теплообменником с поперечными рёбрами наиболее быстро поглощают водород и эффективно отводят тепло реакции. Внешнее охлаждение хорошо тем, что можно развить высокую площадь теплообмена, при этом сохраняется простота конструкции реактора.

Задачей настоящего исследования является:

1) Улучшение хранилищ для водорода на основе металлгидрида в процессе их эксплуатации. При создании таких хранилищ встаёт вопрос о безопасности, скорости абсорбции и десорбции водорода, количестве запасённого газа.

2) Достижение уменьшения времени абсорбции и увеличения длительности десорбции H_2 посредством использования теплообменного контура внутри баллона. Сделать заключение о эффективности работы и возможности дальнейшего использования в подобных системах.

2. Экспериментальная установка

Для проведения экспериментов был выбран металлгидридный сплав типа AB_5 : $\text{La}_{0.75}\text{Ce}_{0.25}\text{Ni}_5$ (WholeWin (Пекин) MaterialsSci.&Tech. Co., Ltd) массой 25 кг. Состав порошка металлгидрида представлен в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики используемого металлгидрида

Металлогидрид	Основной состав			Примеси				
	La	Ce	Ni	Fe	Zn	Ca	Mg	O
Сплав AB_5	24.1±1.5	8.1±1.5	67.8±1.5	<0.2	<0.01	<0.01	<0.01	<0.08

В качестве основы для изготовления реактора хранения водорода был выбран стандартный стальной баллон объёмом 12 л. Для интенсификации абсорбции и десорбции водорода из порошка металлгидрида использовался спиральный теплообменник, установленный внутри баллона и соединённый с баками холодной и горячей воды ёмкостью по 10 и по 6 л соответственно. Теплообменник выполнен из нержавеющей трубы (AISI 316L) в виде змеевика (спирали), наружный диаметр трубы 6 мм, стенка 1 мм. По теплообменному аппарату движется теплоноситель (вода), который в зависимости от задачи может как обогревать металлгидрид, так и отводить тепло реакции поглощения водорода. Площадь теплообменной поверхности составляет 0.06 м^2 , при этом змеевик занимает ~65 % от всей высоты баллона.

Сделано это было для того, чтобы сравнить теплообмен в области расположения теплообменника и в области без теплообменника.

Для контроля температуры внутри баллона были вварены четыре гильзы. Чтобы увеличить коэффициент теплоотдачи от металлгидрида к термопаре внутри гильз было залито компрессорное масло, у которого коэффициент теплопроводности больше, чем у воздуха.

В вентиль баллона была установлена пористая керамическая трубка, которая блокирует крупно- и среднedisперсные частицы сплава порошка металлгидрида вплоть до 0.001 мм и служит в качестве фильтра. Схема системы система в разрезе (без фильтра и его крепления) показана на рис. 2.

Для проверки безопасности собранного баллона для хранения водорода было проведено гидравлическое испытание с избыточным давлением воды в 3.4 МПа, что обуславливает запас по сравнению с планируемыми рабочим давлением.

После успешных проверок по безопасному использованию баллон высушивался при естественных условиях несколько суток. Далее был засыпан металлгидрид, объём которого составил 75 % от высоты баллона, впоследствии с помощью форвакуумного насоса был откачен воздух из системы хранения. Металлогидрид был активирован несколькими циклами зарядки-разрядки водорода.

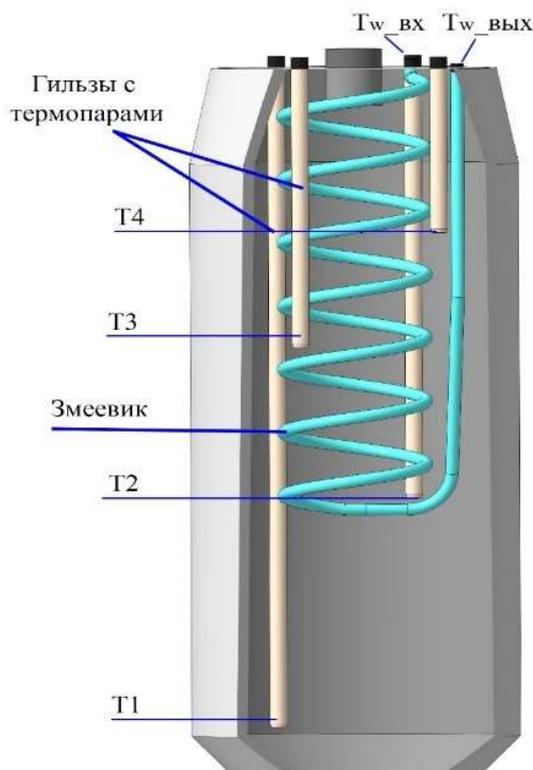


Рис. 2. Схема баллона для хранения водорода в металлгидриде, где T1, T2, T3, T4 – термопары; T_w – термопары, измеряющие температуру входа и выхода воды

Циркуляция воды по змеевиковому теплообменному контуру осуществлялась с помощью мембранного насоса KNF 1.25, расход воды составлял до 300 мл/мин. Датчики температуры воды установлены непосредственно на входе и выходе воды из баллона. Общее изображение системы представлено на рис. 3. В качестве потребителя водорода использовался водородо-воздушный твёрдополимерный топливный элемент номинальной мощностью 1.5 кВт и нагрузка в виде ламп накаливания.

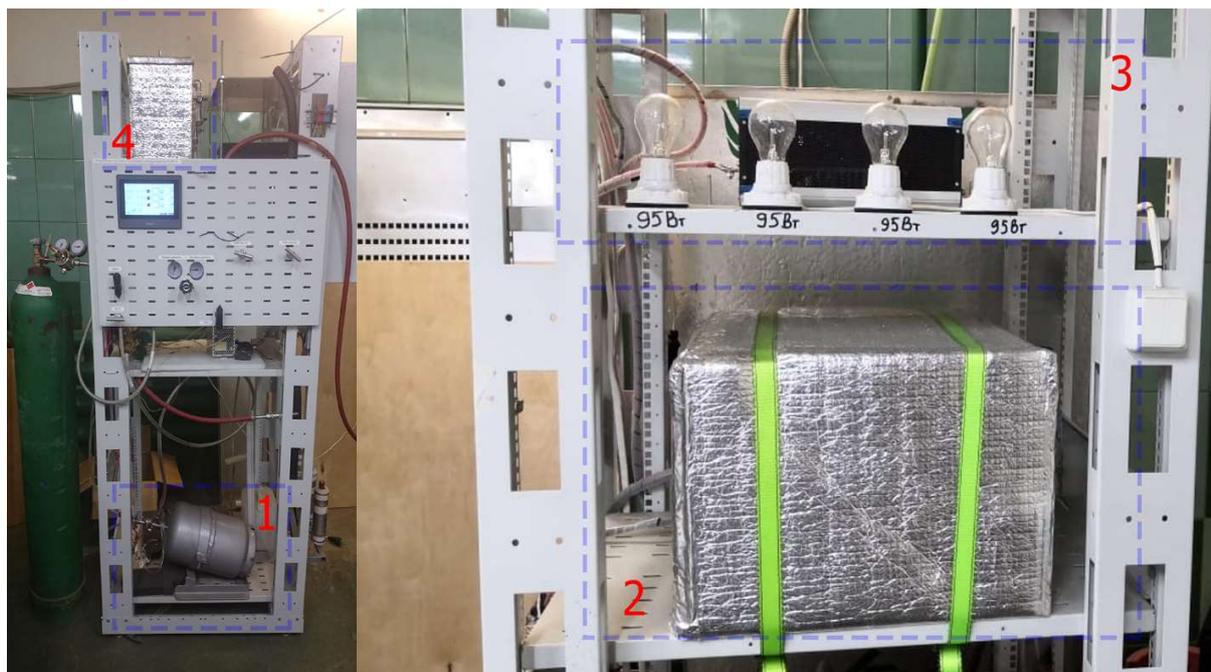


Рис. 3. Общая фотография собранной тестовой системы: 1 – баллон с металлогидридом внизу; 2 – топливный элемент в качестве потребителя водорода и сверху нагрузка в виде ламп накаливания (3); 4 – баки с водой

3. Результаты исследований

Был проведён ряд экспериментов с циркуляцией и без циркуляции охлаждающей воды при заправке баллона водородом. Результаты эксперимента с циркуляцией показаны на рис. 4. Заправка осуществлялась в несколько этапов с постепенным ростом давления подачи водорода.

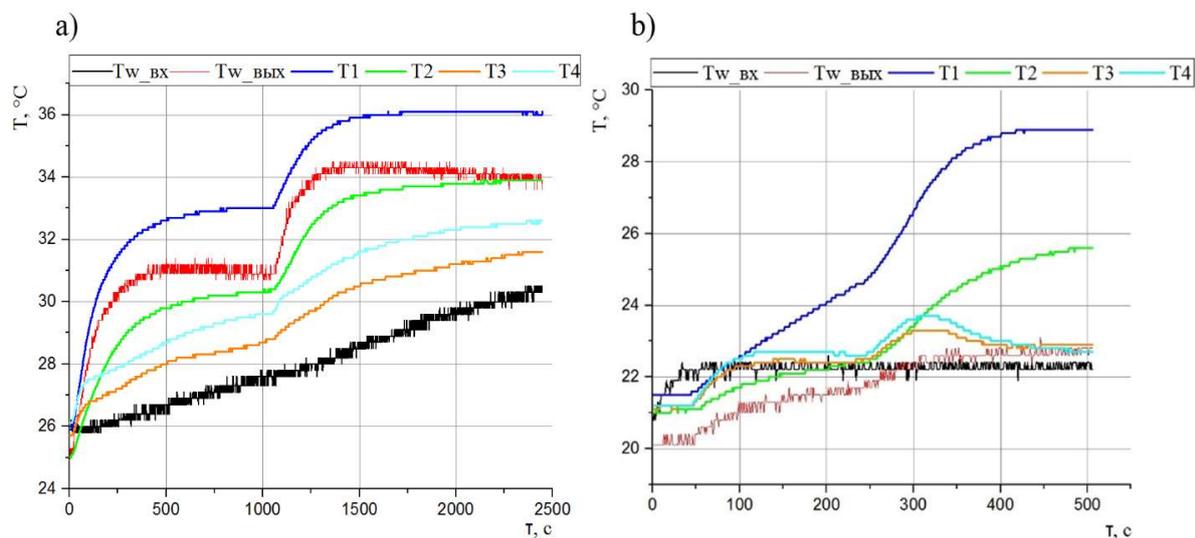


Рис. 4. Графики изменения температур внутри засыпки металлогидрида и воды: а) в начале абсорбции; б) при уже заправленном водородом металлогидриде и при давлении большем, чем 1.0 МПа

На первом этапе в начале эксперимента (рис. 4, а) давление на входе в баллон с металлогидридом было установлено с помощью редуктора на уровне 0.20 МПа, и был открыт вентиль на реакторе. По мере зарядки реактора давление в баллоне начало расти и, из-за нагрева

металлогидрида и охлаждающей воды в баке, постепенно превысило давление, установленное на редукторе, в результате чего подача водорода в реактор остановилась. После 1000 с входное давление на редукторе увеличили до 0.42 МПа. Реакция протекала схожим образом, давление в реакторе начало расти и конце из-за роста температуры оно увеличилось до 0.8 МПа, что снова привело к остановке процесса зарядки.

На втором этапе входное давление было установлено на уровне 1.0 МПа, процесс показан на рис. 4, б. Процесс, показанный на рис. 4, б, начался после остывания реактора с металлогидридом; заняло это примерно 2.5 часа. Поэтому начальные температуры равны 21°С. После 250 с сделали давление 1.4 Мпа; в конце же заряда давление в реакторе достигло 1.85 МПа.

Результаты эксперимента по разрядке баллона с циркулирующей воды показаны на рис. 5. После установления теплового равновесия в системе хранения и достижения температуры окружающей среды, включили термонагревательный элемент, тем самым стали нагревать циркулирующую по контуру воду. Энергозатраты на осуществление этого составляли: насос потреблял порядка 25 Вт и ТЭН порядка 200 Вт. Далее подали водород в твёрдополимерный топливный элемент и включили нагрузку. Нагрузка на топливный элемент была 800 Вт (в сумму не входят энергозатраты на насос и нагрев воды). При этом система была сделана так, что вентиляторы топливного элемента включались сразу от возникновения потенциала на нём в результате электрохимической реакции. Затем с помощью преобразователя из постоянного тока в переменный включили оставшуюся часть нагрузки – лампы накаливания.

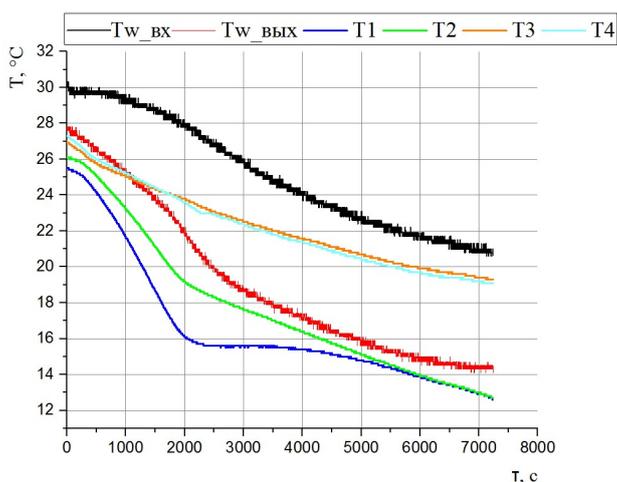


Рис. 5. Изменения температуры воды и металлогидрида при десорбции

Далее, чтобы оценить эффективность собранной системы, проделали такую же серию экспериментов, но уже без циркуляции воды, соответственно: при абсорбции водорода не было охлаждающей воды, а при десорбции не было подогревающей воды. Результаты аналогично показаны на рис. 6 и 7.

На рис. 6, а первоначальное давление заправки было 0.2 МПа, по мере абсорбции давление в баллоне увеличивалось в связи с ростом температуры и на этапе до 1250 с составило 9.9 МПа. После 1250 с увеличили давление ещё раз и на выходе редуктора стало 1.2 МПа, а в конце зарядки давление в реакторе было 2.1 МПа. На рис. 6, б начальное давление было чуть меньше 1.5 МПа, поэтому на редукторе выставили 1.6 МПа. Процесс, показанный на рис. 6, б, начался после остывания реактора с металлогидридом. Заняло это тоже примерно 2.5 часа. На 1100 с для поддержания абсорбции немного увеличили давление до 2.0 МПа. В конце зарядки давление стало 2.5 МПа. Разница между конечным давлением на рис. 6, а и начальным давлением на рис. 6, б заключается в том, что температура металлогидрида понизилась спустя некоторое время за счёт естественного охлаждения.

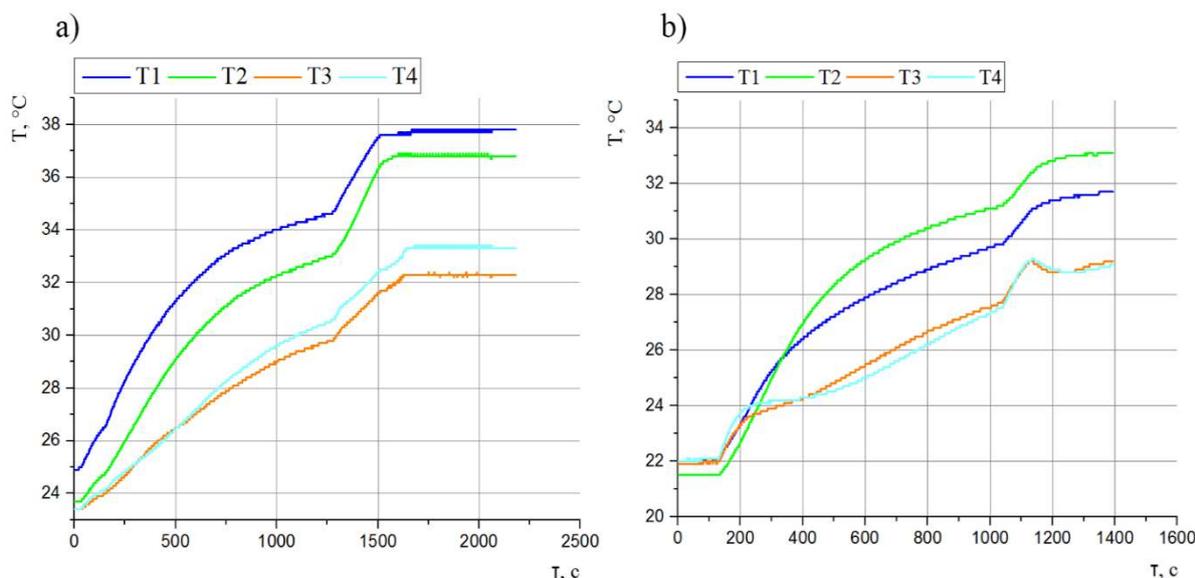


Рис. 6. Графики изменения температур металлгидрида/водорода: а) в начале абсорбции; б) при уже заправленном водородом металлгидриде и при давлении большем чем 1.0 МПа

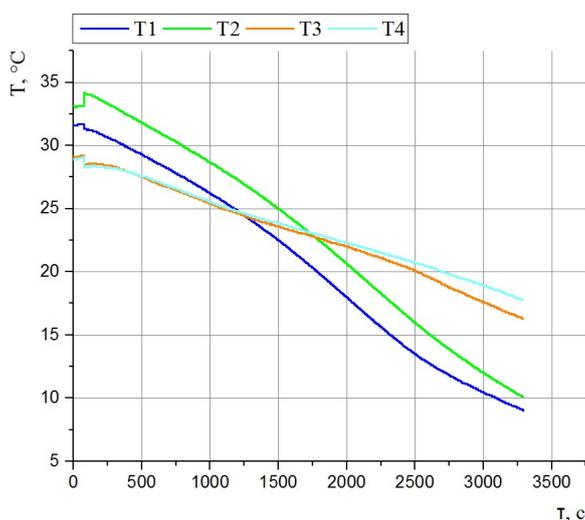


Рис. 7. Изменения температуры металлгидрида при десорбции

В результате заметно, что тепловой контур улучшает динамику зарядки и разрядки металлгидрида при протекании абсорбции и десорбции соответственно. Те области, до которых не доходит змеевик, наиболее сильно подвергаются изменениям температуры, эта разница отчётливо видна на всех представленных результатах. Топливный элемент потребляет такое количество водорода, которое требуется ему в данный момент времени с учётом нагрузки и не считая потери при продувке. Так как в системах на топливных элементах одним из важных параметров является расход и давление газа, а значит для стабильной работы нужен поток с избыточным давлением в требуемых интервалах, поэтому окончание десорбции считали по падению давления до минимального рабочего в топливном элементе, а это – 0.03 МПа. Сравнивая рис. 5 и рис. 7, можно сделать вывод, что подвод тепла к системе значительно увеличивает время работы.

4. Заключение

Для исследования протеканий абсорбции и десорбции водорода была собрана экспериментальная установка, включающая в себя: систему хранения водорода, систему охлаждения и нагрева с помощью циркулирующей воды, систему потребления водорода.

Из полученных результатов видно, что система работает эффективнее, когда есть возможность интенсифицировать скорость реакции водорода и металлогидрида. В данной работе реализовано это с помощью змеевикового теплообменника. Уникальность работы заключается в том, что змеевик занимает 65 % от всей высоты баллона, поэтому можно наблюдать градиент температуры при химических процессах и, на основании этого, сделать выводы о работе системы. Разница в работе топливного элемента при подогреве баллона и без составила чуть более 60 минут. Ещё одним преимуществом оказалось то, что давление в процессе зарядки с циркуляцией воды было 1.85 МПа, а без циркуляции было 2.5 МПа, что подтверждает повышение безопасности эксплуатации при использовании теплообменного контура.

В качестве недостатка собранной системы можно выявить, что свойств воды (сюда можно включить не только теплоёмкость, но и перепад температур, гидравлический режим) оказалось недостаточно для полноценного отвода тепла, в таком случае необходимо использовать контур охлаждения с радиатором.

Представленные результаты позволяют сообщить о том, что подобные системы могут быть использованы как резервные накопители и источники энергии.

Литература

1. Canan Acar, Ibrahim Dincer. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 218. Pp. 835–849.
2. Дуников Д.О., Борзенко В.И., Малышенко С.П., Блинов Д.В., Казаков А.Н. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов (обзор). *Теплоэнергетика*. 2013. № 3. С. 48–57.
3. Marzia Pentimalli, et al., AB5/ABS composite material for hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34. Pp. 4592–4596.
4. Marco Gambini, Tomasso Stilo, Michela Vellini. Hydrogen storage systems for fuel cells: Comparison between high and low-temperature metal hydrides. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 15118–15134.
5. Claudio Corgnale, Bruce J. Hardy, Donald L. Anton Structural analysis of metal hydride-based hybrid hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol.37. Pp. 14223–14233.
6. Shinichi Miura, Akitoshi Fujisawa, Masayoshi Ishida. A hydrogen purification and storage system using metal hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Pp. 2794–2799.
7. M. Bhourri, M. Linder, I. Bürger. Metal hydride reactor for dual use: Hydrogen storage and cold production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. Vol. 43. Pp. 23357–23371.
8. Liang Tong, et al., Thermal management of metal hydride hydrogen storage reservoir using phase change materials. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. No. 44. Pp. 21055–21066.
9. Emmanuel Stamatakis, et al., Metal hydride hydrogen compressors: Current developments & early markets. *Renewable energy*. 2018. No. 127. Pp. 850–862.
10. Ye Tao, et al., Electrochemical compressor driven metal hydride heat pump. *International Journal of Refrigeration*. 2015. No. 60. Pp. 278–288.
11. Bellosta von Colbe J, et al., Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 7780–7808.
12. Shahin Shafiee, Mary McCay. Different reactor and heat exchanger configurations for metal hydride storage system- A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. Pp. 9462–9470.

13. J. Bloch, M.H. Mintz. Kinetics and mechanism of metal hydrides formation- a review. *Journal of Alloys and Compounds*. 1998. Vol. 253–254. Pp. 529–541.
14. Lototsky M.V., et al., The use of metal hydrides in fuel cell applications. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2017. No. 27. Pp. 3–20.
15. M. Ram Gopal, S. Srinivasa. Murthy Experiments on a metal hydride cooling system working with ZrMnFe/ MmNi_{4.5}Al_{0.5} pair. *International Journal of Refrigeration*. 1999. No. 22. Pp. 137–149.
16. Dunikov D., et al., Biohydrogen purification using metal hydride technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 46. Pp. 21787–21794.
17. Тарасов Б.П., и др., Методы хранения водорода и возможности использования металлогидридов. *Альтернативная энергетика и экология*. 2005. No. 12. С. 14–37.
18. Tong L, et al., Complete and reduced models for metal hydride reactor with coiled tube heat exchanger. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. Pp. 15907–15916.
19. Wu Z, et al., Improvement in hydrogen desorption performances of magnesium-based metal hydride reactor by incorporating helical coil heat exchanger. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. Pp. 16108–16121.
20. Satya Sekhar, et al., Performance analysis of cylindrical metal hydride beds with various heat exchanger options. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 645. Pp. S89–S95.

References

1. Canan, Acar, Ibrahim, Dincer, “Review and evaluation of hydrogen production options for better environment,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218, 2019, pp. 835–849.
2. Dunikov, D. O., Borzenko, V. I., Malysenko, S. P., Blinov, D. V., Kazakov, A. N., “Perspektivnye tekhnologii ispolzovaniya biovodoroda v energoustanovkakh na baze toplivnykh elementov (obzor) [Biohydrogen promising technologies in power plants based on fuel cells (review)],” *Teploenergetika - Thermal Engineering*, No. 3, 2013, pp. 48–57.
3. Pentimalli, Marzia, et al., “AB5/ABS composite material for hydrogen storage,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 4592–4596.
4. Gambini, Marco, Stilo, Tomasso, Vellini, Michela, “Hydrogen storage systems for fuel cells: Comparison between high and low-temperature metal hydrides,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 2019, pp. 15118–15134.
5. Corgnale, Claudio, Hardy, Bruce J., Anton, Donald L., “Structural analysis of metal hydride-based hybrid hydrogen storage systems,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 14223–14233.
6. Shinichi, Miura, Akitoshi, Fujisawa, Masayoshi, Ishida, “A hydrogen purification and storage system using metal hydride,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 2794–2799.
7. Bhourri, M., Linder, M., Bürger, I., “Metal hydride reactor for dual use: Hydrogen storage and cold production,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, 2018, pp. 23357–23371.
8. Liang, Tong, et al., “Thermal management of metal hydride hydrogen storage reservoir using phase change materials,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 2019, pp. 21055–21066.
9. Stamatakis, Emmanuel, et al., “Metal hydride hydrogen compressors: Current developments & early markets,” *Renewable energy*, No. 127, 2018, pp. 850–862.
10. Ye, Tao, et al., “Electrochemical compressor driven metal hydride heat pump,” *International Journal of Refrigeration*, No. 60, 2015, pp. 278–288.
11. von Colbe J, Bellosta, et al., “Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 2019, pp. 7780–7808.
12. Shafiee, Shahin, McCay, Mary, “Different reactor and heat exchanger configurations for metal hydride storage system - A review,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, 2016, pp. 9462–9470.

13. Bloch, J., Mintz, M. H., “Kinetics and mechanism of metal hydrides formation - A review,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 253–254, 1998, pp. 529–541.
14. Lototsky, M.V., et al., “The use of metal hydrides in fuel cell applications,” *Progress in Natural Science: Materials International*, No. 27, 2017, pp. 3–20.
15. Gopal, M. Ram, Srinivasa, S., “Murthy Experiments on a metal hydride cooling system working with ZrMnFe/ MmNi_{4.5}Al_{0.5} pair,” *International Journal of Refrigeration*, Vol. 22, 1999, pp. 137–149.
16. Dunikov, D., et al., “Biohydrogen purification using metal hydride technologies,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 2016, pp. 21787–21794.
17. Tarasov, B. P., et al., “Metody hranenija vodoroda i vozmozhnosti ispol'zovaniya metallogidridov,” *Al'ternativnaya energetika I ekologiya*, No. 12, 2005, pp. 14–37.
18. Tong, L, et al., “Complete and reduced models for metal hydride reactor with coiled tube heat exchanger,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 2019, pp. 15907–15916.
19. Wu Z, et al., “Improvement in hydrogen desorption performances of magnesium-based metal hydride reactor by incorporating helical coil heat exchanger,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, 2016, pp. 16108–16121.
20. Sekhar, B. Satya et al., “Performance analysis of cylindrical metal hydride beds with various heat exchanger options,” *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 645, 2015, pp. S89–S95.

Статья поступила в редакцию 27 августа 2020 г.