

УДК: 661.8

DOI: 10.53403/9785951505378_2023_165

Выбор оптимальной геометрии дисков для теплопереноса в системах металлгидридного хранения водорода

**В. Н. Кудияров, Е. С. Пушилина, Р. Р. Эльман,
Н. Е. Курдюмов**

Национальный исследовательский
Томский политехнический университет,
г. Томск

rrel@tpu.ru

Важнейшей задачей для усовершенствования свойств металлгидридных реакторов и осуществления контроля процессов сорбции и десорбции водорода является повышение теплопереноса в металлгидридной засыпке. Эффективный теплоперенос в металлгидридной засыпке можно обеспечить за счет добавления теплообменника с теплопередающими элементами, такими как ребра или диски. Однако при проектировании металлгидридного реактора, необходимо учитывать, как эффективность теплопереноса, так и объем и массу, которые занимает теплообменник с теплопередающими элементами, в связи с чем возникает вопрос определения его оптимальной геометрии.

В данной работе с помощью методов численного моделирования рассмотрено несколько вариантов теплопередающих элементов (дисков) для U-образного теплообменника. Были рассмотрены конфигурации, включающие 1, 3 и 5 сплошных дисков без отверстий; дисков с шестью отверстиями; а также дисков с большим количеством отверстий разных геометрических размеров (дисков сложной геометрии). Было определено, что для выбранных размеров металлгидридного реактора средняя температура засыпки LaNi_5 больше зависит от количества дисков, чем от их геометрических параметров. Для выбранного баллона было определено, что изменения в средней температуре засыпки минимально варьировались при установке одинакового количества сплошных дисков, дисков с отверстиями или дисков сложной геометрии. Однако, сравнение выбранных геометрий дисков показало, что три диска с большим количеством отверстий разных геометрических размеров соответствует оптимальному решению с точки зрения соотношения объема, занимаемого в металлгидридном реакторе, и средней температуры металлогидридной засыпки. Также была проведена экспериментальная верификация полученных результатов на изготовленном металлгидридном реакторе. Полученные результаты будут использоваться при моделировании геометрически более сложных теплопередающих поверхностей и разработке более комплексных моделей.

Введение

Водород – самый легкий и экологически чистый элемент, производимый с помощью возобновляемых источников энергии, вызывает интерес исследователей на протяжении уже более 30 лет в качестве эффективного альтернативного энергоносителя. По мере углубления исследований водородная энергия применялась в авиации и космонавтике, оборонной промышленности, а также в качестве энергоносителя в транспортных средствах на топливных элементах. В этом контексте водород стал перспективным вариантом из-за своей высокой теплотворной способности, возможности использования в топливных элементах и отсутствия негативного воздействия на окружающую среду. Однако, так как водородная энергетическая система представляет собой большую и сложную инженерную систему, включающую производство, хранение и применение водорода, то реализация подобной системы связана с рядом затруднений. Одной из ключевых проблем для крупномасштабного применения водорода является реализация безопасного и эффективного хранения и транспортировки водорода. Несмотря на недостатки хранения водорода в сорбированном виде, гидриды металлов можно рассматривать как один из наиболее перспективных, безопасных и эффективных способов хранения водорода [1, 2]. Они демонстрируют хорошие свойства при низких давлениях, а их объемная плотность сравнима с жидким водородом. Именно этими преимуществами объясняется все большая актуальность применения гидридов металлов в качестве материалов для хранения водорода в настоящее время.

В металлгидридном баллоне во время сорбции водорода металлгидридной засыпкой выделяется большое количество тепла, а в процессе десорбции водорода происходит поглощение тепла. Такие тепловые эффекты во время гидрирования/дегидрирования оказывают значительное влияние на производительность металлгидридного баллона. Кроме того, плохая теплопроводность металлгидридной засыпки значительно замедляет процесс и увеличивает время зарядки/разрядки баллона. Поэтому реализация эффективного теплопереноса в металлгидридной засыпке позволяет значительно улучшить характеристики металлгидридного баллона. К известным способам повышения теплопереноса относится применение пенометаллов, компактов (спрессованного гидридообразующего материала совместно с материалами с высокой теплопроводностью), теплообменников, а также материалов с фазовыми переходами.

Пенометаллами называются неупорядоченные матрицы из губчатого материала, характеризующиеся большой площадью поверхности, низкой плотностью (пористость >90–95 %) и хорошей теплопроводностью. Laurencelle F. и Goyette J. в своей работе [3] с помощью методов численного моделирования продемонстрировали, что эффективная теплопроводность засыпки LaNi_5 может достигать около 10 Вт/(м·К) при добавлении пеноалюминия. Преимуществами пенометаллов являются относительная простота изготовления неупорядоченной матрицы, ее легковесность, а также ее равномерное распределение по всему объему металлгидридной засыпки. При этом пенометаллы могут использоваться для улучшения теплопереноса в совокупности с теплообменниками [5].

Прессования металлгидридной засыпки является еще одним способом, повышающим повысить эффективность теплопереноса и ускоряющим процессы сорбции/десорбции. Обычно к спрессованному материалу добавляются материалы с высокой теплопроводностью, такие как терморасширенный графит, углеродные нанотрубки или порошки меди/олова. Согласно работам Kim K. J. et al. [5] и Chaise A. et al. [6], компакты с терморасширенным графитом позволяют повысить теплопроводность металлгидридной засыпки на основе LaNi_5 или MgH_2 в 6–7 раз. Преимуществами компактов являются возможность контроля пористости и плотности упаковки засыпки, что позволяет улучшить теплопередачу между частицами металлгидрида и повысить удобство планирования расположения компактов в необходимой конфигурации металлгидридного баллона.

Материалы с фазовым переходом представляют собой класс веществ, которые высвобождают/поглощают достаточное количество энергии при фазовом переходе, что применяется для эффективного охлаждения или подвода тепла. Данные материалы могут использоваться как разделяющие прокладки между металлгидридными компактами или как внешняя оболочка, обеспечивающая теплоперенос к корпусу металлгидридного баллона.

Несмотря на наличие множества инструментов повышения теплопереноса в металлгидридной засыпке, применение теплообменников является самым распространенным способом решения проблем теплопереноса в металлгидридных баллонах благодаря простоте и эффективности. Конструкция цилиндрических баллонов позволяет как оптимизировать количество трубок, так и подобрать определенное строение теплопередающих элементов. В связи с этим существуют обширные исследования, связанные с подбором конфигурации теплообменника [7, 8]. Неоспоримыми преимуществами теплообменников является гибкость и большая вариативность геометрий, конструирование внешних/наружных теплообменников, а также возможность подачи через трубки теплообменника как нагревающей, так и охлаждающей жидкости.

Таким образом, параметром, играющим решающую роль в работе металлгидридного баллона, являются геометрические параметры теплообменника и дизайн теплопередающих элементов. Тем не менее, конструкция теплообменника должна быть оптимизирована с учетом занимаемого теплообменником объема и веса металлгидридного баллона. Так как для проверки каждой конфигурации создавать баллон экономически затратно, распространенными способами оценки влияния конфигурации металлгидридного баллона, свойств теплопереноса и эффективности дизайна теплообменника являются методы численного моделирования.

В данной работе рассмотрены варианты дизайна внутреннего теплообменника с точки зрения свойств теплопередачи к засыпке LaNi_5 с помощью программного обеспечения для анализа на основе вычислительной гидродинамики Ansys Fluent.

Материалы и методы

Оценка теплопередачи от разработанных теплообменников с различными теплопередающими элементами (дисками) к засыпке LaNi_5 осуществлялась в аналитической среде для моделирования Ansys Fluent®. Основным преимуществом этого конечно-элементного подхода является возможность легко адаптировать модель к различной геометрии реактора, что позволяет получить точную конструкцию. Моделирование выполнялось для металлгидридного баллона с засыпкой LaNi_5 . Для упрощения моделирования из геометрической модели были исключены крепежные изделия, фланцевые соединения и фитинги для труб. Модель металлгидридного баллона с засыпкой создавалась с использованием универсального CAD-редактора Ansys Design Modeler. Геометрические размеры и параметры модели были выбраны оптимальными для хранения небольшого количества водорода до 150 л. Длина упрощенного металлгидридного баллона составляла 122 мм, ширина 38 мм, толщина стенок 3 мм. Вода рассматривалась как теплоноситель, протекающий через медную U-образную трубу. Внешний диаметр медной трубки 4,3 мм, внутренний диаметр 3,2 мм. Материал корпуса металлгидридного баллона – нержавеющая сталь, материал теплообменника с дисками – медь. Параметры используемых материалов представлены в таблице.

Параметры материалов, используемых в модели металлгидридного баллона

Параметр	LaNi_5	Сталь	Медь	H_2	Вода
Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	8300	8030	8978	0,08189	998,2
Удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	419	502,48	381	14283	4182
Теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	2,5	16,27	387,6	0,1672	0,6
Начальная температура, K	298	298	298	298	353 (на входе)

Предполагалось, что внешние стенки бака были теплоизолированы и конвективный теплообмен между баллоном и окружающей средой не происходил. Также для упрощения модели было предположено, что изменения давления внутри бака незначительно и никак не влияет на изменение температуры в засыпке порошка LaNi_5 и что температура теплоносителя постоянна на входе. Так как основной целью было изучение влияния геометрии теплопередающих поверхностей (дисков) на температуру засыпки LaNi_5 , изменение температуры при химических взаимодействиях не учитывалось. Граничные условия были заданы в соответствии с уравнениями, перечисленными в работе Couturier K. и др. [10]. 3D модель металлгидридного баллона представлена на рис. 1,а. Для верификации модели был создан прототип металлгидридного баллона, схема которого представлена на рисунке 1,б.

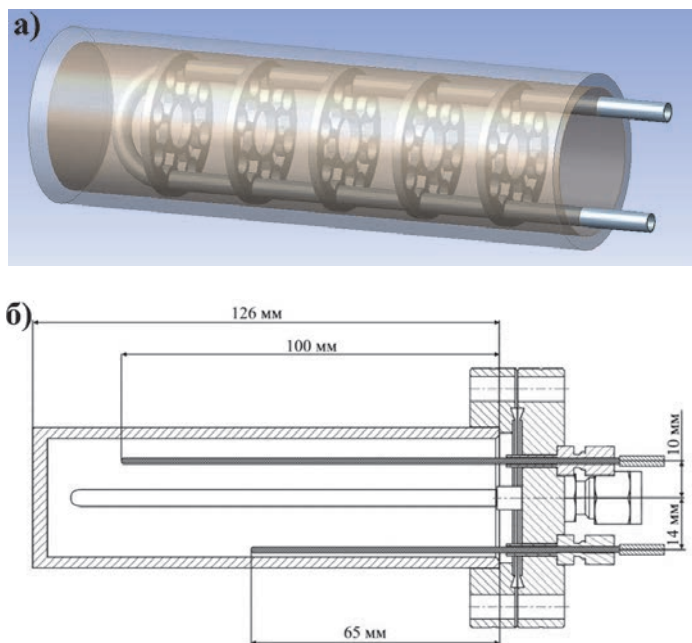


Рис.1. Упрощенная 3D модель (а) и чертеж (б) металлгидридного баллона для верификации результатов моделирования

В металлгидридном баллоне предусмотрено крепление двух термопар, находящихся на разном расстоянии от центральной оси корпуса и погруженных на разную глубину в металлгидридную засыпку. Баллон засыпался порошком LaNi_5 на 60 % (~50 г) с учетом теплового расширения материала. Предусматривалась установка U-образного теплообменника, на который надевались теплопередающие элементы в виде дисков. Было рассмотрено три геометрии: сплошной диск, диск с несколькими отверстиями (рис. 2,а) и диск со сложной геометрией (рис. 2,б). Диски располагались пропорционально длине U-образного теплообменника на равном расстоянии от конца теплообменника и друг от друга.

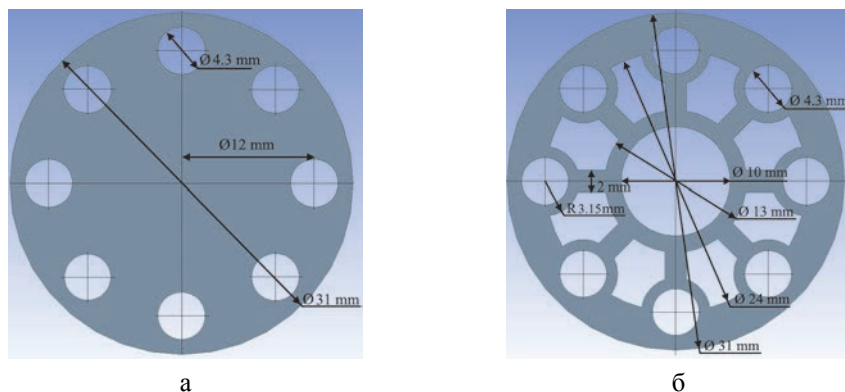


Рис. 2. Геометрия дисков; а – диск с несколькими отверстиями (два отверстия предназначены для трубки); б – диск со сложной геометрией

По сравнению с продольными ребрами, пенометаллическими конструкциями и матрицами, вышеперечисленные диски с различной геометрией отличаются простотой изготовления и расположения внутри баллона, возможностью проектирования большого количества отверстий с развитой структуре теплообменных поверхностей, универсальностью для цилиндрических металлгидридных баллонов, а также эффективностью, доказанной во многих научных работах [10, 11]. Расположение отверстий в дисках была выбрана с учетом прохождения U-образной трубки через диски, а также исходя из соображений по обеспечению высокой удельной площади теплообменной поверхности и небольшого занимаемого объема дисками. Для простоты исполнения дисков, отверстия, находящиеся близко к краям диска, были одинакового диаметра с тепловой трубкой теплообменника. Минимальная толщина самой тонкой части диска между вырезами составила 1 мм.

Прототип баллона подключался к жидкостному термостату КРИО-ВТ-01 для подачи теплоносителя с температурой до 373 К.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены температурные контуры теплообменника с разным количеством теплообменных элементов в виде сплошных дисков. Как следует из результатов моделирования, добавление одного диска в середину рабочей камеры увеличивает температуру порошковой засыпки примерно на 2 К. Добавление еще двух дисков, находящихся на равном расстоянии от центрального диска, приводит к повышению температуры засыпки на 4,7 К по сравнению с теплообменником в виде U-образной трубки без дисков. Добавление пяти дисков приводит к разнице температур засыпки до 6 К относительно теплообменника без дисков. Стоит заметить, что температура теплоносителя значительно уменьшается на изгибе трубки из-за используемых при моделировании параметров скорости потока и турбулентных течений. А незначительная разница в несколько градусов и относительно равномерный прогрев засыпки LaNi_5 объясняется небольшими размерами модели металлгидридного баллона. На рис. 4 показаны графики зависимости средней температуры слоя от времени при использовании теплообменника с разным количеством дисков и различной конфигурацией. По результатам моделирования температура слоя LaNi_5 во всех случаях превышала 342 К через 1000 с протекания теплоносителя по U-образной трубке.

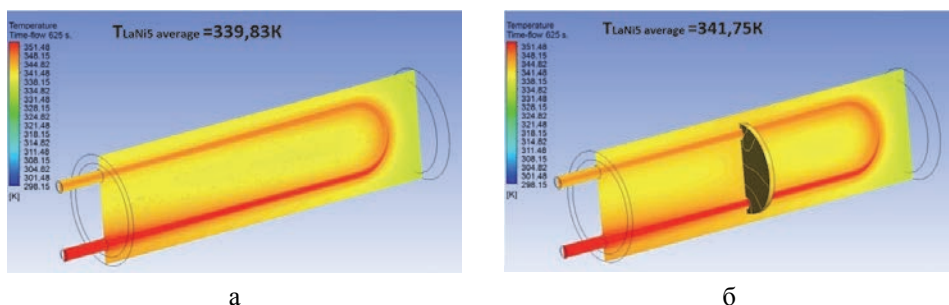
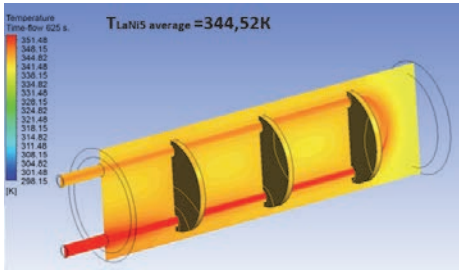
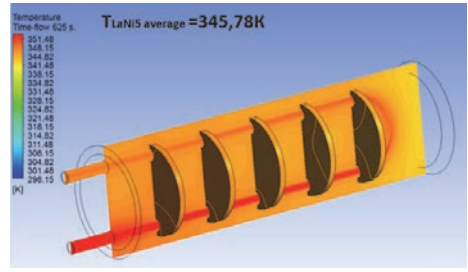


Рис. 3. Температурные контуры засыпки LaNi_5 и теплообменника: без дисков (а), с одним диском (б), с тремя дисками (в), с пятью дисками (г). Окончание см. на с. 171

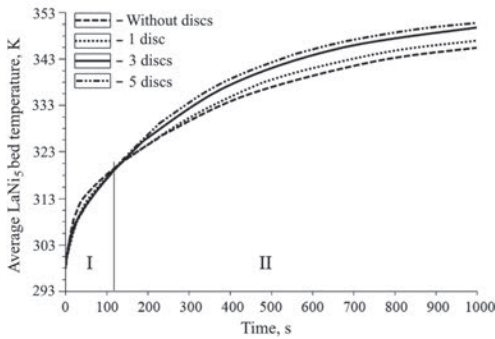


В

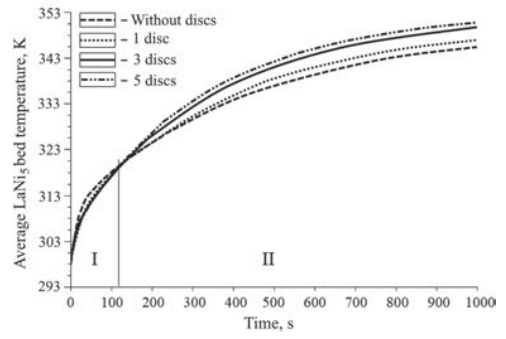


Г

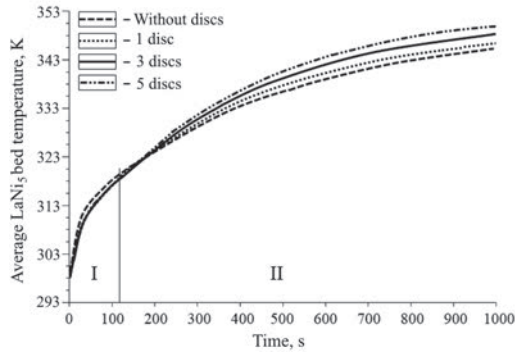
Рис. 3. Окончание



а



б



в

Рис. 4. Средняя температура засыпки LaNi_5 в зависимости от времени.

Сравнение U-образного теплообменника и теплообменника со сплошными дисками (а), дисками с отверстиями (б) и дисками сложной конфигурации (в)

Каждый из графиков на рис. 4 можно разделить на две зоны. Видно, что в первой зоне наблюдается относительно равномерная и одинаковая передача тепла от теплообменника с дисками к засыпке LaNi_5 . При этом теплообменник без дисков имеет более быструю скорость теплопередачи из-за отсутствия необходимости нагревания медных дисков. Таким образом, на начальном этапе теплообменник в виде U-образной трубки без дисков показывает лучшие характеристики, чем теплообменник с одним, тремя и пятью дисками. Однако через

110–120 с медные диски нагреваются и становятся теплопередающими поверхностями, в результате чего происходит более эффективный нагрев засыпки LaNi_5 при использовании теплообменников с дисками. Наилучший результат с точки зрения средней температуры засыпки LaNi_5 спустя 1000 с показывает теплообменник с пятью сплошными дисками. Кроме того, разница в температуре засыпки при добавлении разного количества дисков увеличивается со временем, в связи с чем можно сделать вывод, что эффективность металлгидридного баллона значительно зависит от количества теплопередающих поверхностей, и добавление трех дисков вносит больший вклад, чем добавление одного или пяти дисков.

На рис. 5 представлены температурные контуры для U-образной трубки с тремя дисками разной конфигурации, полученные через 1000 с. Из представленных данных моделирования было установлено, что выбранная геометрия медных дисков вносит небольшой вклад в изменение средней температуры металлгидридной засыпки для данных геометрических размеров металлгидридного баллона. Тем не менее разница температур между U-образным теплообменником без дисков и теплообменником с тремя дисками значительна и достигает 4,3 К. Данная разница между температурами значительна для выбранного объема металлгидридного баллона. Однако разница между температурами металлгидридной засыпки при использовании трех сплошных дисков и трех дисков сложной конфигурации соответствует всего 1,2 К. Таким образом, при таком малом диаметре металлгидридного баллона можно добиться значительно большего вклада в теплообмен между теплообменником и слоем LaNi_5 за счет увеличения количества теплообменных элементов, т. е. дисков.

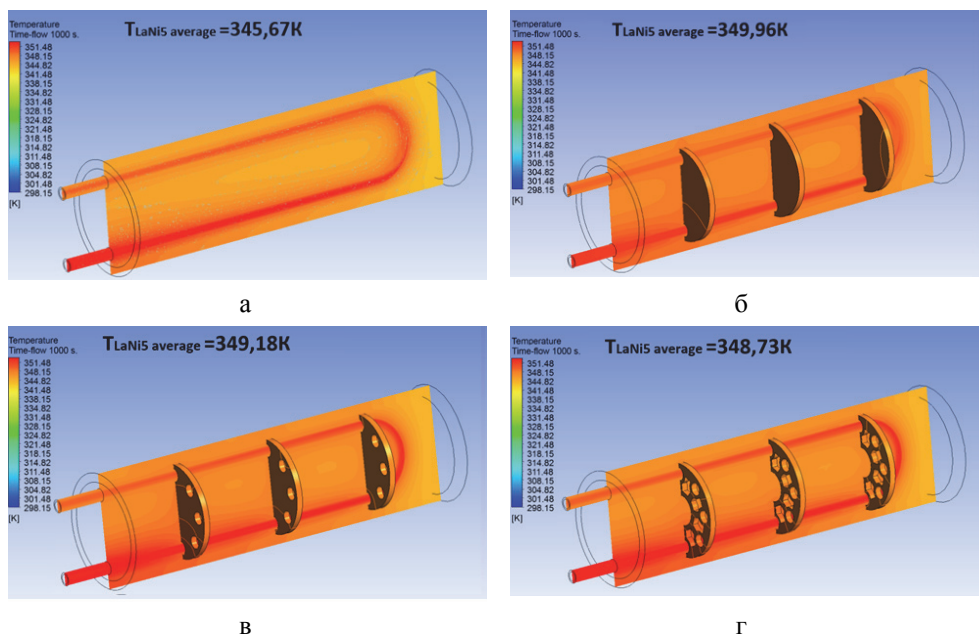


Рис. 5. Температурные контуры засыпки LaNi_5 и теплообменника: а – без дисков, б – с тремя сплошными дисками, в – с тремя дисками с отверстиями, г – с тремя дисками сложной геометрии

На данном этапе выполнения проекта критериями отбора оптимальной сборки теплообменных элементов являлись: 1) улучшение теплообмена с целью повышения скорости нагрева порошковой засыпки не менее чем на 10 %, 2) теплообменник не должен занимать более 30 % от внутреннего объема водородного аккумулятора. Поэтому, несмотря на небольшие различия в теплопередающих качествах между дисками разной геометрии, сложная геометрия имеет преимущество в отсутствие паразитного объема в металлгидридном баллоне. На рис. 6 представлен совмещенный график зависимости, демонстрирующий критерий оптимальности теплообменника с учетом занимаемого им объема в металлгидридной засыпке. Наиболее оптимальный вариант находится ближе к линии отношения объема теплообменника к объему засыпки.

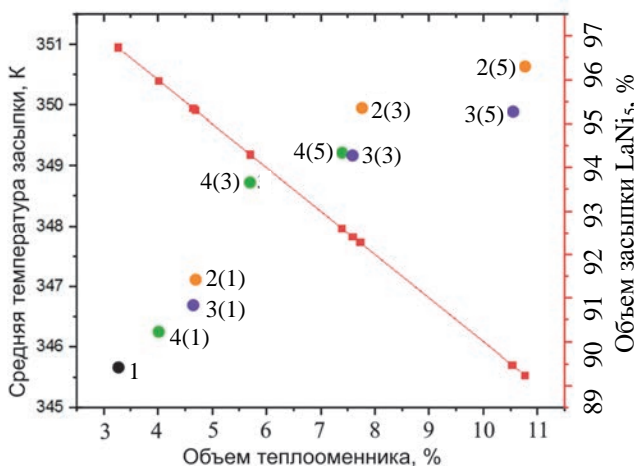


Рис. 6. Выбор оптимальной геометрии дисков для теплообменника: 1 – теплообменник без дисков, 2 – теплообменник со сплошными дисками, 3 – теплообменник с дисками с отверстиями, 4 – теплообменник с дисками сложной геометрии. Цифры в скобках обозначают количество дисков

Исходя из данного графика, наибольший объем засыпки LaNi_5 сохраняет для теплообменника в виде U-образной трубки без дисков, а наименьший объем засыпки занимает теплообменник с пятью полнотелыми дисками. Сопоставляя данные, полученные методом моделирования в среде Ansys Fluent, и рассчитанные значения объемов рассматриваемых теплообменников, наилучшим выбором для рассмотренного металлгидридного баллона является применение трех дисков со сложной геометрией. Также относительно хорошим выбором будут теплообменники с пятью дисками сложной геометрии или тремя дисками с отверстиями. Средняя температура металлгидридной засыпки спустя 1000 с протекания нагретой до 353 К воды через U-образную трубку с дисками в таком случае будет равняться примерно 349 К. Таким образом, с помощью методов моделирования показано, что три диска сложной конфигурации соответствуют оптимальному решению по объему, занимаемому в металлгидридном баллоне, и средней температуре металлгидридной засыпки.

Для проведения экспериментальных исследований и валидации разработанной модели был изготовлен прототип металлгидридного баллона, представленный на рис. 7.

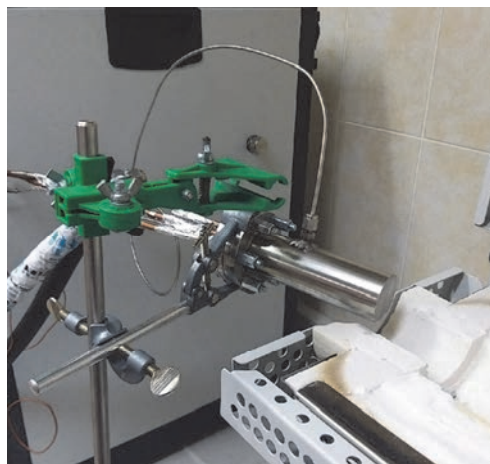


Рис. 7. Подключенный к жидкостному термостату и вакуумному посту прототип металлгидридного баллона

После вакуумной откачки баллона по U-образной трубке подавался теплоноситель, нагретый до температуры 373 К. Время пропускания теплоносителя по трубке составляло 1000 с. Температура фиксировалась двумя термопарами. Результаты отношения объема теплообменника и температуры засыпки представлены на рис. 8.

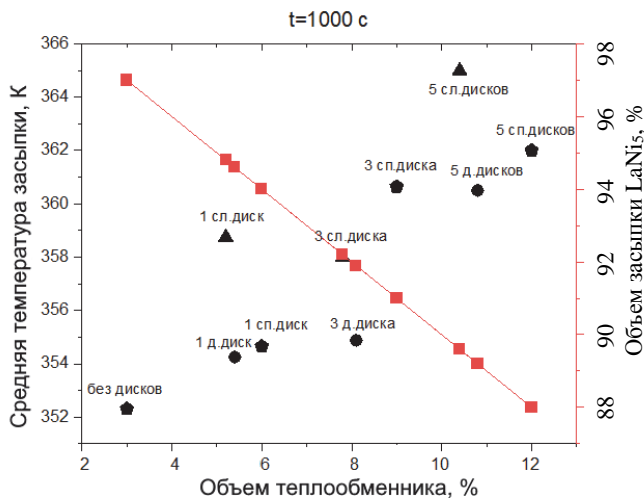


Рис. 8. Экспериментальные результаты средней температуры засыпки, соотношенные с объемом теплообменника и засыпки LaNi_5

Экспериментальные результаты для сплошных дисков и дисков с отверстиями совпадают с данными, полученными при помощи моделирования. Для

дисков со сложной геометрией экспериментальные результаты показали отклонения в сторону больших температур. Однако, согласно приведенным данным, три диска сложной геометрии считаются оптимальным, что подтверждает правильность расчетов.

Заключение

В данной работе было промоделировано изменение температуры засыпки LaNi_5 в металлгидридном баллоне в зависимости от геометрии дисков, выступающих в роли теплопередающих поверхностей. Для рассматриваемого металлгидридного баллона был разработан теплообменник в виде U-образной трубки с дисками разной геометрии. Была создана модель, позволяющая рассчитать температуру металлгидридной засыпки при добавлении теплообменника в металлгидридный баллон. В зависимости от геометрии и количества дисков была вычислена средняя температура металлгидридной засыпки через 1000 с протекания теплоносителя через U-образную трубку. Было определено, что количество дисков оказывает большее влияние на температуру засыпки по сравнению с их геометрией. Добавление дисков к U-образной трубке вызывает снижение скорости нагрева на первоначальном этапе нагрева (120 с), однако в дальнейшем позволяют значительно увеличить среднюю температуру засыпки для выбранного металлгидридного баллона. Теплообменник с пятью сплошными дисками при протекании теплоносителя через U-образную трубку в течение 1000 с показывает более высокую температуру металлгидридной засыпки по сравнению с другими конфигурациями. Показано, что три диска сложной конфигурации соответствуют оптимальному решению по соотношению средней температуры металлгидридной засыпки и объема, занимаемого теплообменником с дисками в выбранном металлгидридном баллоне. Данные результаты подтверждаются экспериментально. Таким образом, в данной работе была решена задача отработки методики улучшения теплопередачи в металлгидридной засыпке и показана эффективность применения теплопередающих поверхностей в виде дисков, что было доказано экспериментально. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейших расчетов, включающих варьирование габаритов металлгидридного баллона, материала засыпки, большего количества дисков пропорционально длине баллона, а также модели, включающих химические превращения и эффекты взаимодействия водорода с материалом засыпки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01280), а также в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

Список литературы

1. Lyu J., Lider A. M., Kudiyarov V. N. Using ball milling for modification of the hydrogenation/dehydrogenation process in magnesium-based hydrogen storage materials: an overview // *Metals*. 2019. Vol. 9, N 7. Article number 768. P. 1–25.

2. Sakintuna B., Lamari-Darkrim F., Hirscher M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32, N 9. P. 1121–1140.
3. Laurencelle F., Goyette J. Simulation of heat transfer in a metal hydride reactor with aluminium foam // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32, N 14. P. 2957–2964.
4. Bai X. S. et al. Parametric optimization of coupled fin-metal foam metal hydride bed towards enhanced hydrogen absorption performance of metal hydride hydrogen storage device // *Energy*. 2022. Vol. 243. Article number 123044. P. 14.
5. Kim K. J. et al. Metal hydride compacts of improved thermal conductivity // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2001. Vol. 26, N 6. P. 609–613.
6. Chaise A. et al. Enhancement of hydrogen sorption in magnesium hydride using expanded natural graphite // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, N 20. P. 8589–8596.
7. Kikkides E. S., Georgiadis M. C., Stubos A. K. On the optimization of hydrogen storage in metal hydride beds // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2006. Vol. 31, N 6. P. 737–751.
8. Shafiee S., McCay M. H. Different reactor and heat exchanger configurations for metal hydride hydrogen storage systems – a review // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, N 22. P. 9462–9470.
9. Couturier K. et al. Tank design for on-board hydrogen storage in metal hydrides // *Energy Sustainability*. 2008. Vol. 43192. P. 517–524.
10. Manai M. S. et al. Comparative study of different storage bed designs of a solid-state hydrogen tank // *J. of Energy Storage*. 2019. Vol 26. Article number 101024. P.11.
11. Singh A., Maiya M. P., Murthy S. S. Effects of heat exchanger design on the performance of a solid state hydrogen storage device // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40, N. 31. P. 9733–9746.