

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ВОДОРОДА  
НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*А.К. САЯДЯН, Р.Р. ЭЛЬМАН*

Томский политехнический университет

E-mail: [aks17@tpu.ru](mailto:aks17@tpu.ru)

Хранение водорода является одной из важнейших проблем широкого внедрения водородной энергетики. Существует множество исследований и разработок систем (материалов) для хранения водорода. Среди них баллоны высокого давления, хранение водорода в сжиженном состоянии, хранение водорода в различных структурах, таких как нанотрубки, в веществах (порошки металлов и их соединений), и тд. Одним из наиболее перспективных направлений является металлгидридная технология хранения водорода. Она, в отличие от тех же баллонов высокого давления, позволяет хранить большие количества водорода безопасно, так как водород в данном случае будет находиться в связанном твердофазном состоянии. Видов гидридообразующих материалов довольно много, но особого внимания заслуживает магний. Данный материал довольно дешевый, а также обладает высокой гравиметрической емкостью хранения водорода, достигающую 7,6 масс. % [1].

Но у данного материала есть и свои недостатки, например, низкая кинетика сорбции, а также высокая энергия активации реакции, что требует поддержания температур порядка (350-400) °С [2].

Для компенсации вышеобозначенных недостатков существует большое количество каталитических добавок. Например, значительное улучшение свойств Mg/MgH<sub>2</sub> показывают углеродные нанотрубки (УНТ). Было обнаружено, что композиты Mg-5 мас. % УНТ демонстрируют более быструю кинетику сорбции/десорбции водорода, чем композиты на основе Mg с другими каталитическими добавками, такими как графит или Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3].

Существует еще одна не менее важная проблема применения гидрида магния как материала-накопителя водорода, связанная с крайне низкой теплопроводностью порошка магния, порядка (0,1-1) Вт/(м·К) [4]. Задача по повышению эффективной теплопроводности внутри реактора может быть решена такими способами, как подбор эффективной конструкции теплообменника, а также добавление УНТ в состав материала-накопителя водорода. Влияние УНТ на эффективную теплопроводность слоя металлгидрида в первую очередь обусловлено превосходными свойствами теплопередачи углеродных нанотрубок [5].

В работе с помощью программного пакета COMSOL была создана модель металлгидридного баллона с внутренним нагревом, рисунок 1.

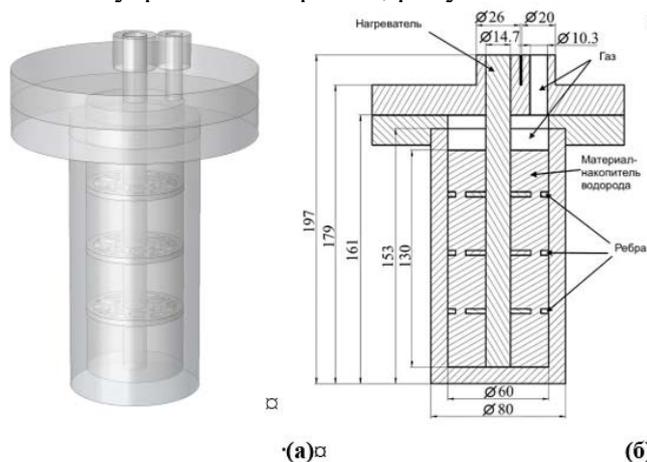


Рисунок 1 – Модель металлгидридного баллона (а), поперечное сечение металлгидридного баллона (б)

Теплообменники, представленные в работе, состоят из трубчатого электронагревателя и трех видов различных ребер, рисунок 2.

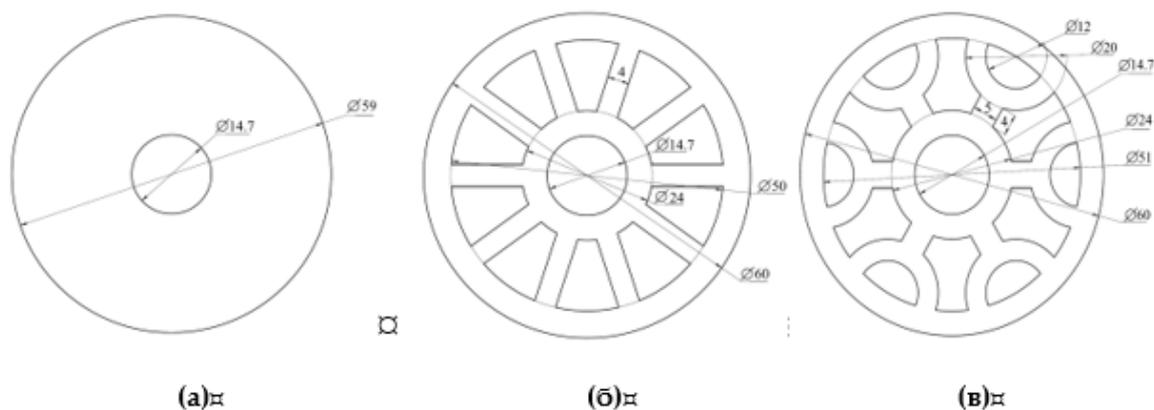


Рисунок 2 – Сплошные ребра (а), перфорированные ребра (б), сложные ребра (в)

В ходе моделирования были отобраны наиболее эффективные геометрии теплообменников, которые были использованы при моделировании металлгидридной системы с добавлением 5 масс. % УНТ, рисунок 3.

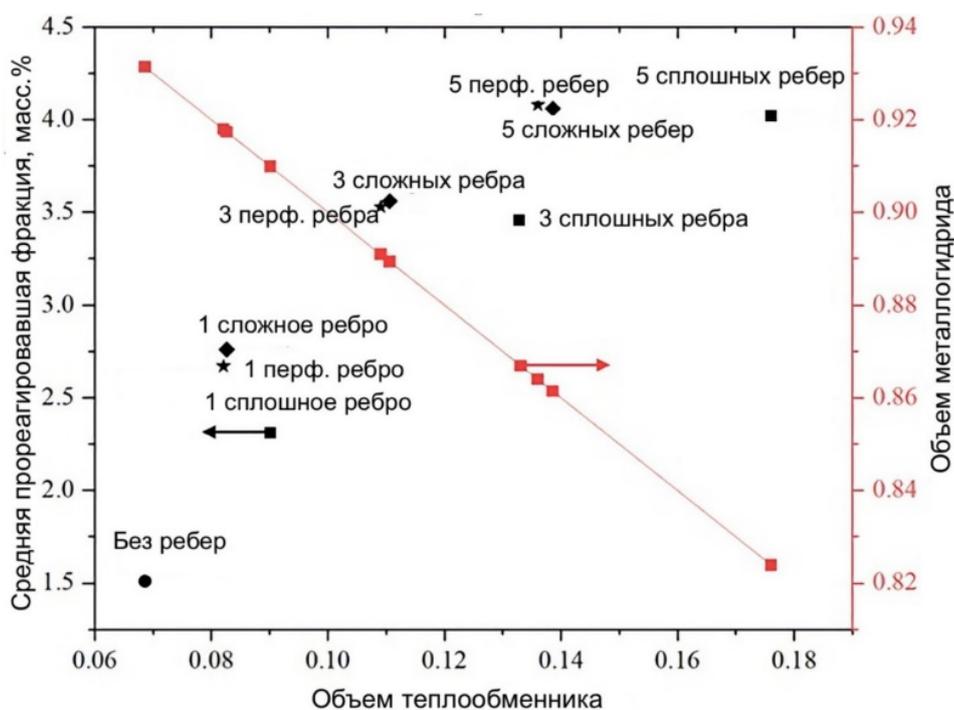


Рисунок 3 - Влияние числа и геометрии ребер на полезный объем и среднюю массовую долю прореагировавшего металлгидрида

Наибольшую эффективность показал теплообменник с 3 перфорированными ребрами. Далее данная система была использована для моделирования засыпки с 5 масс. % УНТ, рисунок 4.

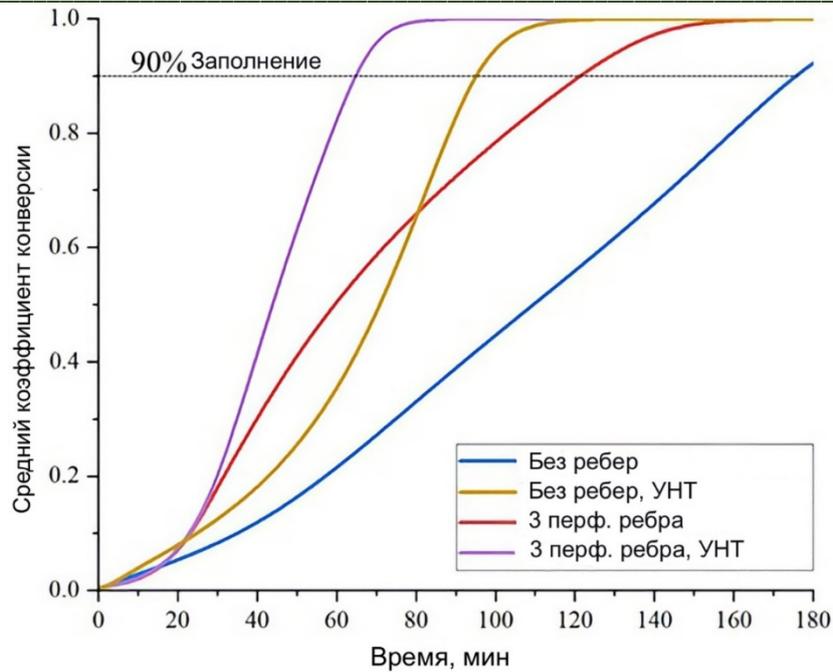


Рисунок 4 – Зависимость среднего коэффициента конверсии от времени

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что добавление 5 масс. % УНТ к порошку магнию значительно улучшило его показатели теплопроводности, даже конфигурация с нагревателем без дополнительных ребер смогла достичь 90 % заполнения за 160 минут. Однако добавление трех дополнительных ребер в реактор улучшило как нагрев, так и скорость конверсии, что привело 90% заполнению всего за 80 минут, что в два раза быстрее, чем показатель нагревателя без ребер. Таким образом, добавление углеродных нанотрубок может способствовать значительному увеличению теплопроводности слоя металлгидрида.

*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., Kudiiarov V. Using ball milling for modification of the hydrogenation/dehydrogenation process in magnesium-based hydrogen storage materials: An overview // Metals. – 2019. – Т. 9, №. 7. – С. 768.
2. Zaluska A., Zaluski L., Ström-Olsen J. O. Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage // Journal of Alloys and Compounds. – 1999. – Т. 288, №. 1-2. – С. 217-225.
3. Chen D. et al. Microstructure and hydrogen storage property of Mg/MWNTs composites // Journal of Alloys and Compounds. – 2004. – Т. 372, №. 1-2. – С. 231-237.
4. Visaria M. et al. Study of heat transfer and kinetics parameters influencing the design of heat exchangers for hydrogen storage in high-pressure metal hydrides // International journal of heat and mass transfer. – 2010. – Т. 53, №. 9-10. – С. 2229-2239.
5. Han Z., Fina A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review // Progress in polymer science. – 2011. – Т. 36, №. 7. – С. 914-944.