

УДК 661.968

**А.В. ПОПОК**, аспирант ИПМаш НАНУ, г. Харьков

**А.И. ИВАНОВСКИЙ**, канд. техн. наук; с.н.с. ИПМаш НАНУ, г. Харьков

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СЛОЕ МЕТАЛЛОГИДРИДА С ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ МАТРИЦЕЙ

Для экспериментального дослідження тепломасопереносу в шарі металогідріда з теплопередаючою матрицею спроектована та виготовлена фізична модель – експериментальний металогідрідний модуль (ЕММ). Виміряно температурні поля та витратні характеристики. Встановлено залежність часу десорбції водню від температури теплоносія.

For the experimental study heat and mass transfer in a layer of metal hydride with the heat transfer matrix was designed and made the physical model – experimental metalhydride module (EMM). The temperature fields and spent characteristics were measured. It is shown the time dependence of hydrogen desorption from coolant temperature.

**Введение.** Металлогидридный метод хранения, очистки и сжатия водорода характеризуется высокой компактностью, безопасностью и относительно не высокими энергозатратами [1, 2]. Исследования металлогидридной технологии расширяют круг надежных, доступных и относительно недорогих систем хранения, очистки и сжатия водорода, отвечающих требованиям конкретных технических задач [3].

**Анализ результатов последних исследований и публикаций.** Серьезным препятствием на пути создания высокоэффективной металлогидридной техники является свойственный всем известным гидридообразующим материалам, находящимся в мелкодисперсном состоянии, низкий коэффициент теплопроводности (0,5–1,3 Вт/(м·К)) [4]. В связи с этим имеется острая необходимость интенсификации процессов переноса тепла в металлогидридах.

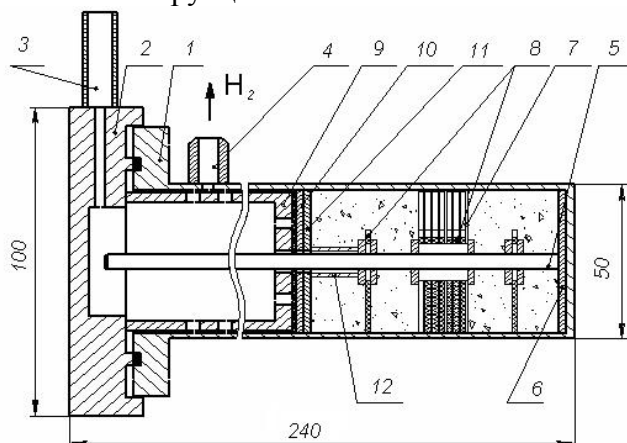
Увеличение коэффициента теплопроводности дисперсного слоя металлогидрида (МГ) достигается различными способами. Наиболее перспективным является использование внутреннего пакета оребрения из тонких поперечно установленных пластин, выполненных из материала высокой теплопроводности [5]. Такая конструкция позволяет, варьируя толщиной пластин и частотой их установки, влиять на динамику сорбционных процессов в широком диапазоне.

**Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы.** В ранее опубликованных работах основное внимание уделялось исследованию интегральных характеристик металлогидридных систем, таких как массовый расход водорода, средний коэффициент теплопроводности и т.д. а также расчетно-теоретическим исследованиям [6, 7]. В то время как вопросу детального опытного исследования механизма увеличения теплопроводности слоя металлогидрида было уделено недостаточно внимания.

**Постановка задачи.** Из вышесказанного следует необходимость создания физической модели для опытного исследования механизмов интенсификации тепломассопереноса в мелкодисперсном слое МГ с теплопередающей матрицей в процессе сорбции-десорбции водорода.

**Методика исследования.** Для экспериментального исследования тепломассопереноса в слое металлогидрида с теплопередающей матрицей была спроектирована и изготовлена физическая модель – экспериментальный металлогидридный модуль (ЭММ).

Конструкция ЭММ схематично показана на рисунке 1.



- 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок; 4 – штуцер;  
5 – штюк; 6 – шайба штюка; 7 – пластина оребрения;  
8 – проставки; 9 – стакан; 10 – фильтрующая прокладка; 11 – разделительные шайбы;  
12 – дистанцирующая втулка

Рис. 1. Конструкция ЭММ

Исследовательский блок представляет собой пакет теплопроводящих пластин



Рис. 2. Пластина оребрения



Рис. 3. Проставка

поперечного оребрения 7 (рис. 2) в количестве 7 шт., дистанцированных друг от друга на расстоянии 3 мм проставками 8 (рис. 3). Пластины оребрения были выполнены из медной фольги толщиной 0,2 мм и имели наружную отбортовку для обеспечения механического контакта с внутренней поверхностью корпуса. На средней пластине закреплены три термпары ХА на радиусах 17 и 11 мм, а также на радиусе 23 мм, что соответствует внутреннему радиусу корпуса. Термпары изготовлены из проволоки диаметром 0,2 мм, на пластине фиксируются при помощи пайки. На одной из проставок, расположенной в середине пакета оребрения, закреплены две термпары для измерения температуры на радиусах 17 и 11 мм межреберного пространства.

С обеих сторон пакета на удалении 15 мм располагались аналогичные проставки с термпарами на радиусах 11 и 17 мм. Они были предназначены для измерения температуры вдали от оребренной зоны.

Все элементы исследовательского блока фиксировались на несущем штюке с помощью гаек. Общий вид блока показан на рис. 4.

Конструктивно ЭММ представлял собой цилиндрический корпус из нержавеющей стали, изготовленный из трубы  $\text{Ø}50 \times 2$  мм с фланцем 1. На корпусе расположен штуцер 4 с резьбой M12×1 для отбора и подачи водорода. Герметизация обеспечивалась с помощью крышки 2, имеющей патрубок 3 для вывода термопарных проводов. Вдоль оси расположен штюк 5, выполненный из шпильки с резьбой M5. На конце штюка закреплена круглая пластина 6, которая центрирует штюк и выполняет роль поршня, позволяющего не повреждая термпары извлекать содержимое модуля при разборке. Штюк 5 является несущим элементом для исследовательского блока.

Собранный и оснащенный вентилем модуль изображен на рис. 5.

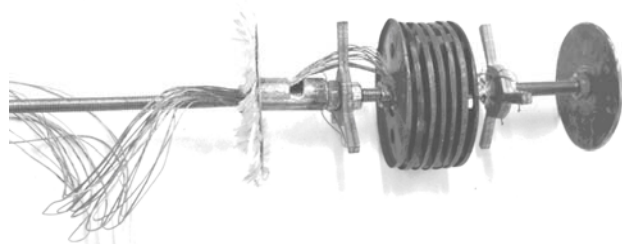


Рис. 4. Исследовательский блок

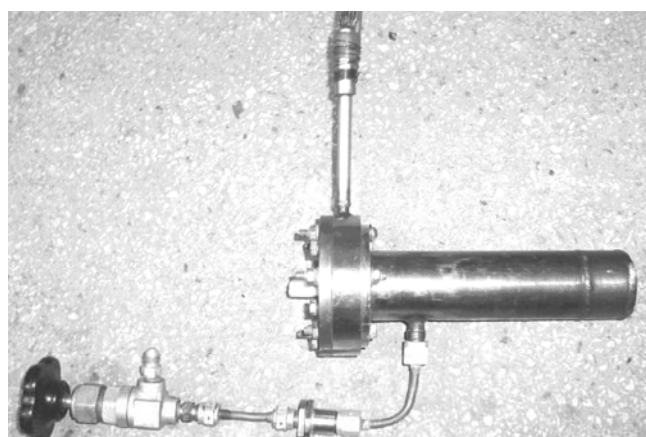


Рис. 5. Экспериментальный металлгидридный модуль в сборе

Методика получения экспериментальных данных при исследовании тепломассопереноса в слое металлгидрида, включала в себя активацию гидридообразующего материала, этап подготовки (ЭММ) к рабочему циклу и эксперимент с регистрацией необходимых данных.

Активация была проведена путём помещения экспериментального металлгидридного модуля, заполненного гидридообразующим материалом  $\text{LaNi}_5$ , в печь и прогрева до температуры 550–570 К одновременно с вакуумированием до  $5 \cdot 10^{-2}$  мл. рт. ст. Затем сорбент насыщался водородом при давлении 3 МПа. Первый цикл «сорбция-десорбция» показал ёмкость по водороду 1,23 % (82 % максимальной теоретически возможной ёмкости [8]), что является достаточным для заключения о том, что этап активации был выполнен успешно.

Подготовка заключалась в обеспечении одной и той же степени насыщенности сорбента перед началом эксперимента. Стабильность исходной концентрации водорода в металлгидриде обеспечивалась осуществлением сорбции до заданного давления, равновесного одному и тому же значению температуры в «холодном» термостате. На заключительной стадии экспериментов осуществлялась десорбция водорода при температуре 150–170 °С (в печи). Это позволяло определять начальное содержание водорода в металлгидриде.

Эксперимент начинался с момента погружения ЭММ в термостат, температура теплоносителя в котором варьировалась в различных экспериментах и составляла 333, 348 и 363 К.

Десорбция проводилась при поддержании внутри ЭММ (над металлгидридом) заданного постоянного давления  $P$ . Этим имитировался процесс подачи сжатого водорода потребителю при постоянном давлении. Одновременно осуществлялось термометрирование и измерение расхода газа.

**Результаты исследования.** На рис. 6 представлены результаты одного из экспериментов.

Кривые изменения температуры, обозначенные цифрами 1, 2, 3 соответствуют термопарам установленным на теплопроводящем элементе соответственно на радиусах 23, 17 и 11 мм; цифрами 4, 5 – соответствующие термопарам, установленным в межрёберном пространстве на радиусах 17 и 11 мм; цифрами 6, 7 – соответствующие термопарам установленным в зоне не содержащей элементы интенсификации теплообмена. Кривая под номером 8 соответствует показаниям термопары

дополнительно установленной на внешней стороне корпуса для более точного определения теплового воздействия теплоносителя на корпус ЭММ.

Температурные поля в экспериментах при других температурах принципиальных отличительных аспектов не имеют, отличаясь лишь временным масштабом характерных стадий термосорбционного процесса.

На основании анализа полученных результатов была установлена зависимость времени десорбции водорода в зоне содержащей элементы интенсификации теплообмена от температуры теплоносителя.

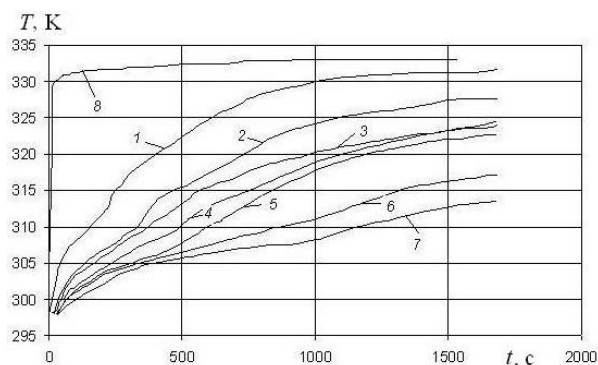


Рис. 6. Температурное поле в эксперименте при температуре 333 К

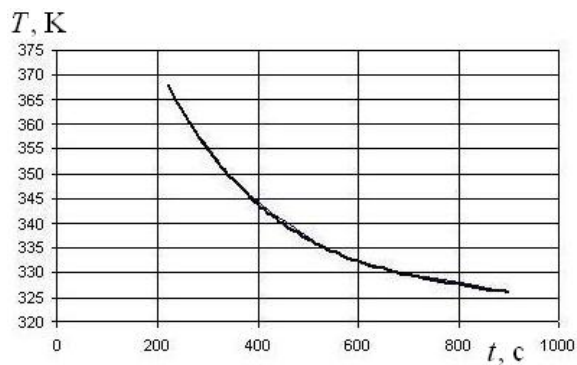


Рис. 7. Зависимость времени десорбции от температуры теплоносителя

**Выводы.** В результате проведенных экспериментов измерены температурные поля и расходные характеристики, позволяющие более полно представить механизм теплопереноса и установить локальные значения температуры, которые представляют значительный интерес при определении тепловых потерь на разных стадиях термосорбционного процесса, что необходимо для разработки конструкций металлгидридной техники.

**Список литературы:** 1. Соловей В.В. Применение термосорбционных компрессоров для компримирования водорода / В.В. Соловей, А.И. Ивановский, Н.А. Черная // Водородная энергетика будущего и металлы платиновой группы в странах СНГ: Сб. материалов и документов 6 междунар. симпозиума 5-6 ноября 2009 г. – М., 2009. – С. 79-92. 2. Тарасов Б.П. Водородная энергетика – прошлое, настоящее, виды на будущее / Б.П. Тарасов, М.В. Лотоцкий // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 1, №6. – С. 5-18. 3. Соловей В.В. 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. 4. Тарасов Б.П. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода / Б.П. Тарасов, М.В. Лотоцкий, В.А. Яртысь // Российский химический журнал. – 2006. – Т. 1, № 6. – С. 34-48. 5. Соловей В.В. Технологические аспекты создания металлгидридных элементов теплоэнергетических установок с заданными теплофизическими характеристиками / В.В. Соловей, М.В. Лотоцкий, Ю.Ф. Шмалько, Н.А. Чёрная // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: ХАИ. – 2000. – Вып. 21. – С. 100-103. 6. Соловей В.В. Расчётно-теоретическое исследование десорбции водорода в металлгидридах / В.В. Соловей, Н.А. Чёрная // Сб. трудов ИПМаш: Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. – Харьков. – 2003. – Т. 1 – С. 259-264. 7. Соловей В.В. Повышение эффективности водородных термосорбционных компрессоров / В.В. Соловей // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2005. – Т. 2, № 2 – С. 98-101. 8. Шпильрайн Э.Э. Введение в водородную энергетику / Э.Э. Шпильрайн, С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.

© Попок А.В., Ивановский А.И., 2011  
Поступила в редколлегию 21.12.10