

AN OVERVIEW OF HYDROGEN STORAGE METHODS

Yartys V.A.* and Lototsky M.V.¹

Institute for Energy Technology P.O.Box 40, N-2027, Kjeller, Norway

¹ Institute for Problems of Materials Science of NAS of Ukraine, lab. # 67,
3, Krzhizhanovsky str., Kiev, 03142 Ukraine

Hydrogen is an attractive universal energy carrier. It is environment-friendly substance, and hydrogen-based processes of energy conversion are very flexible and efficient. Technologies of different-scale hydrogen production are commercially available enough and have practically unlimited resources of raw materials. However, the low density of hydrogen gas, low liquefaction temperature and, also, high explosion risk in combination with negative hydrogen influence on the properties of design materials pose the problems of the development of effective and safe hydrogen storage systems as the most actual ones. Namely these problems suppress now the development of hydrogen energy and technology.

The report reviews the existent and perspective hydrogen storage methods, follows the dynamics of their development since 1985 up to now.

According to classification of the US Department of Energy (DOE [1]), hydrogen storage methods can be separated into two groups.

The first group includes **physical** methods, which use physical processes (mainly, compression or liquefaction) to compact hydrogen gas. Hydrogen stored by physical methods consists of H₂ molecules weakly interacting with storage environment. Up to now the following physical storage methods are available:

- Compressed hydrogen gas:
 - gas cylinders;
 - stationary bulk storage systems, including underground reservoirs;
 - storage in pipelines;
 - glass micro-spheres.
- Liquid hydrogen: stationary and mobile cryogenic tanks.

Chemical (or **physico-chemical**) methods use the physical and chemical processes of hydrogen interaction with some materials to provide hydrogen storage. They are characterized by strong interaction of molecular or atomic hydrogen with the storage material. Chemical methods of hydrogen storage mainly include:

- Adsorption:
 - zeolites and related compounds;
 - activated carbon;
 - carbon nanomaterials.
- Bulk absorption (metal hydrides)
- Chemical interaction:
 - alanates;

- fullerenes and organic hydrides;
- ammonia;
- sponge iron;
- Al- and Si- based water-reacting alloys.

The relations between weight and volume hydrogen storage capacities for some hydrogen storage methods are shown in Fig.1. The target values of these characteristics for mobile applications according to the criteria of the DOE Hydrogen Program [1] are also shown here. The main problem of a majority of the methods is the necessity of improvement of weight or volumetric capacity of a hydrogen storage system.

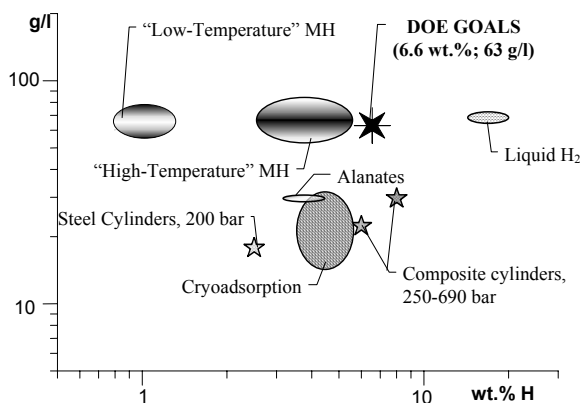


Fig.1.

The other problem is too high energy consumption to provide hydrogen compression, its cooling or heating of the storage environment. The typical values of the energy consumption which are necessary for realization of a number of hydrogen storage methods are shown in Fig.2.

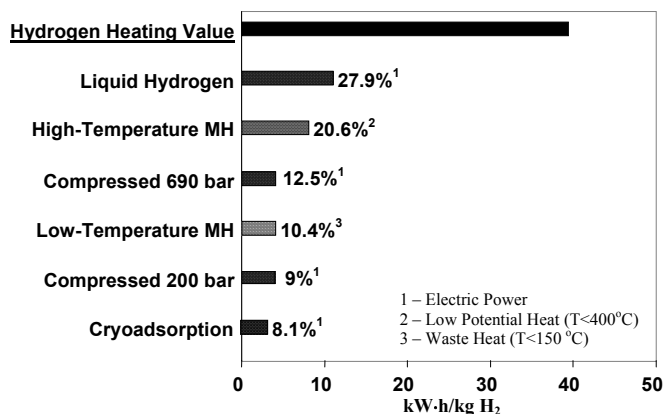


Fig.2.

* volodymyr.yartys@ife.no

A detailed comparative analysis of hydrogen storage alternatives has been carried out by a number of authors. The typical recommendations for the applications of the different storage methods, according to Volvo Company [2], are the following:

- Underground reservoirs and moderate-pressure chambers are recommended for seasonal stationary energy storage;
- High-pressure composite cylinders are the best solution in the transport applications with large carrying capacity (buses, trucks, ferries);
- Cryogenic high-pressure vessels and methanol reformers are recommended in the smaller-scale transport applications (cars, tractors);
- Cryogenic low-pressure vessels (liquid hydrogen) are the best solution for the use in aviation and space applications;
- Metal hydrides are recommended for the use in the low-scale hydrogen storage units.

The analysis of the available data shows the synergy of the physical and physico-chemical methods of hydrogen storage whose combination can be prospective in a number of the specific applications. On our opinion, the most competitive

in future will be combined systems realizing together several methods of hydrogen storage and processing. The cryogenic pressure vessels, a combination of gas cylinders with the metal hydride hydrogen compressors, etc. can be examples of such advanced hydrogen storage systems.

References

1. A Multiyear Plan for the Hydrogen R&D Program. Rationale, Structure, and Technology Roadmaps.– Office of Power Delivery; Office of Power Technologies; Energy Efficiency and Renewable Energy; U.S. Department of Energy; August 1999.– 55 pp
2. Joakim Pettersson and Ove Hjortsberg. Hydrogen storage alternatives – a technological and economic assessment. – Volvo Teknisk Utveckling AB. KFB – Kommunikationsforsknings-beredningen, Stockholm. KFBs DNR 1998-0047, December 1999. – 38 pp.

ОБЗОР МЕТОДОВ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА

Яртысь В.А. *, Лотоцкий М.В.¹

Institute for Energy Technology
P.O.Box 40, N-2027, Kjeller, Norway

¹ Институт проблем материаловедения НАН Украины, лаб. № 67,
Ул. Кржижановского, 3, Киев, 03142 Украина

Привлекательность водорода как универсального энергоносителя определяется экологической чистотой, гибкостью и эффективностью процессов преобразования энергии с его участием. Технологии разномасштабного производства водорода достаточно хорошо освоены и имеют практически неограниченную сырьевую базу. Однако низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его сжижения, а также высокая взрывоопасность в сочетании с негативным воздействием на свойства конструкционных материалов, ставят на первый план проблемы разработки эффективных и безопасных систем хранения водорода – именно эти проблемы сдерживают развитие водородной энергетики и технологии в настоящее время.

В докладе приводится обзор существующих и перспективных способов хранения водорода; прослеживается динамика их развития за период с 1985 года по настоящее время.

В соответствии с классификацией Департамента энергетики США (DOE [1]), методы хранения водорода можно разделить на две группы:

Первая группа включает **физические** методы, которые используют физические процессы (главным образом, компримирование или сжижение) для перевода газообразного водорода в компактное состояние. Водород, хранимый с помощью физических методов, состоит из молекул H_2 , слабо взаимодействующих со средой хранения. На сегодня реализованы следующие физические методы хранения водорода:

- Сжатый газообразный водород:
 - газовые баллоны;
 - стационарные массивные системы хранения, включая подземные резервуары;
 - хранение в трубопроводах;
 - стеклянные микросферы.
- Жидкий водород: стационарные и транспортные криогенные контейнеры.

В **химических** (или **физико-химических**) методах хранения водорода обеспечивается физическими или химическими процессами его взаимодействия с некоторыми материалами. Данные методы характеризуются сильным взаимодействием молекулярного либо атомарного водорода с материалом среды хранения. Данная группа методов главным образом включает следующие:

- Адсорбционный:
 - цеолиты и родственные соединения;
 - активированный уголь;
 - углеродные наноматериалы.
- Абсорбция в объеме материала (металлогидриды)
- Химическое взаимодействие:
 - аланаты;
 - фуллерены и органические гидриды;
 - аммиак;
 - губчатое железо;
 - водореагирующие сплавы на основе алюминия и кремния.

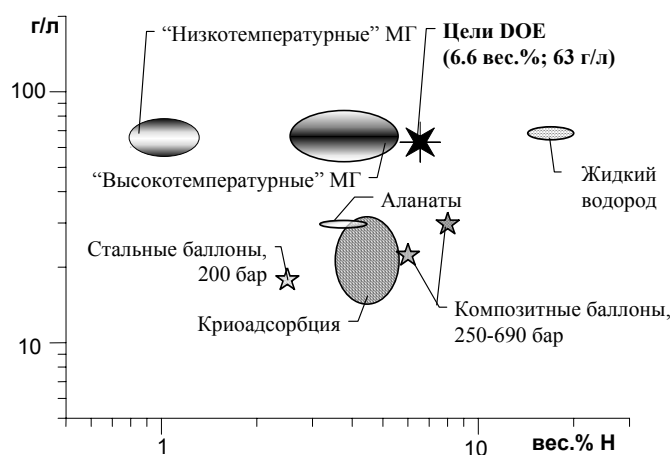


Рис. 1.

Соотношения между весовыми и объемными показателями хранения водорода для некоторых методов приведены на рис. 1. Здесь же указаны целевые значения данных характеристик для транспортных приложений, соответствующие критериям водородной программы DOE [1]. Основной проблемой большинства методов является необходимость

* volodymyr.yartys@ifef.no

улучшения весового либо объемного показателей систем хранения.

Другой проблемой являются слишком высокие энергозатраты на компримирование водорода и его охлаждение либо нагрев среды хранения. Типичные значения энергозатрат на реализацию ряда методов хранения водорода приведены на рис.2.

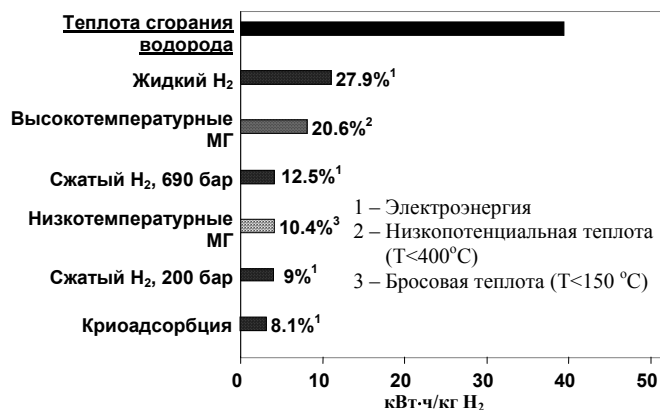


Рис. 2

К настоящему времени различные методы хранения водорода находятся на разных стадиях реализации, включая промышленно освоенные технологии (газовые баллоны, жидкий водород), пилотные и полупромышленные системы хранения (металлогидриды), а также экспериментальные разработки, технический и коммерческий потенциал которых пока остается неясным (углеродные наноматериалы и др.). За последние 15-20 лет значительный прогресс был достигнут в улучшении весовых и объемных показателей традиционных методов хранения водорода: композитных газовых баллонов давлением 350–690 бар (до 13 вес.% H), а также криогенных систем хранения жидкого водорода, весовая емкость которых достигает 20% для мобильных мелкомасштабных и превышает 50% для крупномасштабных хранилищ. Металлогидридные системы хранения водорода наиболее привлекательны в отношении безопасности и компактности и могут быть востребованы в стационарных и автономных приложениях, где весовой показатель хранения не является критичным.

Целесообразность реализации того или иного конкретного метода хранения водорода в конечном счете будет определяться его стоимостью, весовыми и объемными показателями, энергопотреблением и техническими характеристиками (например, динамикой приема и выдачи водорода)

Детальный сравнительный анализ альтернатив хранения водорода проводился многими авторами. Типичные рекомендации

(по материалам компании Volvo [2]) относительно использования методов хранения водорода в различных приложениях приведены ниже:

- Для систем сезонного стационарного хранения энергии рекомендуются подземные резервуары и другие хранилища большого объема, в которых сжатый водород находится под умеренно повышенным давлением;
- Композитные баллоны высокого давления являются лучшим решением для большегрузных транспортных приложений (автобусы, грузовые автомобили и т.п.);
- Для транспортных средств меньшей грузоподъемности (автомобили, тракторы) рекомендуются системы на основе органических гидридов (например, реформеры метанола) либо криогенные сосуды высокого давления;
- Криогенные сосуды низкого давления (жидкий водород) являются лучшим решением в авиакосмических приложениях;
- Металлогидриды рекомендуется использовать в мелкомасштабных системах хранения водорода.

Анализ имеющихся данных свидетельствует о взаимодополняемости физических и физико-химических методов хранения водорода, комбинация которых может быть перспективной в ряде конкретных приложений. По нашему мнению, наибольшую конкурентоспособность в будущем будут иметь комбинированные системы, реализующие сочетание нескольких методов хранения и переработки водорода. Примерами таких систем могут быть криогенные баллоны высокого давления, сочетание газовых баллонов с металлогидридными компрессорами водорода и т.п.

Литература

1. A Multiyear Plan for the Hydrogen R&D Program. Rationale, Structure, and Technology Roadmaps.– Office of Power Delivery; Office of Power Technologies; Energy Efficiency and Renewable Energy; U.S. Department of Energy; August 1999.– 55 pp
2. Joakim Pettersson and Ove Hjortsberg. Hydrogen storage alternatives – a technological and economic assessment. – Volvo Teknisk Utveckling AB. KFB – Kommunikationsforsknings-beredningen, Stockholm. KFBs DNR 1998-0047, December 1999. – 38 pp.