

## ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА (ПОЛУЧЕНИЕ И ХРАНЕНИЕ) Лупачев Д.А.<sup>1</sup>, Смирнов М.И.<sup>2</sup> Email: Lupachev1146@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Лупачев Дмитрий Андреевич – магистрант;

<sup>2</sup>Смирнов Максим Игоревич – магистрант,  
кафедра низких температур,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

Национальный исследовательский университет

Московский энергетический институт,

г. Москва

**Аннотация:** в настоящей статье рассмотрены основные способы получения водорода, с указанием их преимуществ и недостатков. Раскрыта проблематика методов хранения водорода, связанная с его физико-химическими свойствами. Подробно представлены наиболее перспективные способы получения и хранения водорода, в том числе весьма необычные, с указанием преимуществ дальнейших исследований в выбранных методах. Данная тематика весьма актуальна для нашей кафедры и специальности в целом, а следовательно неизбежно нуждается в углубленном изучении и тщательном анализе.

**Ключевые слова:** водород, получение водорода, хранение водорода, водородная энергетика.

## STORAGE OF HYDROGEN (RECEIVING AND STORAGE) Lupachev D.A.<sup>1</sup>, Smirnov M.I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lupachev Dmitry Andreevich – Master Student;

<sup>2</sup>Smirnov Maxim Igorevich – Master Student,  
DEPARTMENT OF POWER STATIONS,

NATIONAL RESEARCH UNIVERSITY MOSCOW POWER ENGINEERING INSTITUTE, MOSCOW

**Abstract:** in this article, we consider the main methods of obtaining hydrogen, indicating their advantages and disadvantages. The problems of hydrogen storage methods, connected with its physical and chemical properties, are disclosed. Details are presented of the most promising methods of obtaining and storing hydrogen, including very unusual ones, indicating the advantages of further research in the chosen methods. This topic is very relevant for our department and specialty in general, and therefore inevitably requires in-depth study and careful analysis.

**Keywords:** hydrogen, hydrogen production, hydrogen storage, hydrogen energy.

УДК 542.76; 662.769.2

Водород как универсальный энергоноситель издавна привлекает своей экологической чистотой, гибкостью и эффективностью процессов преобразования энергии с его участием. На сегодняшний день достаточно хорошо освоены технологии производства водорода различных масштабов, имеющие практически неограниченную сырьевую базу. Однако подавляющая часть физических и химических свойств водорода значительно препятствуют развитию водородной энергетики. К числу таких свойств относятся: низкая плотность газообразного водорода, низкая температура его ожижения, высокая взрывоопасность в сочетании с негативным воздействием на свойства конструкционных материалов [1].

Стадия хранения водорода представляет собой промежуточное звено в его жизненном цикле от стадии производства до потребления. Одной из особо значимых технологических проблем водородной энергетики является разработка наиболее эффективных и наиболее экономичных способов хранения водорода.

Как правило, водород хранят в трех агрегатных состояниях: сжиженном, абсорбированном или сжатом. Основными проблемами, требующими решения при разработке технологий хранения водорода, сводятся к обеспечению их безопасности и рентабельности, что непосредственно связано с химическими и физическими свойствами водорода.

К наиболее распространенным физическим методам хранения водорода [2,3], использующим физические процессы (компрессирование и ожижение) для перевода газообразного водорода в компактное состояние, относятся: для сжатого газообразного водорода – газовые баллоны, стационарные массивные системы хранения (подземные резервуары), хранение в трубопроводах, стеклянные микросферы; для жидкого водорода – стационарные и транспортные криогенные контейнеры.

К наиболее распространенным химическим методам хранения водорода [2,3], которые обеспечиваются физическими или химическими процессами его взаимодействия с материалами, относятся: адсорбционный – цеолиты и родственные им соединения, активированный уголь, углеводородные наноматериалы; абсорбция в объеме материала (металлогидриды); методы на основе

химического взаимодействия с алонатами, фуллеренами и органическими гидридами, аммиаком, губчатым железом, водореагирующими сплавами на основе алюминия и кремния.

Прежде чем углубиться в подробное рассмотрение перспективных методов хранения водорода, изучим основные методы его получения:

- электролиз
- реформинг
- газификация
- термохимические циклы
- биологическое производство.

Получение водорода путем разложения воды при действии на нее электрическим током называется *электролиз*. Преимуществами этого метода получения являются: устоявшаяся и коммерчески доступная технология; детально изученный промышленный процесс, удобный для получения водорода от воспроизводимых источников энергии (например, солнечной), компенсирует периодическую природу некоторых источников возобновляемой энергии; высокая чистота конечного продукта. Однако данный метод осуществляется с высокими энергозатратами и существует конкуренция с прямым использованием возобновляемой электроэнергетики [3].

Следующим, достаточно хорошо изученным в больших масштабах и широко распространенным способом получения водорода, является *реформинг* (стационарный и на транспорте) – тепловое разложение углеводородного топлива паром. Преимуществом данного способа является низкая стоимость продукта из природного газа и возможность комбинации с секвестрацией двуокиси углерода. Однако, данный способ также имеет свои недостатки и достаточно существенные, маломасштабные устройства не имеют коммерческого значения; конечный продукт содержит примеси, требуется газоочистка для некоторых приложений; выбросы двуокиси углерода; дополнительные затраты на секвестрацию двуокиси углерода; первичное топливо может использоваться непосредственно [3].

*Газификация* - разложение тяжелых углеводородов и биомассы на водород и газы для последующего реформинга. Данная технология достаточно хорошо изучена для тяжелых углеводородов в больших масштабах, используется для твердых и жидких топлив, также продемонстрирована газификация биомассы. Для этого способа также характерны свои недостатки: маломасштабные устройства редки, конечный продукт требует интенсивной очистки перед использованием, биомасса используется в качестве удобрения, процесс до конца не изучен, конкуренция с синтетическими топливами из биомассы.

Получение водорода с помощью *термохимических циклов*, использующих дешевое высокотемпературное тепло ядерных реакторов или концентрированной солнечной энергии, имеет ряд преимуществ: принципиально возможно производство больших объемов водорода при низкой стоимости и без выброса парниковых газов для тяжелой промышленности и транспорта. Существует международное сотрудничество в области исследований, разработок и внедрения.

Но данный процесс синтеза сложен и еще не имеет коммерческого значения, для него требуются долговременные исследования материалов (порядка 10 лет), усовершенствования химической технологии; требуется высокотемпературный ядерный реактор (ВТЯР) или солнечные концентраторы.

*Биологическое производство* водорода [4] находится еще в процессе изучения и исследования. Данный способ получения основывается на способности водорослей и бактерий при некоторых условиях вырабатывать водород. Потенциально это, конечно, большой ресурс, однако, основными проблемами являются: малая скорость накопления водорода; для этого нужны большие площади; наиболее подходящие объекты еще не найдены. Исследования биологического производства активно продолжаются.

Подробное изучение материалов по способам синтеза водорода показало, что для его массового производства в будущем считается весьма перспективным использование атомной энергии. При этом рассматриваются два основных пути: а) использование избыточных мощностей АЭС в ночное время для наработки водорода методом электролиза; б) использование высокотемпературных реакторов с газовым или металлическим теплоносителем для получения водорода в процессе термических циклов. Последняя технология наиболее выгодна с экономической точки зрения. (Разработанная в СССР в начале 70-х годов XX века концепция широкого использования производимого из воды с помощью ядерных реакторов водорода как энергоносителя в промышленности, энергетике, на транспорте и в быту получила название атомно-водородной энергетики [5,6]).

Рассмотрим более подробно особо значимые достижения ученых и разработчиков всего мира в области хранения водорода.

На сегодняшний день наиболее перспективными методами хранения водорода считаются:

- метод хранения с использованием углеродных нанотрубок [7].
- метод хранения водорода в абсорбированном состоянии [3].

Как доказывают ученые [7], многие проблемы, связанные с хранением водорода, может решить использование углеродных нанотрубок. Такие углеродные материалы, как нановолокна и нанотрубки

достаточно легкие, имеют полую структуру и благодаря этому могут использоваться в качестве контейнера для хранения водорода, сохраняя его плотность в газообразном состоянии. Водород способен при нагревании медленно высвобождаться из наноматериалов. Длина нанотрубок может достигать нескольких сантиметров, а диаметр составляет всего от одного до нескольких десятков нанометров [8].

Трубки состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и заканчиваются «полусферической» головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена [9].

Исследователи из лаборатории Лоуренса в Беркли (Berkeley Lab) [10] придумали оригинальное решение для удобного хранения водорода. Они создали достаточно недорогой нанокомпозит, который способен с большой скоростью впитывать водород и отдавать его обратно при умеренном нагреве. Причём содержащийся в композите металл не окисляется и не деградирует со временем.

Ранее в качестве эффективной ёмкости для водорода уже предлагались гидриды металлов в самых различных вариациях, а ещё такая экзотика, как полимерная пена, или, к примеру, соединения аммиака. Ни один вариант массовым не стал.

EurekaAlert информирует: «Новый материал состоит из множества наночастиц металлического магния, распределённых по матрице из полиметилметакрилата.»

Полимерная матрица создаёт барьер для кислорода и паров воды, но в то же время пропускает к магнию водород и выпускает его обратно при необходимости. А нести такой материал может до 4% водорода по весу. Это показал анализ образцов.

Очень важным аспектом служит то, что если данная разработка лаборатории в Беркли будет доведена до конвейера, она должна быть хорошо воспринята в энергетике и на транспорте.

Как показывают многие исследования метод хранения водорода в абсорбированном состоянии весьма перспективный. Однако, большинство сорбционных материалов позволяют абсорбировать максимум на 7-8 % водорода в массовой доле. Поэтому актуальность разработки способов увеличения этого показателя является важной задачей исследователей в этой области.

Значительного успеха в повышении сорбционной способности добились А. Филипс (Adam Phillips) и Б. Шиварам (Bellave Shivaram). Они смогли описать процесс синтеза композитного вещества на основе металлического титана, у которого сорбционная способность достигает 12,4 % массы водорода. Исследователи подчеркивают, что их работа - самый первый шаг в этом новом направлении. Пока им удалось получить только лишь мономолекулярный слой нового вещества и пока неясно, как из соединения с титаном десорбировать водород. Необходимо также продолжить поиски новых соединений титана с другими органическими молекулами (бензолом и другими циклическими соединениями), сообщает Physics World [11].

В журнале Energy and Environmental Science ученые рассказали о новом придуманном ими методе хранения водорода при помощи окурков от сигарет [12]. Данный способ так же относится к перспективным абсорбционным методам хранения.

Фильтр сигареты, состоящий из ацетилцеллюлозы и практически не разлагающийся в естественных условиях, при гидротермальной карбонизации преобразуется в гидроуголь, который позволяет в абсорбированном состоянии хранить большое количество водорода благодаря своей пористой структуре.

Такой необычный новый подход позволит не только создать эффективные хранилища для водорода, но и бороться с экологическими проблемами.

Еще одним весьма необычным и недорогим способом хранения водорода, является способ с использованием карбонизированных волокон куриных перьев [13].

В городе Ньюарк штата Делавер американские ученые из Университета разработали идею, заключающуюся в том, что структура кератина (белка, из которого преимущественно состоят волокна куриных перьев) при процедуре карбонизации становится гораздо более пористой, чем в обычном состоянии, и белок становится способным поглощать и удерживать значительное количество водорода. С этой идеей авторы выступили с докладом на 13-й ежегодной конференции по зеленой химии и технике. Ученые предположили, что применение карбонизированных волокон куриных перьев гораздо эффективнее в хранении водорода, чем углеродные нанотрубки или гидриды металлов.

Таким образом, поиск нетрадиционных методов получения и, в большей степени, хранения водорода является достаточно перспективным направлением в исследовании данной проблематики.

### *Список литературы / References*

1. *Гладышева М.А.* Доклад «Хранение водорода» / М.А.Гладышева [Электронный ресурс] // Конференция «Старт в науку» МФТИ, 2004. Режим доступа: <http://mirznanii.com/a/188820/khranenie-vodoroda/> (дата обращения 08.05.2018).
2. «Обзор методов хранения водорода» [Электронный ресурс] // Институт проблем материаловедения НАН Украины. Режим доступа: <http://shp.by.ru/sci/fullerene/forums/ichms/2003/> (дата обращения

08.05.2018).

3. *Ажажа В.М.* Материалы для хранения водорода: анализ тенденций развития на основе данных об информационных потоках / В.М. Ажажа, М.А. Тихоновский, А.Г. Шепелев и др. // Вопросы атомной науки и техники №1 НАЦ «Харьковский физико-технический институт» г. Харьков, Украина; 2006. С. 145-152.
4. *Levin D.V.* Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application/ D.V. Levin, L. Pitt, M. Love. // International Journal of Hydrogen Energy. 2004. V. 29. P. 173-185.
5. *Пономарев-Степной Н.Н.* Атомно-водородная энергетика – пути развития/ Н.Н. Пономарев-Степной, А.Я. Столяревский// «Энергия» № 1, 2004. С. 3-9.
6. *Легасов В.А.* Атомно-водородная энергетика (прогноз развития)/ В.А. Легасов, Н.Н. Пономарев-Степной, А.Н. Проценко и др.// Вопросы атомной науки и техники. Серия Атомно-водородная энергетика, в.1, 1976. С. 5-34.
7. Методы хранения водорода в углеродных нанотрубках [Электронный ресурс]/ XII Международная конференция студентов и молодых ученых «перспективы развития фундаментальных наук» – Режим доступа: [http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/19169/1/conference\\_tpu-2015-C21-089.pdf](http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/19169/1/conference_tpu-2015-C21-089.pdf) (дата обращения 09.05.2018).
8. Los Alamos National Laboratory (2004, September 17). Laboratory Grows World Record Length Carbon Nanotube. ScienceDaily. Retrieved December 18, 2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sciencedaily.com/releases/2004/09/040917091336.htm/> (дата обращения 10.05.2018).
9. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства / А.В. Елецкий // Успехи физических наук. Т. №4, 2002. С. 172
10. Air-stable magnesium nanocomposites provide rapid and high-capacity hydrogen storage without using heavy-metal catalysts [Электронный ресурс] //Режим доступа: <https://www.nature.com/articles/nmat2978> (дата обращения 11.05.2018).
11. Новый материал для хранения водорода на основе металло-органических соединений продемонстрировал рекордные показатели. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://zoom.cnews.ru/rnd/news/top/najden\\_novyj\\_material\\_dlya\\_hraneniya\\_vodoroda](http://zoom.cnews.ru/rnd/news/top/najden_novyj_material_dlya_hraneniya_vodoroda) (дата обращения 08.05.2018).
12. Информационный портал «Газета.ру» [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://www.gazeta.ru/science/news/2017/11/01/n\\_10765928.shtml?updated](https://www.gazeta.ru/science/news/2017/11/01/n_10765928.shtml?updated) (дата обращения 11.05.2018).
13. Информационный портал «Газета.ру» [Электронный ресурс] / Режимдоступа: [https://www.gazeta.ru/science/2009/06/24\\_a\\_3214875.shtml?updated](https://www.gazeta.ru/science/2009/06/24_a_3214875.shtml?updated) (дата обращения 11.05.2018).