

УДК 620.92

### Перспективы использования водорода

А.Т. Шампиева

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Г.Р. Зиякаев  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: shampiyevaat@mail.ru

### Prospects for the use of hydrogen

A.T. Shampieva

Scientific Supervisor: Ass. Prof., Ph.D. G.R. Ziyakaev  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: shampiyevaat@mail.ru

**Abstract.** *The article is devoted to the problem of hydrogen storage as a promising environmentally friendly energy carrier. The main methods of storage (compression, liquid hydrogen, metal hydride and porous storage) are considered with an analysis of their advantages and disadvantages. Particular attention is paid to the problem of hydrogen embrittlement of cylinder materials and methods for overcoming it, such as heat treatment, the use of protective coatings and the improvement of production technologies.*

**Key words:** *hydrogen, hydrogen storage, hydrogen cylinders, hydrogen embrittlement, reinforcement optimization.*

#### Введение

Потребление энергии растет и ограничения углеводородной энергетики стимулируют интерес к развитию чистых источникам энергии. Водород представляет собой перспективный энергоноситель, не производящий углеродных выбросов, с широким применением в химической промышленности, энергетике и транспорте. Несмотря на то что сегодня основная часть водорода используется в нефтепереработке и производстве удобрений, его роль в транспортной отрасли начинает расти благодаря развитию технологий водородных автомобилей и других видов транспорта [1, 2]. Однако хранение водорода остается сложной задачей из-за его низкой плотности и летучести.

#### Экспериментальная часть

Основные способы хранения включают компрессирование, перевод в жидкую форму, металлгидридное хранение и использование пористых материалов. Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки: компрессированный водород прост в использовании, жидкий водород эффективен для больших объемов, но дорог в охлаждении, а металлгидридное хранение использует химическую связь водорода с металлом, что делает процесс более безопасным, но снижает объемную плотность энергии и пористое хранение позволяет хранить водород в порах материалов при относительно низком давлении, но технология пока недостаточно развита для массового применения. Сравнение этих способов приведено в табл. 1 [3, 4].

Сравнительный анализ способов хранения водорода

Метод	Плотность хранения (кг/м <sup>3</sup> )	Давление/ температура	Преимущества	Недостатки	Область применения
Компресси- рованный водород	~40–70 кг/м <sup>3</sup> (при 700 бар)	До 700–1000 бар	- Простота реализации - Широкое распространение - Высокая энергоэффективность при сжатии	- Требуется прочных материалов для баллонов - Энергоемкость процесса сжатия	Автомобили, транспорт, промышлен- ность
Жидкий водород	~70,8 кг/м <sup>3</sup>	Криогенные температуры (-252,9 °С)	- Высокая плотность хранения - Подходит для больших объемов	- Высокие затраты на охлаждение - Потери из-за испарения - Необходимость в специальных емкостях	Космическая отрасль, крупномасш- табные системы
Металло- гидридное хранение	~10–20 кг/м <sup>3</sup>	Нормальное давление или низкое давление	- Безопасность хранения - Отсутствие необходимости в высоких давлениях	- Ограниченная емкость хранения - Высокая стоимость некоторых материалов	Мобильные источники энергии, электроника
Хранение в пористых материалах	~5–15 кг/м <sup>3</sup>	Низкое давление (до 100 бар)	- Потенциально высокая плотность хранения - Относительно мягкие условия хранения	- Находится на стадии исследований - Технологически сложное производство материалов	Перспектив- ные мобильные приложения

Как видно из табл. 1, ограничения, связанные с прочностью баллонов, остаются практически основными для широкого распространения водородного топлива.

### Механизмы разрушения водородных баллонов

Разрушение водородных баллонов вызвано главным образом водородной хрупкостью – процессом, при котором атомы водорода проникают в кристаллическую решетку металла, снижая его прочность. Это особенно актуально для металлов. Под высоким давлением механизм декогезии способствует распространению трещин через границы зерен, что приводит к утечкам водорода и повышает риск взрыва. Для предотвращения разрушений применяются различные методы: искусственное старение [5], механообработка, лазерная обработка, порошковая металлургия, нанесение защитных покрытий [6].

Также немаловажной проблемой является усталостный износ баллонов под воздействием циклических нагрузок, возникающих вследствие регулярного заполнения и сброса [7]. К повышению усталостной прочности баллонов ведет оптимизация конструкции с целью минимизации острых углов и других концентраторов напряжений.

С учетом специфики применения водородных баллонов в транспортной отрасли, особую актуальность приобретают вопросы конструктивного исполнения. В современных транспортных средствах широко используются баллоны типов III и IV, сочетающие металлические или полимерные лайнеры с композитным армированием. Такие баллоны могут эффективно применяться в условиях циклических нагрузок. Кроме того, важное преимущество композитного баллона состоит в его существенно меньшей относительно металлических изделий массе.

Вместе с тем, применение композиционных материалов ставит перед разработчиками ряд вопросов. Одним из них является выбор схемы армирования композитного баллона. Схема

армирования должна обеспечивать необходимые характеристики прочности и долговечности баллона, одновременно со снижением, материалоемкости, и в конечном итоге, стоимости баллона. [8]. Решение задач оптимального проектирования водородных баллонов позволяет повысить энергоэффективность транспортных средств, использующих такие баллоны.

### Заключение

Таким образом, комплексный подход, включающий геометрическую оптимизацию и рациональное армирование, является необходимым условием для успешного внедрения водородных технологий в транспортную инфраструктуру. Дальнейшее исследование предполагает численное моделирование за счет комбинирования методов конечных элементов и различных методов оптимизации с учетом эффективных свойств волокнистого материала и достижение снижения массы и повышения допустимого давления [9].

### Список литературы

1. Von H.R., Eberle U. Fuel cell vehicles: Status 2007 // Journal of power sources. – 2007. – Vol. 165, № 2. – P. 833–843.
2. Квашин В.П., Союнов А.С., Кузьмин Д.Е. Перспективы использования водорода в качестве топлива для автомобильных двигателей // Перспективные технологии в аграрном производстве: человек, "цифра", окружающая среда (AgroProd 2021): Материалы международной научно-практической конференции, Омск, 28 июля 2021 года. – 2021. – С. 313.
3. Magneville B. et al. Modeling, parameters identification and experimental validation of composite materials behavior law used in 700 bar type IV hydrogen high pressure storage vessel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2015. – Vol. 40, № 38. – P. 13193–13205.
4. Розов И.В. Обзор и анализ способов хранения водородного топлива на транспортных средствах // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (АВАТ-2022): сборник статей Всероссийской научно-практической конференции (15–16 декабря 2022 года, г. Барнаул) / Алт. гос. техн. ун-т им. ИИ Ползунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2023. – 142 с. – URL: [https://journal.altstu.ru/konf\\_2022/2022\\_22/114/](https://journal.altstu.ru/konf_2022/2022_22/114/). – Текст: электронный. – 2023. – С. 26.
5. Song R.G. et al. Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of an Al–Zn–Mg–Cu alloy // Acta Materialia. – 2004. – Vol. 52, № 16. – P. 4727–4743.
6. Панченко М.Ю. и др. Влияние размера зерна на закономерности водородного охрупчивания высокоазотистой аустенитной стали. – 2021.
7. Chanda D. et al. Investigation of electro catalytic activity on a N-doped reduced graphene oxide surface for the oxygen reduction reaction in an alkaline medium // International journal of hydrogen energy. – 2018. – Vol. 43, № 27. – P. 12129–12139.
8. Евстратов С.В. Разработка технологических процессов изготовления сверхлегких комбинированных металлокомпозитных баллонов давления: дис. ... канд. тех. наук : защищена 05.10.2015; утв. 22.07.2015. – Москва, 2015. – 151 с.
9. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В. Конечно-элементное моделирование эффективных вязкоупругих свойств однонаправленных композиционных материалов // Математическое моделирование и численные методы. – 2014. – № 2 (2). – С. 28–48.