

УДК 621.6

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ХРАНЕНИЮ ВОДОРОДА И ЕГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КАЧЕСТВЕ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ**

Муртазалиева Х.А., студент гр. НТ-25м, 1 курс
Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени М.Д. Миллионщикова
г. Грозный

Аннотация

В работе выполнен анализ основных технологий хранения водорода, применяемых в современной энергетике. Рассмотренные методы разделены на две группы: физические (хранение в сжатом или сжиженном виде) и химические (связанное состояние в гидридах, адсорбентах и химических соединениях). Представлено сравнение ключевых параметров этих методов: массовое содержание водорода, объёмная плотность, рабочие температуры и давления. Особое внимание уделено водородным накопителям энергии как перспективному направлению для интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Приведены примеры реализованных проектов и оценены требования к материалам для обратимого хранения водорода.

Ключевые слова: водород, хранение водорода, гидриды металлов, адсорбция, накопители энергии, возобновляемая энергетика.

**HYDROGEN STORAGE TECHNOLOGIES AND ITS APPLICATION
AS ENERGY STORAGE SYSTEMS**

Murtazalieva Kh.A., 1st year student, gr. NT-25m
M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University
Grozny

Abstract

This paper analyzes the main hydrogen storage technologies used in modern energy systems. The methods are divided into two groups: physical (compressed or liquefied hydrogen) and chemical (bound state in hydrides, adsorbents, and chemical compounds). A comparison of key parameters such as gravimetric and volumetric hydrogen density, operating temperatures, and pressures is provided. Special attention is paid to hydrogen energy storage systems as a promising direction for integration with renewable energy sources. Examples of implemented projects are given, and requirements for materials for reversible hydrogen storage are evaluated.

Keywords: hydrogen, hydrogen storage, metal hydrides, adsorption, energy storage, renewable energy.

Введение

Эффективное и экономически оправданное хранение водорода является одним из ключевых условий развития водородной энергетики. Водород рассматривается как универсальный энергоноситель, способный обеспечить связь между генерацией энергии из возобновляемых источников (ВИЭ) и её потреблением. Основные области применения водорода охватывают транспорт, стационарную энергетику, промышленность и коммунальное хозяйство [1].

Однако физико-химические свойства водорода — низкая плотность, высокая проникающая способность, широкие пределы взрываемости — создают серьёзные ограничения при выборе методов его хранения. Традиционные подходы, основанные на хранении в сжатом или сжиженном виде, обладают рядом недостатков: высокие энергозатраты, потери при испарении, требования к прочности и безопасности ёмкостей. Альтернативой выступают методы связанного хранения, при которых водород удерживается в твёрдых или жидких носителях за счёт физической адсорбции, абсорбции или химического взаимодействия [2].

Цель данной работы — систематизация и сравнительный анализ существующих технологий хранения водорода, а также оценка перспектив их применения в системах накопления энергии.

Основные методы хранения водорода

В современной практике выделяют две принципиально различные группы методов: физические и химические. Физические методы основаны на изменении агрегатного состояния водорода без изменения его молекулярной структуры. К ним относятся хранение в сжатом газообразном виде (баллоны под давлением до 800 атм, стационарные резервуары, трубопроводы) и в жидком виде (криогенные контейнеры при температуре $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$). Физические методы обеспечивают высокое массовое содержание водорода (до 100 %), но требуют значительных энергозатрат на сжатие или сжижение, а также специальных материалов, устойчивых к высоким давлениям и низким температурам [3].

Химические методы, или связанное хранение, предполагают взаимодействие водорода с веществом-носителем. Водород может адсорбироваться на поверхности высокопористых материалов (цеолиты, мезопористые углероды, металлоорганические каркасы), абсорбироваться в объём металлов с образованием гидридов, либо вступать в химическую реакцию с образованием соединений типа аммиака, борогидридов, аланатов или жидких органических носителей (ЛОHC) [4]. Эти методы позволяют хранить водород при относительно низких давлениях и температурах, но уступают физическим по массовому содержанию водорода [2].

Сравнительная характеристика основных методов приведена в таблице

1.

Таблица 1. Технические параметры различных методов хранения водорода

Метод хранения	Массовое содержание H ₂ , %	Объёмная плотность, кг H ₂ /м ³	Температура, °C	Давление, атм	Особенности
Сжатый газ	100	40	20	800	Требуются компрессорные баллоны высокого давления
Жидкий водород	100	70	-252	1	Неизбежные потери на испарение
Адсорбция	0,05–2	1–20	–80	10–100	Требуются материалы с большой удельной поверхностью [1]
Обратимые гидриды	2-7	100-120	20-300	1-100	Хорошая кинетика, мягкие условия [2]
Комплексные гидриды	7-18	100-150	>100	1	Десорбция при высоких температурах
Гидролизные системы	10-30	120-150	20	1	Необратимый процесс, однократное использование [4]

Водородные накопители энергии

Интеграция водородных технологий в энергетические системы предполагает создание замкнутого цикла: первичный источник энергии → производство водорода → хранение → регенерация электроэнергии.

Наибольший интерес такие системы представляют в сочетании с ВИЭ (солнечные, ветровые электростанции), где водород выступает в роли долговременного буфера, сглаживающего колебания генерации [3].

Водородное аккумулирование энергии уступает по КПД (40–60 %) традиционным аккумуляторам или суперконденсаторам, однако его ключевое преимущество — возможность хранения энергии без потерь в течение длительного времени. Это делает водородные системы незаменимыми для сезонного выравнивания графиков нагрузки и энергоснабжения удалённых объектов [1].

В качестве материалов для обратимого хранения водорода в таких системах наиболее перспективны интерметаллические соединения и сплавы, образующие гидриды при умеренных давлениях и температурах [2]. К важнейшим требованиям к таким материалам относятся: высокая ёмкость по водороду, стабильность при циклировании, устойчивость к примесям и приемлемая стоимость

Примеры практической реализации

Одним из пилотных проектов в России является разработка компании ООО «Градиент Килби» (г. Иннополис), предлагающей использовать жидкие органические носители водорода (ЛОНС) для аккумулирования избыточной энергии от солнечных или ветровых установок. В качестве носителя применяется N-этилкарбазол, который обратимо гидрируется и дегидрируется в присутствии катализатора. Процесс полностью экологичен, водород хранится в химически связанной форме, что исключает его утечку и повышает безопасность. На основе этой технологии разработан проект офисного комплекса с системой накопления ёмкостью 15,75 МВт·ч [5]. Накопитель энергии (рис. 1) сочетает в себе технологию электролиза, топливных элементов и хранения водорода в органической жидкости.

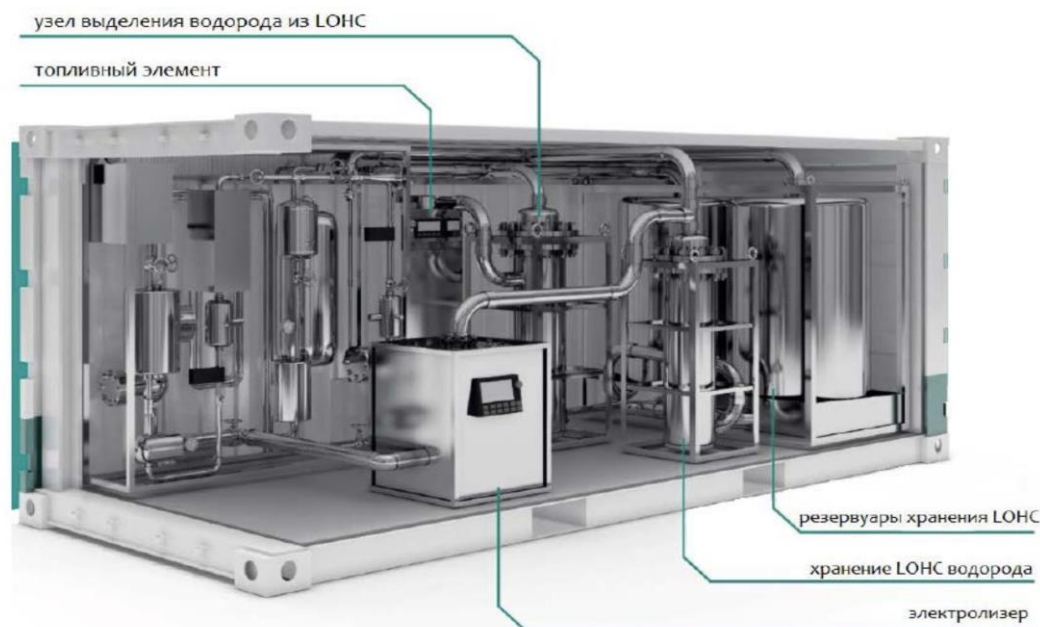


Рисунок 1 - Система накопления энергии

Другой показательный пример — проект Manilla Community Solar в Австралии. Здесь избыточная энергия солнечной электростанции преобразуется в водород, который затем хранится в твёрдой матрице борогидрида натрия (NaBH_4). Материал работает как «губка», поглощая и выделяя водород при изменении условий. Хранилище выполнено в стандартных 20-футовых контейнерах, что обеспечивает мобильность и масштабируемость. Ёмкость системы — 17 МВт·ч, мощность топливных элементов — 2 МВт [4].

Заключение

Проведённый анализ показывает, что выбор метода хранения водорода определяется конкретными условиями эксплуатации: требуемой компактностью, энергозатратами на подготовку, безопасностью и длительностью

хранения. Физические методы (сжатый и жидкий водород) остаются основными для транспорта и кратковременного хранения, но связанное хранение в гидридах и химических соединениях представляется наиболее перспективным для стационарных энергетических систем, особенно при интеграции с ВИЭ. Дальнейшее развитие водородных накопителей энергии требует совершенствования материалов с высокой ёмкостью, стабильностью и низкой стоимостью, а также отработки технологий на пилотных проектах [3].

Список литературы:

1. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского федерального университета, 2014. – 230 с.
2. Тарасов Б.П. Металлогидриды – материалы для хранения водорода // Успехи химии. – 2009. – Т. 78, № 8. – С. 825–844.
3. Кустов Л.М. Перспективные материалы для хранения водорода // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 48–54.
4. Амосов А.П., Бамбуров В.Г., Бекетов А.Р. и др. Водородная энергетика и топливные элементы / под ред. В.М. Барыбина. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 288 с.
5. Официальный сайт ООО «Градиент Килби» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gradientkilby.ru/> (дата обращения: 24.02.2026).