

ЛИТЕРАТУРА

1. Трусов, В. И. Форсунки автотракторных дизелей / В. И. Трусов, В. П. Дмитриенко, Г. Д. Масляный. – М. : Машиностроение, 1977.

2. Промывка топливной системы двигателя: что это? – URL: <https://dizelmaster.ru/stati/promyvka-toplivnoj-sistemy-dizelnogo-dvigatelja> (дата обращения: 14.05.2025).

3. Эффективные способы защиты от засорения сопловых отверстий форсунок. – URL: <https://diapazon-plus.ru/a/ehffektivnye-sposoby-sohraneniya-chistoty-soplovyh-otverstij-forsunok-dlya-predotvrashcheniya-zasoreniya-i-obespecheniya-besperebojnoj-raboty-toplivnoj-sistemy> (дата обращения: 14.05.2025).

Представлено 15.05.2025

УДК 661.91

ХРАНИЕНИЕ ВОДОРОДА В ГАЗООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ

STORAGE OF HYDROGEN IN GASEOUS STATE

Ковалевич Е. Е., студ., **Беть С. Г.**, ст. преп.,
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

E. Kovalevich, Student, S. Bets, Senior Lecturer,
Belarusian national technical University, Minsk, Republic of Belarus

В статье описан метод хранения водорода в газообразном состоянии, основные проблемы и типы резервуаров для хранения.

The article describes the method of storing hydrogen in a gaseous state, the main problems and types of storage tanks.

Ключевые слова: водород, хранение.

Keywords: hydrogen, storage.

ВВЕДЕНИЕ

Водород в качестве энергоносителя занимает важное место в стратегии перехода к безуглеродной энергетике. Он может использоваться в топливных элементах, химической промышленности, транспорте и других сферах. Однако водород – это самый легкий элемент, и его хранение представляет собой серьезную инженерную и экономическую задачу. Наиболее простым и технологически освоенным способом хранения водорода является его сжатие и содержание в газообразной форме. В данной работе рассматриваются существующие подходы к хранению водорода в газообразном состоянии, их преимущества, ограничения и направления развития.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДОРОДА В ГАЗООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ

Газообразный водород обладает низкой плотностью – около 90 г/м^3 при нормальных условиях (0°C и 1 атм). Это означает, что для хранения 1 кг водорода необходимо более 11 м^3 объема. Следовательно, хранение при атмосферном давлении нецелесообразно, и основной подход заключается в сжатии газа. Сжатие водорода повышает его плотность и снижает требования к объему хранилища, но требует специального оборудования, материалов и мер безопасности. На практике используются давления от 20 до 70 МПа ($200\text{--}700 \text{ бар}$), а в некоторых случаях – выше.

ТИПЫ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ

1. Металлические баллоны.

Традиционно используются стальные (рис. 1, *а*) или алюминиевые (рис. 1, *б*) баллоны, рассчитанные на давления до $200\text{--}300 \text{ бар}$. Они просты в производстве и обладают высокой прочностью, но имеют большую массу, что ограничивает их применение в транспорте.



Рисунок 1 – Металлические баллоны:
а – стальной; *б* – алюминиевый

2. Металлокомпозитные и композитные баллоны.

Современные баллоны состоят из внутреннего герметичного лейнера (из металла (рис. 2, *а*) или полимера (рис. 2, *б*)) и внешнего армирующего слоя из углеродного волокна. Они способны выдерживать давления до 700 бар (70 МПа) и обеспечивают большую удельную энергоемкость (0,5–2,0 кВт·ч/кг) по сравнению с металлическими аналогами. Композитные баллоны легче и безопаснее при разрушении, но стоят дороже и требуют сложного производства. Их применение особенно актуально в водородном транспорте (например, водородные автомобили Toyota Mirai и Hyundai Nexa).



Рисунок 2 – Металлокомпозитные и композитные баллоны:
а – металлический; *б* – полимерный

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ НОСИТЕЛЯМИ

Несмотря на прогресс в области высокопрочного оборудования, газообразный водород при 70 МПа имеет объемную энергоемкость всего около 4,4 МДж/л, что составляет лишь 14 % от значения энергоемкости бензина, которая составляет 31,6 МДж/л. Это серьезное ограничение при проектировании мобильных энергетических установок и транспортных средств. Однако по удельной массе (энергия на 1 кг) водород остается лидером – около 120–142 МДж/кг, что примерно в три раза выше, чем у бензина.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Хранение водорода в газообразном виде связано с рядом проблем:

- высокая стоимость баллонов высокого давления;
- большие энергозатраты на сжатие (до 10–15 % от энергии водорода);
- необходимость защиты от утечек и взрывов;
- ограничения по плотности энергии по сравнению с жидкими топливами.

Тем не менее, ведутся активные исследования по созданию новых легких и прочных материалов, систем мониторинга утечек, технологии рекуперации энергии при дросселировании газа и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хранение водорода в газообразном состоянии является одним из наиболее проработанных и доступных способов аккумуляирования этого энергоносителя. Он широко применяется в промышленности, на транспорте и в стационарных энергетических системах. Однако из-за ограничений по плотности энергии и высокой стоимости оборудования, этот способ требует дальнейшего развития. Будущие инновации в области материаловедения, композитных структур, микроремкостей и интеграции с возобновляемыми источниками энергии могут значительно повысить его привлекательность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Züttel, A. Hydrogen storage methods / A. Züttel. –Naturwissenschaften, 2004. – P. 157–172.
2. Лавров, Н. А. Водородная энергетика. Методы хранения водорода ; лекция. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.
3. Gore, Jay P. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program. Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan : On-Board Hydrogen Storage / Jay P. Gore, Arvind Varma, P. Ramachandran [et al.] // U. S. Department of Energy, 2020.

Представлено 15.05.2025