

ХРАНЕНИЕ ВОДОРОДА В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

STORAGE OF HYDROGEN IN LIQUID 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 описаны особенности хранения водорода в сжиженном состоянии.

The article describes the features of storing hydrogen in liquefied form.

Ключевые слова: жидкий водород, криогенный резервуар.

Keywords: liquid hydrogen, cryogenic tank.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач в рамках перехода к водородным технологиям является эффективное и безопасное хранение водорода, особенно в жидком состоянии. Сжижение водорода позволяет значительно уменьшить его объем – примерно в 800 раз по сравнению с газообразным состоянием при нормальных условиях. Это делает жидкий водород особенно удобным для хранения и транспортировки в больших масштабах, включая межконтинентальные перевозки, хранение в резервуарах на производственных объектах и применение в ракетной технике.

Жидкий водород – перспективное энергоносительное вещество, которое находит применение в различных отраслях: от ракетной техники до водородной энергетики. Однако его хранение представляет собой сложную инженерную задачу, обусловленную крайне низкой температурой кипения (-253°C) и высокой летучестью.

ПРОЦЕСС СЖИЖЕНИЯ ВОДОРОДА

Прежде чем водород можно будет хранить в жидком состоянии, он должен пройти процесс сжижения. Сжижение водорода осуществляется с использованием многоступенчатых криогенных установок,

в которых газ последовательно охлаждается и расширяется с помощью эффектов Джоуля-Томсона и каскадов теплообменников. Современные промышленные технологии позволяют достигать эффективности до 30–40 %, но при этом процесс требует значительных затрат энергии – около 10–15 кВт·ч на 1 кг сжиженного водорода.

СПОСОБ ХРАНЕНИЯ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

Для хранения жидкого водорода применяются двустенные криогенные резервуары (рис. 1), аналогичные сосудам Дьюара.



Рисунок 1 – Криогенные резервуары

Их конструкция предусматривает:

- внутренний сосуд из нержавеющей стали, устойчивой к воздействию сверхнизких температур и водорода (чаще всего применяется сталь 12Х18Н10Т или аустенитные сплавы);
- внешнюю оболочку, которая отделена от внутренней вакуумной прослойкой;
- многослойную отражающую изоляцию (MLI), состоящую из чередующихся слоев металлизированной плёнки и диэлектрических материалов (например, полиэтилентерефталата и стекловуали).

Такое сочетание изоляции и вакуума позволяет существенно уменьшить теплопритоки за счет снижения всех трех типов теплопередачи – кондукции, конвекции и излучения.

Главной задачей при хранении является минимизация тепловых потерь, которые могут привести к испарению жидкого водорода (boil-off). Это достигается следующими мерами:

- вакуум между оболочками поддерживается на уровне ниже 10^{-3} Па;
- используются материалы с крайне низкой теплопроводностью (например, стеклотекстолит, углепластик) для изготовления опорных конструкций;
- применяются тепловые мосты минимального сечения и увеличенной длины, чтобы ограничить прямую теплопередачу;
- включаются компенсаторы термдеформаций (сильфоны, компенсирующие секции), которые предотвращают разрушение конструкции при охлаждении и нагреве.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРИОГЕННЫХ ХРАНИЛИЩ

В современных резервуарах для хранения жидкого водорода применяются следующие решения:

- поддержка внутреннего сосуда осуществляется с помощью седловых, проволочных или шариковых опор, исключающих жесткий контакт с наружной оболочкой;
- мембранные предохранители и предохранительные клапаны защищают от избыточного давления, возникающего при испарении водорода;
- вакуумный контроль и постоянный мониторинг состояния теплоизоляции позволяют прогнозировать утечки или деградацию изоляционных свойств.

Примером передовых инженерных решений является технология, разработанная компанией *Kawasaki Heavy Industries*, при проектировании сферических резервуаров для хранения жидкого водорода, где используется карбоновое армирование, байонетные соединения, и внутренние компенсаторы температурного расширения.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ВОДОРОДА

Преимущества:

- высокая плотность энергии на единицу объема;
- компактность хранилищ;
- пригодность для длительного хранения при минимальных потерях при хорошем контроле.

Недостатки:

- сложность и высокая стоимость криогенной техники;
- необходимость непрерывного контроля за температурой, давлением и уровнем испарения;
- энергетические затраты на сжижение и поддержание температуры хранения;
- требования к материалам и герметичности из-за проникновения водорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хранение водорода в жидком состоянии представляет собой высокотехнологичную задачу, требующую комплексного подхода к теплоизоляции, материалам, конструкции и безопасности. Несмотря на высокие требования к оборудованию, данный способ остаётся одним из самых эффективных в условиях, когда необходима высокая плотность хранения и мобильность запаса водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавров, Н. А. Водородная энергетика. Методы хранения водорода ; лекция. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.
2. Петухов, Б. С. Криогенные технологии в энергетике / Б. С. Петухов, А. П. Пискунов. – М. : Энергоатомиздат, 2006.
3. Momirlan, M. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet / M. Momirlan, T. N. Veziroglu // International Journal of Hydrogen Energy/ – No 30. – 2005. – P. 795–802.
4. Godula-Jopek, A. Hydrogen Storage Technologies / A. Godula-Jopek, W. Jehle, J. Wellnitz/ – WILEY-VCH Verlag GmbH, 2012. – 260 p.

Представлено 15.05.2025