

УДК 621.6

Бобровский В.А., Шафиев Д.Р., Трапезников А.Н., Агарков Д.А., Бредихин С.И., Чичилов А.А., Аверина Ю.М.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ГРУЗОВОГО ТРАНСПОРТА

Бобровский В.А., Шафиев Д.Р., Трапезников А.Н. - ПАО «КАМАЗ», Научно-технический центр, Набережные Челны, Россия

Агарков Д.А., Бредихин С.И. - ИФТТ РАН, Черноголовка, Россия

Чичилов А.А. - Казанский Государственный Энергетический Университет, Казань, Россия

Аверина Ю.М. - Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

В настоящей работе приводятся различные методы хранения и транспортировки водородного топлива для грузового транспорта. Приведено сравнение преимуществ и недостатков различных способов.

Ключевые слова: водород, хранение, транспортировка, водородное топливо, грузовой транспорт

SELECTION OF OPTIMAL METHODS OF STORING AND TRANSPORTING HYDROGEN FUEL FOR FREIGHT TRANSPORT

Bobrovsky V.A., Shafiev D.R., Trapeznikov A.N. - PJSC "KAMAZ", Scientific and Technical Center, Naberezhnye Chelny, Russia

Agarkov D.A., Bredikhin S.I. - ISSP RAS, Chernogolovka, Russia

A.A. Chichirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Averina Yu.M. - Russian University of Chemical Technology named after D.I. Mendeleev, Moscow, Russia

In this paper, various methods of storage and transportation of hydrogen fuel for freight transport are presented.

Comparison of advantages and disadvantages of different methods is given.

Key words: hydrogen, storage, transportation, hydrogen fuel, freight transport

В наши дни водород является одним из самых перспективных источников энергии среди альтернативных видов топлива. Имеется несколько вариантов эффективного применения водорода на транспорте как в виде основного вида топлива, так и в качестве добавки к углеводородным топливам. При решении эксплуатации водорода в качестве альтернативного топлива необходимо решить серьезный вопрос транспортировки водорода как на борту транспортного средства, так и до стационарных хранилищ.

Хранить водород можно в газообразном виде под давлением, в жидком состоянии, в связанном виде в твердых или жидких носителях, а также в форме химических соединений, которые при разложении выделяют водород (аммиак, жидкие углеводороды). Для транспорта наиболее важными являются следующие технологии:

- хранение сжатого газообразного водорода в резервуарах высокого давления;
- хранение жидкого водорода;
- хранение водорода в виде гидридов;
- хранение водорода в жидких носителях.

Необходимо понимать, что хранение водорода существенно отличается от хранения других видов топлив тем, что необходимо обеспечивать надежность и безопасность системы хранения водорода в резервуарах. Системы хранения водородного топлива работают в неблагоприятных условиях: при низких температурах и высоком

давлении, при использовании материалов, активных на воздухе [1,2].

Транспортировка жидкого водорода

Водород в жидком состоянии находится в узком интервале температур: от точки кипения около температуры 20 К (-253 °С) до точки замерзания около 14 К (-259 °С). Это свойство водорода особо важно с точки зрения технологий его хранения в жидком виде. Если температура поднимается выше точки кипения, то водород мгновенно переходит из жидкого состояния в газообразное. Во избежание перегрева, заполняемые сосуды необходимо прежде охладить до температуры, близкой к точке кипения водорода. Далее можно приступить к заполнению резервуаров жидким водородом.

Сжижение водорода – весьма энергоемкий и дорогостоящий процесс в связи с неизбежными потерями от испарения, но транспортные расходы для данного вида топлива незначительны [3,4]. Технологии транспортировки водорода достаточно разработаны. В советское время уже были разработаны автомобильные цистерны ТРЖВ-20 (емкость 20 м³) и ТРЖВ-24 (24 м³) для транспортировки жидкого водорода на большие расстояния [5]. В наши дни имеется ряд компаний, выпускающих под заказ цистерны различной емкости для транспортировки жидкого водорода как автотранспортом, так и по железной дороге.

Цистерны для транспортировки жидкого водорода должны удовлетворять ряду требований:

- конструкция цистерны обязана обеспечивать прочность и надежность в работе, длительную безопасную эксплуатацию;
- расход жидкого водорода на предварительное охлаждение цистерны перед

заполнением продуктами должен быть минимальным;

- конструкция должна быть оснащена средствами для быстрого заполнения и выдачи жидкого водорода [3].

Табл. 1. Сводная таблица потерь:

Наименование потерь	Потери, %	Примечание
Заохлаживание резервуара	<15	Не менее двух раз в год
Несовершенство вакуумной теплоизоляции	0,5 в сутки	Для цистерны 4,5-8,2 т в год
Испарение при заправке	4	Для резервуара 4,5-0,18 т
Потери на создание перепада давления между установкой сжижения и емкостью	1,5	

Резервуары изготавливают цилиндрическими и сферическими. Крупногабаритные емкости принято делать сферическими для снижения потерь на испарение. Автоцистернами жидкий водород перевозят на расстояния более 1,6 тыс. км [1].

Преимущества данного способа хранения:

- высокая энергетическая плотность и небольшой объем;
- относительная маленькая себестоимость и эффективность криогенных резервуаров.

Недостатки:

- большое энергопотребление и высокая стоимость;
- сложность обращения с криогенными жидкостями.

Транспортировка газообразного водорода

Для перевозки газообразного водорода используются стальные цилиндрические резервуары. Давление в цистерне составляет порядка 20 МПа. Такие цистерны доставляют к месту эксплуатации на автомобильных и железнодорожных платформах.

Перевозка небольшого количества топлива осуществляется в стальных бесшовных баллонах малого объема до 12 дм³ и средних емкостях объемом от 20 до 50 дм³. Давление в таких баллонах так же составляет порядка 20 МПа [3,4].

Стоимость перевозки сжатого водорода грузовиками достаточно высока – немного меньше, чем по трубопроводу из-за низкой плотности водорода. Трейлеры для перевозки водорода под давлением эффективны для удовлетворения потребностей мелких потребителей, и высокая стоимость доставки может компенсироваться отсутствием потерь [3]. В настоящее время доставка газообразного водорода на трейлерах – самый простой способ, особенно в тех районах, где нет трубопроводов [6]. Он также удобен для доставки на заправочные автостанции, когда трейлеры с водородом остаются на местах, и при этом не требуется постоянно действующая инфраструктура для хранения газообразного водорода.

Преимущества данного способа транспортировки:

- отсутствие потерь водорода;

- не требуется создание инфраструктуры для хранения на месте потребления.

Недостатки:

- целесообразно для небольших потребителей;
- высокая стоимость транспортировки.

Транспортировка водорода с помощью носителей

Транспортировка с помощью носителей при использовании существующей инфраструктуры позволила бы избежать многих проблем, связанных с доставкой водорода в газообразном или жидком видах, а также снизить затраты [1].

Носители должны удовлетворять следующим требованиям [7, 9]:

- сохранение фазового состояния в заданном диапазоне температур и давлений;
- высокая объемная и массовая плотности по водороду;
- простая разгрузка водорода;
- экологическая безопасность.

В качестве эффективных носителей водорода рассматриваются водородоемкие химические соединения, такие как аммиак и углеводороды. Из этих веществ водород получается при помощи химических реакций.

Преимущества хранения и транспортировки водорода в форме аммиака и углеводородов на дальние расстояния, в том числе по трубопроводам, состоят в возможности высокой плотности водорода (до 100 кг/м³). Однако в этих формах хранения водорода среда хранения используется, в основном, однократно. При выгрузке водорода выделяется экологически безопасный продукт (например, азот в случае аммиака). Нет надобности возвращать носитель на новую заправку, но побочный продукт обязан быть безвредным и практически не иметь цены.

Существуют и «восстанавливаемые» носители, содержащие водород, которые транспортируют на топливную станцию, где из них выделяют водород, а затем возвращают для новой заправки. Например, к таким носителям относятся гидриды металлов. При использовании в качестве носителей гидридов металлов целесообразно

применять одинаковые гидриды в отдающей и принимающей водород системе, тогда теплота, выделяемая принимающей системой, может быть использована для выделения водорода из системы доставки [3].

В качестве возможных носителей водорода, кроме традиционных аммиака, жидких углеводородов, гидридов металлов, также рассматривают и водородные клатраты, наноструктуры. Однако основные результаты их изучения относятся к возможности хранения водорода [8], а технологических решений использования их для транспортировки водорода пока нет.

Преимущества данного способа хранения и транспортировки:

- минимальная стоимость транспортировки в перспективе;
- умеренные давления и температуры при доставке.

Недостатки:

- сложность применения на местах из-за необходимости трансформации для получения водорода;
- повышенное энергопотребление.

Выводы

Рассмотренные разновидности транспортировок водородного топлива будут применяться в разной степени. Совокупность этих способов может использоваться на разных этапах развития рынка в зависимости от способов производства водорода.

Грузовой транспорт со специальными резервуарами под давлением может использоваться на начальных периодах перехода к водородной экономике, так как потребность будет невелика. А этот способ позволит максимально исключить потери при перевозке.

Транспортировка топлива в криогенных автоцистернах является наиболее экономичной для

средних по объему потребителей. Возможна транспортировка относительно больших количеств водорода и доставка водорода во все географические зоны. Экономическая целесообразность всегда будет определять приоритетный способ транспортировки.

Список используемой литературы:

1. Алексеева О.К., Козлов С.И., Фатеев В.Н. Транспортировка водорода – Транспорт на альтернативном топливе. – 2011, №4.
2. Козлов С.И., Фатеев В.Н. Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / Под ред. Е.П. Велихова. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 520 с.
3. Simbeck D.D., Chang E. «Hydrogen supply: Cost estimates for hydrogen pathways. Scoping analysis» SFA Pasifi c Jul. Mountain View, CA 2002.
4. Joseph T. Hydrogen Fuel Air Products and Chemicals, Inc. Allentown, PA NGV TF Washington D.C. August 4, 2005.
5. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справ. изд. Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубровкина. – М., Химия, 1989. – 672с.
6. http://transpowerusa.com/zero_emission_solutions/hydrogen_delivery_systems.html
7. FreedomCAR & Fuel partnership. Hydrogen Delivery Technologies Roadmap 5 November 2005.
8. Алексеева О.К., Козлов С.И., Самсонов Р.О., Фатеев В.Н. Системы хранения водорода // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 5(11). – С.72-79.
9. Averina J.M., Zhukov D.Yu., Kurbatov A.Yu., Kalyakina G.E., Desiatov D.Y. Study of technical and economic features of solid oxide fuel cells // В сборнике: 19th International scientific geoconference SGEM 2019. Conference proceedings. 2019. С. 473-480.