

## Оценка энергетических затрат на производство водородного топлива

**Шлякотин В.Е.**

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва  
e-mail: veshlyakotin@ciam.ru

Оценены энергетические затраты на производство газообразного водорода, его сжижение и хранение. Проведено сравнение по этому показателю водородного и традиционного топлива, используемого в авиации, – авиационного керосина.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, водород, топливо, производство, энергетические затраты

## An estimate of energy costs involved in the hydrogen fuel production

**Shlyakotin V.E.**

CIAM, Moscow

Energy costs of the gaseous hydrogen production, its liquefaction and storage are estimated. This parameter is used to compare the conventional fuel used in aviation – aviation kerosene – to hydrogen.

**Keywords:** alternative energy, hydrogen, fuel, production, energy costs

Возможности использования водорода как энергоносителя известны давно. Интерес к его применению проявляли и в 1970-е годы – в связи с нефтяным кризисом, и в 1990–2000-е годы – в связи с ростом озабоченности изменением климата. Это стимулировало соответствующие исследования и разработки (особенно в области транспорта, в том числе авиационного), но масштабного внедрения водородных технологий не происходило. Положение стало меняться по мере того, как все больше стран поддерживали концепцию безуглеродной энергетики будущего, осознавая при этом, что осуществить энергетический переход с использованием лишь возобновляемых источников энергии невозможно. Важнейшей составляющей этого перехода стал водород, как высокоэффективный и экологически чистый вид топлива [1].

Следуя мировой тенденции к декарбонизации экономики, формируемой Парижским соглашением по климату, правительство России 12 октября 2020 года приняло план мероприятий – «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года» [2]. Так, к 2024 году предусмотрена реализация ряда пилотных проектов, направленных в том числе на разработку, изготовление и применение установок по производству водорода без выбросов углекислого газа; разработку,

изготовление и испытание газовых турбин на метано-водородном топливе; создание опытного образца железнодорожного транспорта на водороде и опытных полигонов низкоуглеродного производства водорода на предприятиях по переработке углеводородного сырья или объектах добычи природного газа.

Возможность широкого применения альтернативных топлив, даже самых энергоэффективных (с точки зрения получения работы или тяги) и экологически безопасных, необходимо рассматривать еще и с учетом энергозатрат на их производство, а в случае газообразных топлив – затрат на их сжижение и хранение. Данная статья посвящена оценке таких затрат, которая в конечном счете и должна определить дальнейшую судьбу водорода как топлива (энергоносителя).

Самый простой, но наименее эффективный способ получения водорода – электролиз воды. Для оценки энергетических затрат на производство жидкого водорода электролизом воды были использованы следующие исходные данные:

– затраты энергии на производство газообразного водорода 75,0 кВт·ч/кг [3];

– затраты энергии на сжижение водорода 45,0 МДж/кг [4];

– затраты энергии на хранение сжиженного водорода 10,5 кВт·ч/кг [4];

– стоимость авиационного керосина (ТС-1, на 2020 год) 37,0 руб/кг;

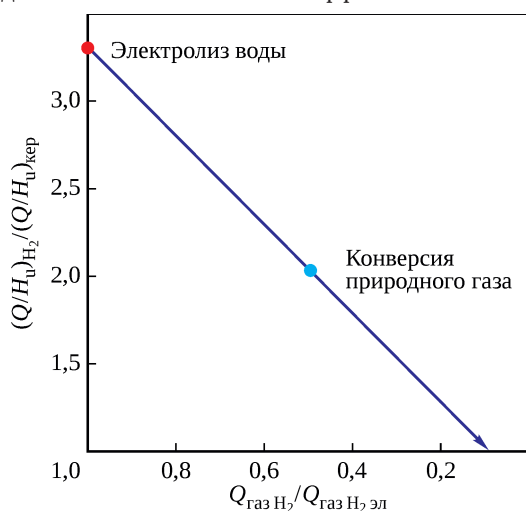
– стоимость электроэнергии для промышленности (на 2020 год) 3,5 руб/(кВт·ч).

Исходя из представленных данных, получим соответствующие значения энергетических затрат на его производство (в газообразном виде), ожижение и хранение:  $Q_{пр\ H_2} = 270,0$  МДж/кг,  $Q_{ож\ H_2} = 45,0$  МДж/кг,  $Q_{хр\ H_2} = 37,8$  МДж/кг. Суммарные затраты энергии составят  $Q_{\Sigma\ H_2} = 352,8$  МДж/кг.

Оценить затраты энергии на производство 1 кг авиационного керосина можно на основании его стоимости и цены электроэнергии (на 2020 год). Они составят  $Q_{\Sigma\ кер} = 38,06$  МДж/кг. Отметим, что подобная оценка энергетических затрат на производство, опирающаяся на некий базовый уровень, в частности стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, вполне корректна, поскольку в стоимость производства как топлива, так и электроэнергии входят и прочие расходы (финансовые затраты), однако их долю в одном и другом случае можно считать близкой.

Водород и керосин обладают разной теплотворной способностью ( $H_u$ ), и для корректного сравнения энергетических затрат на их производство необходимо отнести этот показатель к  $H_u$ : для водорода  $(Q/H_u)_{H_2} = 2,94$  ( $H_{u\ H_2} = 120,0$  МДж/кг), для авиационного керосина  $(Q/H_u)_{кер} = 0,888$  ( $H_{u\ кер} = 42,85$  МДж/кг). Таким образом, выработка водородного топлива посредством электролиза воды требует почти в 3,5 раза больше энергии, чем производство традиционного авиационного топлива.

Оценки показывают, что основные энергетические затраты приходятся на производство газообразного водорода. Процессы ожижения водорода известны, и кардинального повышения их эффективности не ожи-



**Рис. 1.** Зависимость энергетических затрат на производство, ожижение и хранение жидкого водорода от доли энергетических затрат на производство газообразного водорода

дается, как и успехов в области технологий хранения (транспортировки), пока не разработаны водородостойкие материалы почти с нулевой теплопроводностью.

На рис. 1 показано изменение относительных затрат энергии на производство, ожижение и хранение жидкого водорода по отношению к авиационному керосину (ТС-1) в зависимости от снижения доли энергетических затрат на производство газообразного водорода (к электролизному уровню) при постоянных затратах на ожижение и хранение. Только десятикратное снижение энергозатрат на производство газообразного водорода (с 75,0 до 7,5 кВт·ч/кг) позволит ему сравняться по относительной энергетической эффективности с авиационным керосином.

Современное производство водорода основано главным образом на паровой конверсии природного газа, его доля составляет около 85% [4]. По оценкам [5], стоимость производства газообразного водорода конверсионным способом составит 1,2...2,6 долл/кг, что при курсе в 75 руб/долл составит 90...195 руб/кг. Проведя аналогичные преобразования (исходя из стоимости электроэнергии), получим оценку энергетических затрат при производстве газообразного водорода – 25,7...55,7 кВт·ч/кг, или 93...200 МДж/кг, что составляет 34...74% затрат на электролизное производство. В среднем эта величина составит ~54%. Таким образом, даже при современном уровне производства водорода в энергетической эффективности он почти в два раза уступает авиационному керосину (см. рис. 1). Необходимо отметить, что при таком способе получения газообразного водорода выбросы  $CO_2$  с учетом потерь природного газа на магистральных трубопроводах и в процессе выработки электроэнергии в энергосистеме достигают 10 кг на килограмм произведенного водорода [5].

По энергетическим затратам на производство интересно сопоставить водород и керосин с другими жидкими (сжиженными) углеводородными и водородо-содержащими топливами. Рассмотрим следующие топлива (стоимость – на 2020 год):

– сжиженный природный газ (СПГ), состоящий на 85...92% из метана, стоимостью ~60,0 руб/кг ( $H_{u\ СПГ} = 50,1$  МДж/кг);

– сжиженное пропан-бутановое топливо (СПБТ), содержащее 80% пропана и 20% бутана, стоимостью ~27,0 руб/кг ( $H_{u\ СПБТ} = 46,25$  МДж/кг);

– сжиженный аммиак стоимостью ~12,0 руб/кг ( $H_{u\ NH_3} = 18,63$  МДж/кг);

– авиационное сконденсированное топливо (АСКТ) ориентировочной стоимостью ~18,0...19,0 руб/кг ( $H_{u\ АСКТ} = 45,2$  МДж/кг) [6].

Расчет энергетических затрат на производство этих топлив проводился как для керосина (см. выше). И в этом ряду производство водородного топлива (посредством

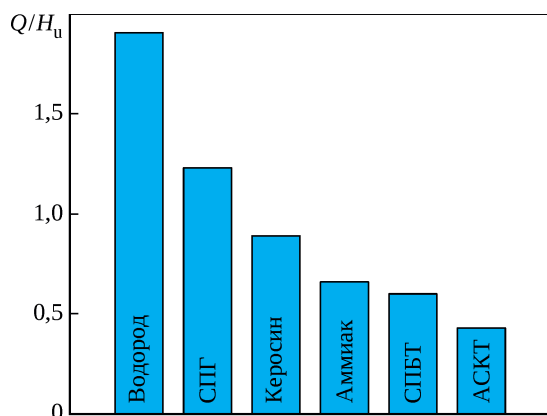


Рис. 2. Энергозатраты на производство различных видов топлива

конверсии природного газа) наиболее энергетически затратное (с этой точки зрения и менее экологичное), а наименее энергозатратным является производство АСКТ (рис. 2).

Приведенные оценки показывают, что эффективность широкомасштабного применения того или иного вида топлива необходимо оценивать не только с точки зрения его непосредственной энергоэффективности, но и с учетом дополнительного фактора – энергетических затрат на его производство. Отметим, что в данных оценках не учитывался еще один немаловажный фактор –

транспортировка топлива, это дополнительно увеличит энергозатраты, особенно в случае криогенных топлив.

Возможность использования нетрадиционных (возобновляемых) источников энергии для производства газообразного водорода, таких как солнечный свет, приливы и пр., сегодня и в ближайшей перспективе не решит этой проблемы, поскольку это связано со значительными финансовыми затратами на сооружение и обслуживание таких «энергетических фабрик», что, естественно, отразится на стоимости конечного продукта. Более того, широкомасштабное применение водорода потребует создания новой топливной инфраструктуры, что также достаточно дорого.

Таким образом, на сегодняшний день да и на ближайшую перспективу переход на водородное топливо крайне энергозатратен и его широкое применение необходимо считать преждевременным.

Однако нельзя не отметить отсутствие альтернативы применению водородного топлива для решения локальных задач. Так, высокий уровень теплотворной способности и, главное, огромный хладоресурс жидкого водорода являются определяющими при выборе топлива для силовых установок высокоскоростных летательных аппаратов, в том числе перспективных воздушно-космических самолетов и самолетов-разгонщиков авиационно-космических систем.

## Литература

1. Мастепанов А.М. Водородная энергетика России: состояние и перспективы // Энергетическая политика. 2020. № 12 (154). С. 55–65.
2. Правительство РФ утвердило план мероприятий по развитию водородной энергетике // Инновации Росатома : сайт / госкорпорация «Росатом». URL: <http://www.innov-rosatom.ru/news/detail/1643/> (дата обращения: 15.07.2022). Дата публ.: 22.10.2020.
3. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение : справочник / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова ; под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М. : Химия, 1989. 672 с.
4. Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В. Водород в энергетике. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 230, [2] с.
5. Сияняк Ю.В., Петров В.Ю. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства // Проблемы прогнозирования. 2008. № 3 (108). С. 35–46.
6. Янушпольский Д.В. Оценка возможной стоимости АСКТ при его производстве на установках небольшой производительности (1–10 тыс. тонн/год) : доклад, г. Москва, 22 мая 2014 г. / НИПИГАЗ. 17 с. Доклад на 7-й Международной выставке вертолетной индустрии HeliRussia 2014.

## References

1. Mastepanov A.M. Hydrogen power engineering in Russia: state and prospects. Energeticheskaja politika [Energy Policy]. 2020. No. 12(154). P. 55–65.
2. Pravitel'stvo RF utverdilo plan meropriatii po razvitiuu vodorodnoi energetiki [The Government of the Russian Federation has approved an action plan for the development of hydrogen energy industry]. Rosatom Innovations: website / Rosatom State Corporation. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/news/detail/1643/> (accessed: 15.07.2022). Publ. date: 22.10.2022.

- 
3. Gamburg D.Iu., Semenov V.P., Dubovkin N.F., Smirnova L.N. Vodorod. Svoistva, poluchenie, khranenie, transportirovanie, primeneniye: spravochnik [Hydrogen. Properties, preparation, storage, transportation, application: the handbook] edited by D.Iu. Gamburg, N.F. Dubovkin. Moscow: Khimiia [Chemistry], 1989. 672 p.
  4. Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tiul'pa V.V. Vodorod v energetike [Hydrogen in power engineering]. Yekaterinburg: Ural University Publishing House, 2014. 230, [2] p.
  5. Sinyak Yu.V., Petrov V.Yu. Cost prospects for hydrogen centralized production. Studies on Russian Economic Development. 2008. Vol. 19, no. 3. P. 239–247.
  6. Ianushpol'skii D.V. Otsenka vozmozhnoi stoimosti ASKT pri ego proizvodstve na ustanovkakh nebol'shoi proizvoditel'nosti (1–10 tysyach tonn/god) : doklad [Assessment of potential cost of condensed aviation fuel with its production at low capacity installations (1–10 thousand tons per year): presentation]. Moscow. May 22, 2014. NIPIGAS. 17 p. Presentation at the 7th International Helicopter Industry Exhibition HeliRussia 2014.

*Материалы получены редакцией 05.10.2022*