

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 629.769.2.004.4:656.5.03

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТИПА СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА В СУДОВОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Горбов В.М., Карпов М.А.,

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев

Проведён сравнительный анализ массогабаритных характеристик различных способов хранения водорода как топлива для СЭУ. Получены зависимости массы и объёма топливной системы от мощности энергоустановки. Разработаны рекомендации по выбору способа хранения либо получения водорода на борту судна.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, электрохимический генератор (ЭХГ), интерметаллидные соединения (ИМС).

Введение. Понятие «водородная энергетика» появилось в 1970-е годы в разгар энергетического кризиса, охватившего страны Западной Европы и США. И если в то время основной проблемой считалось сокращение мировых запасов углеводородных энергоносителей, то в настоящее время на первый план выдвигается угроза стремительно нарастающего на планете экологического кризиса. Поэтому использование водорода в качестве энергоносителя рассматривается в большинстве проектов как фактор снижения экологического давления на окружающую среду [1].

Одним из наиболее эффективных способов использования водорода в судовых условиях является применение электрохимических генераторов (ЭХГ) на основе топливных элементов. В этом случае возможно достижение нулевой эмиссии судовой энергетической установки (СЭУ) малой мощности в густонаселённых районах плавания с повышенными экологическими требованиями и с приемлемыми массогабаритными показателями топливной системы [2].

Особенностями СЭУ, использующей водород как топливо, являются системы получения (при необходимости), хранения и использования водорода. Технологическая часть СЭУ с электрохимическим генератором (ЭХГ) состоит из системы хранения и/или получения топлива и окислителя, электрохимического генератора и системы утилизации продуктов реакции и побочного тепла [3]. Анализ результатов применения ЭХГ на судах позволяет представить потенциал их использования в зависимости от диапазона мощности СЭУ следующим образом:

1) 1...50 кВт – муниципальные суда (малые пассажирские суда, до 50 чел.);

2) 50...500 кВт – главные энергетические установки судов внутреннего плавания, вспомогательные электростанции морских судов;

3) >500 кВт – энергетические установки морских судов, в том числе и пропульсивные.

Актуальность исследования. Важной проблемой реализации СЭУ с ЭХГ является выбор рационального способа хранения или получения водорода на борту. Критериями для выбора варианта хранения водорода на борту являются массогабаритные и стоимостные показатели, вопросы безопасности, а также наличие специальной береговой инфраструктуры. К настоящему времени существуют такие способы хранения водорода на борту: газобаллонное (в газообразном состоянии), криогенное (в охлажденном состоянии), интерметаллидное (в связанном состоянии) [4]. Выбору способа хранения на борту различных судов должен предшествовать анализ массогабаритных показателей системы в зависимости от мощности СЭУ.

Постановка задачи. Целью настоящей статьи является определение зависимостей массогабаритных показателей систем хранения водорода различных типов в СЭУ от мощности ЭХГ, сопоставление полученных результатов с системами хранения традиционных топлив для СЭУ и принятие решений по выбору систем хранения водорода на борту.

Результаты исследования. Рассмотрим особенности топливной системы для первого мощностного ряда СЭУ с ЭХГ. В качестве примера принимаем ЭХГ фирмы NedStack PS50 [5] со следующими техническими характеристиками (табл. 1)

Таблица 1. Технические характеристики ЭХГ NedStack PS50

Максимальная нагрузка	120 кВт (постоянный ток)
Номинальная нагрузка	50– 72 кВт
КПД	55–57 % (батареи ТЭ) 48 – 50 % (ЭХГ)
Чистота H ₂	99.95 %
Удельный расход H ₂	660 л/кВт·час
Габариты	1400 × 800 × 600 мм
Масса	600 кг

Длительность рейса таких судов, как правило, не превышает 12 часов. Следовательно, расход водорода для работы ЭХГ на 1 рейс судна такого типа составит:

$$G = N_e \cdot \tau \cdot g_e = 50 \cdot 12 \cdot 660 = 396000 \text{ л} = 35,6 \text{ кг}, \quad (1)$$

где N_e – эффективная мощность ЭХГ, кВт; τ – длительность рейса, ч; g_e – удельный эффективный расход топлива ЭХГ, л/кВт·час, кг/кВт·час.

Для хранения на борту судна такого количества газообразного водорода в баллонах TriShield фирмы Quantum Tech [6] под давлением 70 МПа с аккумулирующей способностью 5,2% по массе понадобится:

$$n = \frac{G}{\rho_{H_2сж.} \cdot V_{бал.}^{вн.}} = \frac{35,6}{36,1 \cdot 0,034} = 29,0, \quad (2)$$

где $\rho_{H_2сж.}$ – плотность водорода сжатого до 70 МПа, кг/м³; $V_{бал.}^{вн.}$ – внутренний объём баллона, м³.

Для обеспечения рейса указанного судна необходимо 29 таких баллонов. При этом минимальные массогабаритные параметры системы хранения топлива составят:

$$V = n \cdot V_{бал.} \cdot k_{всж.} = 29 \cdot 0,04 \cdot 1,2 = 1,39 м^3, \quad (3)$$

где $V_{бал.}$ – объём баллона, м³; $k_{всж.} = 1,2$ – коэффициент, учитывающий объём, занимаемый арматурой, трубопроводами и другими навешанными устройствами в системе хранения сжатого водорода.

$$m = n \cdot m_{бал.} \cdot k_{мсж.} = 29 \cdot 28 \cdot 1,1 = 893,2 кг, \quad (4)$$

где $m_{бал.}$ – масса баллона, кг; $k_{мсж.} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий массу арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств системы хранения сжатого водорода.

В случае хранения охлажденного водорода, при использовании баллонов фирмы Linde [7] понадобится следующие их количество:

$$n = \frac{G}{\rho_{H_2ож.} \cdot V_{бал.}^{вн.}} = \frac{35,6}{70,8 \cdot 0,12} = 4,19, \quad (5)$$

где $\rho_{H_2ож.}$ – плотность охлажденного водорода, кг/м³.

Массогабаритные показатели системы хранения охлажденного водорода (5 баллонов) составят:

$$V = n \cdot V_{бал.} \cdot k_{вож.} = 5 \cdot 0,14 \cdot 1,4 = 0,98 м^3, \quad (6)$$

где $k_{вож.} = 1,2$ – коэффициент, учитывающий объём, занимаемый арматурой, трубопроводами и другими навешанными устройствами в системе хранения охлажденного водорода.

$$m = n \cdot m_{бал.} \cdot k_{тож.} = 5 \cdot 90 \cdot 1,1 = 495 кг \quad (7)$$

где $k_{тож.} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий массу арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств системы хранения охлажденного водорода.

Компанией Техасо Ovonic Hydrogen System [8] предложены баллоны для гидридного способа хранения водорода. При использовании такой технологии понадобится следующее количество баллонов:

$$n = \frac{G}{\varpi_{H_2}} = \frac{35,6}{3} = 11,9, \quad (8)$$

где ϖ_{H_2} – ёмкость баллона по водороду, кг.

Занимаемый системой, состоящей из 12 баллонов, объем составит:

$$V = n \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H \cdot k_{v.б.гидр.} = 12 \cdot 3,14 \cdot 0,164^2 \cdot 0,84 \cdot 1,1 = 0,93 \text{ м}^3, \quad (9)$$

где R – радиус баллона, м; H – высота баллона, м; $k_{v.б.гидр.} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий объём, занимаемый арматурой, трубопроводами и другими навешанными устройствами в гидридной системе хранения водорода.

Масса системы хранения водорода в интерметаллидных соединениях (ИМС):

$$m = n \cdot m_{бал.} \cdot k_{m.б.гидр.} = 12 \cdot 190 \cdot 1,02 = 2325,6 \text{ кг}, \quad (10)$$

где $k_{m.б.гидр.} = 1,02$ – коэффициент, учитывающий массу арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств гидридной системы хранения водорода.

К существенным достоинствам гидридного способа хранения водорода относится возможность изготовления аккумуляторов различной геометрической формы, что позволяет существенно улучшить габаритные показатели системы. Так, в случае использования интерметаллидов LaNi_5 массогабаритные показатели топливной системы составят [9]:

$$m = \frac{G}{\theta_{H_2}} \cdot k_{m.гидр.} = \frac{35,6}{0,0145} \cdot 1,1 = 2699,8 \text{ кг} \quad (11)$$

где θ_{H_2} – массовая доля сорбируемого водорода; $k_{m.гидр.} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий массу ёмкости для ИМС, арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств системы хранения водорода в ИМС.

В случае использования в качестве ИМС TiFe :

$$m = \frac{G}{\theta_{H_2}} \cdot k_{m.гидр.} = \frac{35,6}{0,019} \cdot 1,1 = 2060,4 \text{ кг} \quad (12)$$

Занимаемый системой хранения водорода объём при использовании ИМС – LaNi_5 составит:

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{LaNi}_5}} \cdot k_{v.гидр.} = \frac{2454,4}{8250} \cdot 1,3 = 0,425 \text{ м}^3 \quad (13)$$

где ρ_{LaNi_5} – плотность интерметаллида LaNi_5 , кг/м³; $k_{v.гидр.} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий объём ёмкости для ИМС, арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств системы хранения водорода в ИМС;

При использовании в качестве ИМС TiFe :

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{TiFe}}} \cdot k_{v.гидр.} = \frac{1873,1}{5650} \cdot 1,3 = 0,474 \text{ м}^3 \quad (14)$$

где ρ_{TiFe} – плотность интерметаллида TiFe , кг/м³.

Для сравнения приведем характеристики системы хранения топлива традиционной дизель-генераторной установки D7AT фирмы Volvo Penta [10] мощностью 70-108 кВт. Расход дизельного топлива на рейс рассматриваемого судна с дизель-электрической установкой составит:

$$G = N_e \cdot \tau \cdot g_e = 50 \cdot 12 \cdot 0,226 = 135,6 \text{ кг}, \quad (15)$$

Минимальные массогабаритные характеристики топливной системы дизель-генераторной установки приближенно могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$V = \frac{G}{\rho_{ДТ}} \cdot k_{v.ДТ} = \frac{135,6}{840} \cdot 1,3 = 0,210 \text{ м}^3, \quad (16)$$

где $\rho_{ДТ}$ – плотность дизельного топлива, кг/м³; $k_{v.ДТ} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий объём топливной ёмкости, арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств системы хранения дизельного топлива.

Масса системы хранения дизельного топлива составит:

$$m = G \cdot k_{m.ДТ} = 135,6 \cdot 1,3 = 176,3 \text{ кг}, \quad (17)$$

где, $k_{m.ДТ} = 1,3$ – коэффициент, учитывающий массу топливной ёмкости, арматуры, трубопроводов и других навешанных устройств системы хранения дизельного топлива.

Коэффициенты $k_{всж.}, k_{тсж.}, k_{вож.}, k_{тож.}, k_{v.б.гидр.}, k_{m.б.гидр.}, k_{m.гидр.}, k_{v.гидр.}, k_{v.ДТ}$ приняты в результате анализа характеристик и особенностей конструкции систем хранения топлива фирм-производителей.

Сопоставление массогабаритных характеристик систем хранения водорода на борту судна от мощности ЭХГ с показателями дизель-электрической установки (ЭУ), приведены на рисунках 1, 2.

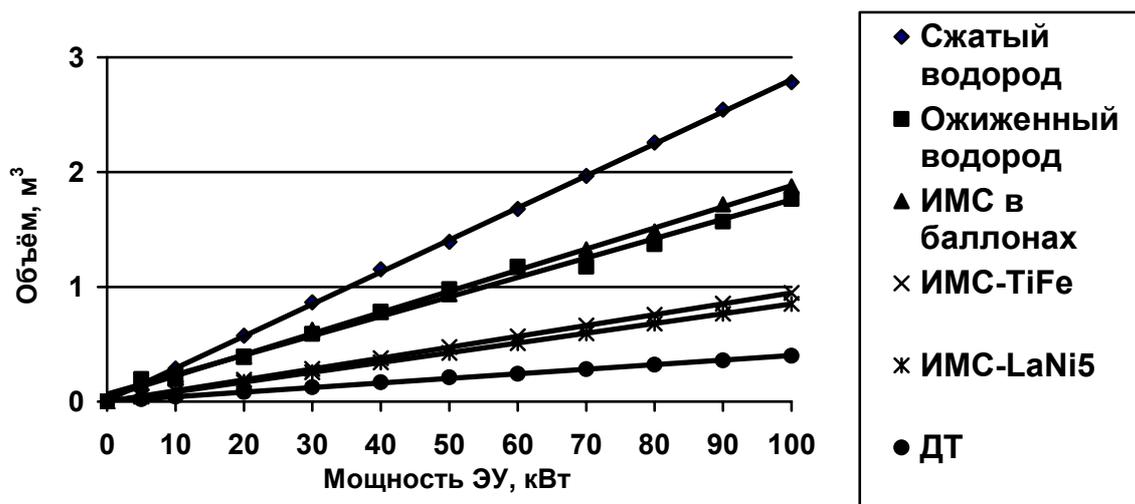


Рисунок 1. Зависимость габаритных размеров системы хранения топлива от мощности энергетической установки

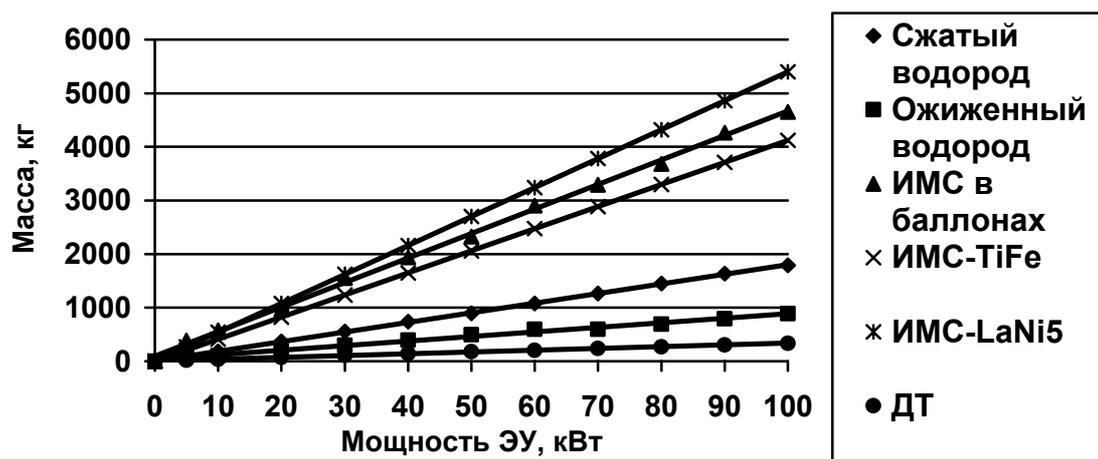


Рисунок 2. Зависимость массы системы хранения топлива от мощности энергетической установки

Выводы. Наилучшими габаритными показателями среди рассматриваемых систем хранения водорода обладает гидридный способ, но его широкому применению препятствует высокая стоимость ИМС порядка \$50 за 1 кг для LaNi_5 и \$25/кг для TiFe и невысокая водородная сорбционная способность ИМС по массе. Хранение водорода в охлажденном состоянии на борту судна усложнено тем фактом, что в жидком состоянии водород находится в очень узком диапазоне низких температур: от точки кипения 20 К до точки замерзания 17 К, что требует дополнительного сложного оборудования в составе энергетической установки и высоких эксплуатационных затрат энергии. Хранение газообразного водорода позволяет достичь минимальных эксплуатационных затрат, но при этом данный способ хранения имеет наибольшие габаритные показатели. Массогабаритные параметры этих систем значительно превышают системы хранения традиционных углеводородных топлив, но за последние 10 лет эти показатели улучшены вдвое. Для транспортных ЭЭУ мощностью выше 100 кВт технически и экономически нецелесообразно использовать хранимый на борту водород в качестве топлива, в виду высоких массогабаритных показателей, больших эксплуатационных затрат и необходимости более развитой береговой инфраструктуры. Для таких установок предполагается производство водорода непосредственно на борту судна конверсией углеводородных ископаемых топлив, электролизом воды или гидролизом металлов, либо использование ЭЭУ с высокотемпературными ТЭ с предварительной подготовкой топлива. Проведенный анализ может использоваться при выборе систем хранения водорода на стадии проектирования судовой электрохимической энергоустановки (ЭЭУ) для малых судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А.Л. Экономические и технические проблемы развития водородного транспорта с целью улучшения экологического состояния

окружающей среды // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – ISJAEE 2004. – № 1(9). – С. 14–18.

2. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 280 с.

3. Matthew M. Mench. Fuel Cell Engines. – Willey: USA, 2008. – 528 p.

4. Fuel cell AIP System // Jane's Navy International, June 2005. Vol. 110, No. 5, P. 20, 22–24.

5. NedStack PS50 PEM Fuel Cell System [Электронный ресурс] / Terms & Conditions, 2002–2010. – Режим доступа:

http://www.fuelcellmarkets.com/nedstack/products_and_services/3,1,1710,17,14207.html.

6. Hydrogen Storage [Электронный ресурс] / Quantum, 2010. – Режим доступа:

<http://www.qttw.com/products/haft/hydrostorage.php>.

7. Hydrogen Storage [Электронный ресурс] / Linde Gas, 2009. – Режим доступа:

http://www.linde-gas.com/international/web/lg/com/like/gcom30.nsf/docbyalias/hydrogen_storage.

8. Hydrogen: Ovonic Materials Division – Canister Refilling [Электронный ресурс] / Energy Conversion Devices, 2001–2010. – Режим доступа:

http://ovonics.com/ib_hy_hydrogen_canisterrefilling.cfm

9. Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. – М.: Химия, 1989. – 672 с.

10. Volvo Penta Russia [Электронный ресурс] / Product bulletin D7A TA Genset, 2009. – Режим доступа:

http://www.volvopenta.com/volvopenta/russia/ru-ru/marine_commercial_engines/engines/genset_range/Pages/d7a_ta_he.aspx

Горбов В.М., Карпов М.О. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ТИПУ СИСТЕМИ ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ У СУДНОВІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Проведено порівняльний аналіз масогабаритних характеристик різних способів зберігання водню як палива для СЕУ. Отримано залежності маси та об'єму паливної системи від потужності енергетичної установки. Розроблені рекомендації щодо вибору способу зберігання або отримання водню на борту судна.

Ключові слова: суднові енергетичні установки, електрохімічний генератор (ЕХГ), інтерметалідні сполуки (ІМС).

Gorbov V.M., Karpov M.A. SUBSTANTIATION OF THE SYSTEM TYPE CHOICE FOR HYDROGEN STORAGE IN THE SHIP'S POWER PLANT OF SMALL POWER

A comparative analysis of mass and volume characteristics of various modes of hydrogen storage, as a fuel for ship power plant, was carried out. The dependence diagrams of mass and volume of the fuel storage system versus power plant capacity are considered. Recommendations on choice of the mode of onboard hydrogen storage or its production are developed.

Key words: ship power plants, electrochemical generator (ECHG), intermetallide joints.