

УДК 661.96.001

А.А. Сирота, канд. техн. наук, А.И. Чураков, инж.

ИСПЫТАНИЯ СУДОВОГО ВЫСОКООБОРОТНОГО ДВС С ДОБАВКАМИ ВОДОРОДА

Постановка проблемы

Эффективность современных судовых ДВС достаточно высокая: удельный расход топлива в них составляет менее 160 г/(кВт·ч) и зависит от термодинамического совершенства цикла, типа двигателя, конструкции и других его параметров. Однако тепловые потери с уходящими газами остаются довольно значительными, а дальнейшее их сокращение путем более глубокой утилизации теплоты ограничивается опасностью возникновения сернистой коррозии, особенно в случае применения тяжелых топлив. Поэтому помимо традиционных могут быть использованы и новые нетрадиционные методы повышения эффективности ДВС.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности ДВС является применение водорода. Этот газ обладает уникальными свойствами: высокими скоростью распространения пламени, теплотворной способностью, хорошими диффузионными и каталитическими (интенсифицирующими процесс горения) свойствами, профилактической способностью (возможностью использования для очистки камеры сгорания и проточной части от нагара) благодаря экологической чистоте продуктов сгорания водорода. Вследствие замкнутого характера цикла его производства (из воды) и использования (с образованием воды как продукта его сгорания) водо-

род является неисчерпаемым источником энергии.

Анализ известных решений проблемы, выделение нерешенных задач, постановка цели и задач исследования

В настоящее время широкое применение водорода в судовой энергетике сдерживается значительной стоимостью его получения и сложностями хранения и транспортировки [1, 8], обусловленными такими его свойствами, как высокие самовоспламеняемость и взрывоопасность.

Однако высокая стоимость производства водорода не является решающей, поскольку количество водорода, используемого в качестве добавок, очень мало. Так, даже небольшие добавки водорода (0,1...2 % по массе) к топливу в качестве катализатора интенсифицируют процесс горения и повышают эффективность работы двигателя.

Известны три способа хранения водорода: в газообразном состоянии при высоком давлении в емкостях, в жидком состоянии при очень низкой температуре (20 К) и с применением гидридообразующих материалов как средства для аккумуляирования, компримирования и сепарации водорода. В качестве гидридообразующих материалов используют металлы и интерметаллические соединения. Некоторые их особенности приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные показатели способов хранения водорода

Способ хранения водорода	Масса, кг/кг H ₂	Объем, л/кг H ₂	Оборудование	Степень опасности хранения
Газообразный ($p = 15$ МПа)	120...150	85...90	Простое	Высокая
Жидкий ($p = 0,2$ МПа, $T = 20$ К)	15...20	20...25	Сложное	Средняя
В гидридном аккумуляторе [TiFe] ($p = 0,2$ МПа, $T = 20$ К)	40...50	25...30	Среднее	Безопасная

Перспективным представляется применение гидридных систем (как более простых и безопасных)

для хранения водорода, который может быть использован в качестве добавок к основному топливу, что

позволяет повысить эксплуатационную эффективность судовых энергетических установок (СЭУ) и их экологическую безопасность. Это достигается благодаря способности водорода интенсифицировать сгорание углеводородных топлив и воздействовать на термодинамическую эффективность рабочего цикла двигателей [1, 5–7]. Так, добавка водорода 0,1 % массового расхода дизельного топлива повышает экономичность работы двигателей на 5...7 %, что эквивалентно снижению удельного расхода топлива на 8...12 г/(кВт·ч). Кроме того, выбросы сажи снижаются на 40...60 %, окислов азота – на 30...40% [9].

Целью исследования было изучение влияния водородных добавок к топливу на эффективность работы высокооборотных двигателей внутреннего сгорания без наддува.

Экспериментальное исследование работы ДВС на водородных добавках и анализ его результатов

Автором были проведены экспериментальные исследования с целью изучения влияния водородных добавок к углеводородному топливу на эффективность двигателей. Испытывался судовой высокооборотный дизель без наддува номинальной мощностью двигателя 29,4 кВт и номинальной частотой вращения коленчатого вала 1500 мин⁻¹. Небольшие добавки водорода подавались в двигатель со свежим зарядом воздуха через всасывающий коллектор. Расход газообразного водорода измерялся ротаметром. Испытания двигателя проводились по двум нагрузочным характеристикам, по которым работают дизель-генераторы, при постоянных частотах вращения коленчатого вала: $n = 1500$ мин⁻¹ (номинальная) и 920 мин⁻¹ (минимально устойчивая).

На каждом режиме работы дизеля, при различных мощностях p_e , кВт, определялся удельный эффективный расход дизельного топлива без применения добавок водорода g_e , г/(кВт·ч) и с добавками водорода g_e^H . На каждом режиме все замеры выпол-

нялись по несколько раз, а затем усреднялись.

Расход водорода g_H , г/(кВт·ч), изменялся от 0,5 до 2 % расхода дизельного топлива, т.е. составлял $(0,005...0,02)g_e$ и в процентах определялся как

$$m_H = g_H/g_e \cdot 100, \%$$

Кроме того, на каждом режиме рассчитывался приведенный удельный эффективный расход топлива на двигатель по следующей зависимости

$$b_e = g_e^H + 2,84g_H, \text{ г/(кВт·ч)},$$

где коэффициент 2,84 представляет собой отношение значений низшей удельной теплоты сгорания водорода и дизельного топлива.

Эффективный КПД двигателя определялся следующим образом:

– при работе без добавок водорода как

$$\eta_e = 3600 \cdot 10^5 / (g_e \cdot Q_n), \%$$

– при работе с добавками водорода как

$$\eta_e^H = 3600 \cdot 10^5 / (b_e \cdot Q_n), \%$$

где Q_n – низшая удельная теплота сгорания дизельного топлива, которая принимается равной 42700 кДж/кг.

Изменение удельного эффективного расхода топлива на режиме определялось как

$$\Delta g_e = g_e - g_e^H, \text{ г/(кВт·ч)},$$

а относительная величина как

$$\overline{\Delta g_e} = \Delta g_e / g_e \cdot 100 \%$$

Аналогично определялось и изменение величины эффективного КПД двигателя за счет добавок водорода

$$\Delta \eta_e = \eta_e - \eta_e^H, \%$$

Зависимости изменения удельного эффективного расхода топлива Δg_e дизеля 2Ч 13,5/14 с разными добавками водорода к топливу при работе по нагрузочной характеристике с частотой вращения коленчатого вала $n = 1500$ и 920 мин⁻¹ приведены на рис. 1, а эффективного КПД $\Delta \eta_e$ – на рис. 2.

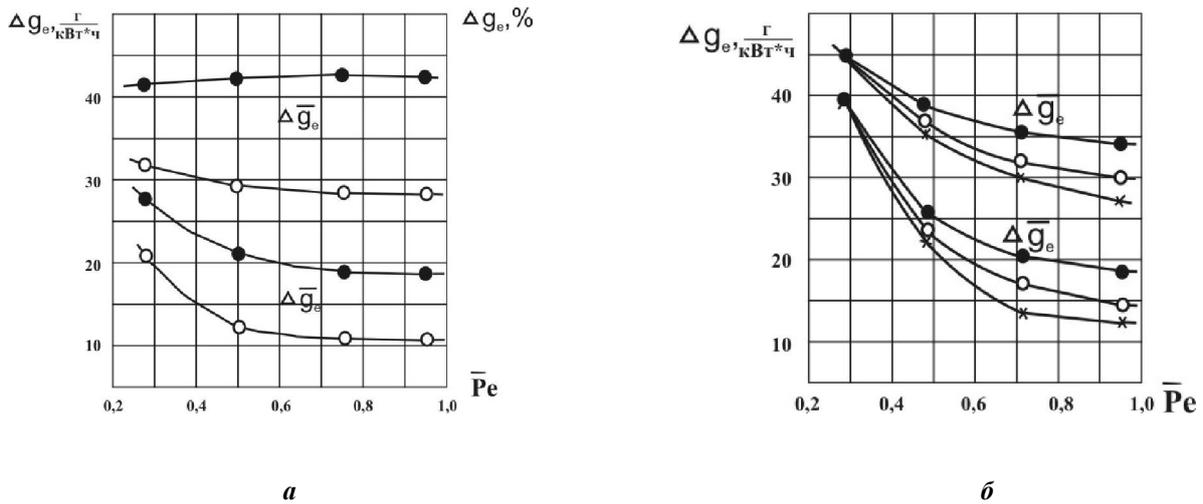


Рис. 1. Изменение удельного эффективного расхода топлива Δg_e дизеля с добавками m_H водорода к топливу при работе по нагрузочной характеристике с частотой вращения коленвала: **а** – $n = 1500$ об/мин; **б** – $n = 920$ об/мин; —x— $m_H = 0,5\%$; —O— $m_H = 1\%$; —●— $m_H = 2\%$

Анализ результатов испытаний двигателя показывает, что экономия дизельного топлива Δg_e ($\Delta \bar{g}_e$) за счет применения добавок водорода зависит от частоты вращения коленвала, при которой он работает по нагрузочной характеристике, режима p_e и от величины m_H .

При работе с частотой вращения коленвала $n = 1500$ мин⁻¹ (рис. 1,а) с добавками водорода $m_H = (1...2)\%$ удельный эффективный расход топлива на номинальном режиме ($p_e = 0,95$) снижается от 11,5 до 18,9 г/(кВт·ч), а на частичных режимах ($p_e = 0,28$) – до 28 г/(кВт·ч) или соответственно на (4,7...7,5)%.

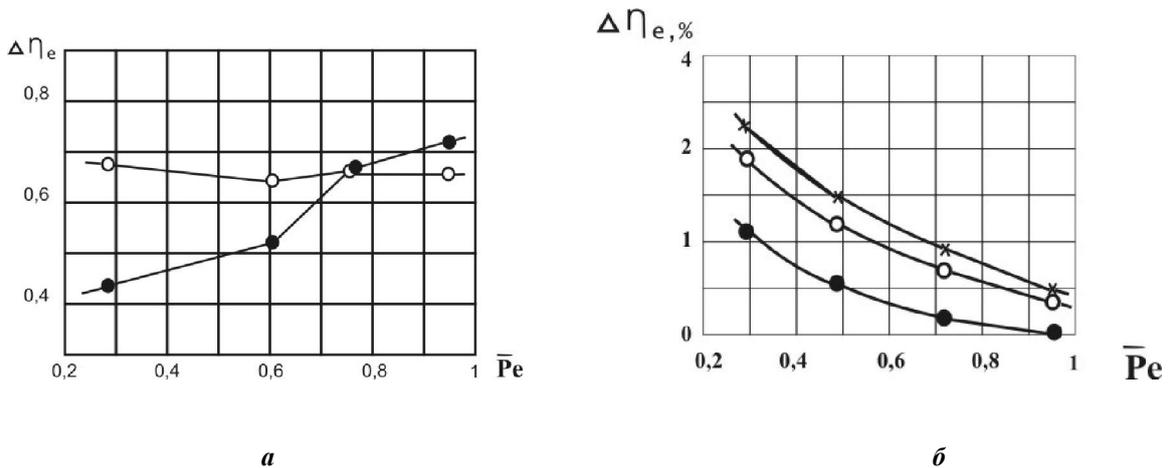


Рис. 2. Изменение эффективного КПД $\Delta \eta_e$ дизеля с добавками водорода m_H к топливу при работе по нагрузочной характеристике с частотой вращения коленвала: **а** – $n = 1500$ об/мин; **б** – $n = 920$ об/мин; —x— $m_H = 0,5\%$; —O— $m_H = 1\%$; —●— $m_H = 2\%$

Относительное повышение эффективного КПД двигателя $\Delta \eta_e$ при $m_H = 1\%$ на всех режимах работы двигателя остается практически постоянной величиной, примерно равной 0,65 %, а при $m_H = 2\%$ значение $\Delta \eta_e$ снижается от 0,72 до 0,43 % (Рис. 2,а). В

случае $p_e = 0,75$ положительный эффект от применения добавок при $m_H = 1$ и 2 % становится равным. Поэтому можно сделать вывод о том, что увеличение m_H более 1 % не приводит к существенному повышению эффективности работы двигателя даже на

режимах, близких к номинальному.

При работе двигателя с частотой вращения коленвала $n = 920 \text{ мин}^{-1}$ (рис. 1,б и 2,б) с добавками водорода $m_H = (0,5...2) \%$ экономия дизельного топлива Δg_e и $\overline{\Delta g_e}$ увеличивается соответственно с 6,7 г/(кВт·ч) при $p_e = 0,95$ и $m_H = 0,5 \%$ до 34,7 г/(кВт·ч) при $p_e = 0,29$ и $m_H = 2 \%$, т.е. с 2,8 до 10 %. Как видно из рис. 1,а, на частичных режимах ($p_e < 0,5$) увеличение $m_H > 0,5 \%$ не оказывает заметного влияния на Δg_e .

Относительное изменение эффективного КПД двигателя $\Delta \eta_e$ увеличивается от 0 при $p_e = 0,95$ и $m_H = 2 \%$ до 2,3 % при $p_e = 0,29$ и $m_H = 0,5 \%$. Как видно из рис. 2,б, увеличение $m_H > 0,5 \%$ не приводит к повышению $\Delta \eta_e$.

Выводы и перспектива дальнейшего использования результатов

1. Применение небольших добавок водорода к топливу увеличивает эффективность работы четырехтактного высокооборотного двигателя до 2,3 %.

2. Более эффективным является использование водорода в качестве дополнительного топлива на режимах от холостого хода до $0,6p_e$, а также на переходных режимах.

3. К положительным эффектам, обусловленным применением добавок водорода, следует отнести также повышение маневренности и устойчивости работы двигателя на переходных и частичных режимах.

4. Проведенный анализ и экспериментальные исследования дают основание считать добавки водорода к основному дизельному топливу эффективным средством повышения экономичности работы двигателей СЭУ.

Список литературы:

1. Лебедь Н.Г., Тимошевский Б.Г., Беляков С.Ю. К вопросу об использовании гидридных аккумуляторов

водорода в судовых энергетических установках // Судостроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Киев – Одесса: Вища школа. – 1986. – С.73–79. 2. Тимошевский Б.Г., Беляков С.Ю. О выборе типа гидрида для аккумулятора водорода в составе судовых энергетических установок // Судовое энергомашиностроение: Сб. науч. тр.– Николаев: НКИ. – 1985. – С.24–30. 3. Беляков С.Ю., Тимошевский Б.Г. Развитие гидридных аккумуляторов водорода энергоустановок // Судовые энергетические установки: Сб. науч. тр.– Николаев: НКИ. – 1989. – С.73–84. 4. Тимошевский Б.Г., Беляков С.Ю., Шулежко С.В., Сирота А.А. Экспериментальные исследования гидридного аккумулятора водорода / Николаевский кораблестроительный институт.– Николаев, 1990. – 3 с. Деп. в ИФЖ 04.01.90 г., № 7190. 5. Тимошевский Б.Г., Тимофеев В.И., Сирота А.А., Гаврилков А.В. Глубокая утилизация вторичных энергоресурсов с помощью гидридных систем // Судостроительная промышленность. – 1990. – Вып.13. – С.15–21. 6. Timoshevsky B., Cui K., Timofeev V., Sirota., Beljakov S., Gao X. Energy saving hydride's systems for internal combustion engines // Journal of WUWTE. – 1992. – Vol. 3. – 7. – P. 34–39. 7. А.с. 1371112 СССР. Система питания водородом двигателя внутреннего сгорания / Лебедь Н.Г., Строков Н.Ф., Коган П.Б., Тимошевский Б.Г., Беляков С.Ю. – № 3953443; Заявлено 22.07.85. 8. Варшавский И.Л. Энергоаккумулирующие вещества и их свойства. – Киев: Наукова думка, 1980. 9. Матиевский Д.Д., Вагнер В.А. Осуществление присадки водорода к топливу и ее влияние на показатели работы дизеля // Двигателестроение. – Л.: Машиностроение, 1985. – № 2. – С. 53–56. 10. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.:Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.