

УДК 621.436

А. А. СИРОТА¹, Н. И. РАДЧЕНКО², Ю. Г. ЩЕРБАК¹¹ Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, г. Николаев, Украина² Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Украина

ЭКОНОМИЧНОСТЬ СУДОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ВИНТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ, С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕБОЛЬШИХ ДОБАВОК ВОДОРОДА К ДИЗЕЛЬНОМУ ТОПЛИВУ

В работе приведены результаты экспериментального исследования влияния небольших водородных добавок к основному топливу на экономичность среднеоборотных дизелей с наддувом небольшой мощности, работающих по винтовой характеристике. Определено, что применение небольших добавок водорода к основному топливу (0,04...0,12 %) для среднеоборотного дизеля 1Ч 20/27 приводит к повышению топливной экономичности работы двигателя; при этом абсолютная экономия топлива может достигать величины 14,5 г/(кВт·ч), а относительная – до 6 %. Добавки водорода 0,04...0,12 % к основному топливу дизеля повышают эффективность дизеля. Так, эффективность дизеля $\Delta\eta_e^{H_2}$ увеличивается на 2,0 % при добавках водорода $m_{H_2} = 0,1 \%$, а в относительных величинах $\Delta\eta_e^{-H_2}$ – на 6,0 %. Добавки водорода к основному топливу дизеля более эффективны на частичных нагрузках.

Ключевые слова: среднеоборотный дизель; добавки водорода; удельный расход топлива; экономия дизельного топлива; винтовая характеристика.

1. Анализ проблемы, постановка цели и задач исследования

При получении различных видов энергии происходит значительное загрязнение атмосферы. На сегодняшний день наиболее распространенными источниками механической энергии для транспортных средств являются двигатели внутреннего сгорания (ДВС). При их эксплуатации в атмосферу с отработавшими газами (ОГ) выбрасывается ряд токсичных соединений, что ведет к значительным изменениям в биосфере.

Большое влияние на загрязнение атмосферного воздуха оказывают дизельные двигатели, которые в настоящее время являются наиболее эффективными в энергетическом смысле тепловыми машинами. Так, при сгорании 1 кг дизельного топлива выделяется 80...100 г токсичных компонентов [1]. Имея значительно меньшие, по сравнению с бензиновыми двигателями выбросы СО и углеводородов, ОГ дизелей обладают достаточно высокой токсичностью из-за повышенного содержания оксидов азота, сажи и альдегидов.

В настоящее время вопросы, касающиеся экологической безопасности транспортных установок, считаются одними из приоритетных.

Одним из способов снижения токсичных веществ в ОГ дизелей является совершенствование процесса сгорания в его цилиндрах за счет подачи к

дизельному топливу небольших (по массе) добавок водорода.

Были проведены исследования рабочих процессов четырехтактных высокооборотных дизелей без наддува (2Ч 10,5/13, 2Ч 13,5/14) при подаче водорода в систему впуска воздуха.

Эти исследования показали, что даже небольшая добавка водорода вносит особенности в процесс сгорания. Так, при подаче 0,5...2,0 % водорода от массы дизельного топлива, снижается удельный эффективный расход топлива на 2...9 % [2 – 7]. Одновременно, в среднем на 35 % снижается содержание сажи и на 30...40 % окислов азота в ОГ [8], а при подаче 5 % водорода содержание окислов азота может уменьшиться в 2,4 раза [9]. В то же время, увеличение количества добавляемого водорода более 5...9 % снижает его эффективность как активирующей добавки.

Известно, что достаточно эффективные результаты по улучшению экологических показателей и топливной экономичности дизелей можно получить не только подачей добавок водорода со свежим зарядом воздуха, но и другими способами:

– подача газообразного водорода в цилиндры дизеля через клапан-форсунку на такте сжатия в период после закрытия клапанов до подачи дизельного топлива [9];

– подача газообразного водорода через специальную двухтопливную форсунку [8];

– подача газообразного водорода через специальное смесительное устройство, устанавливаемое перед топливной форсункой [10].

Перечисленные альтернативные способы подачи добавок водорода к дизельному топливу будут неоднозначно влиять на энергоэкономические показатели модернизированного двигателя (двигатель с системой подачи добавок водорода в его цилиндры).

С одной стороны, применение в судовых дизелях одного из перечисленных выше способов подачи водорода приведет к усложнению системы подачи топлива и, соответственно, удорожанию модифицированного дизеля, а с другой стороны, приведет к значительному уменьшению величины добавки водорода (в десятки раз), а значит и к сокращению эксплуатационных расходов на аккумулярование или производство водорода.

Так, по данным [1], непосредственное добавление к дизельному топливу всего 0,1 % водорода приводит к снижению его затрат в среднем на 5...7 %, выбросов оксидов азота на 30...40 %, а сажи – 30...50 %.

Все известные нам литературные данные, а также авторские исследования по применению добавок водорода к топливу как со свежим зарядом воздуха [2 – 7], так и непосредственно в цилиндры [8], относятся к дизелям с относительно небольшой цилиндрической мощностью (порядка 7...15 кВт), которые применяются на небольших катерах и лодках. Однако, в реальных условиях, например, на судах рыбопромыслового и транспортного флота малой и средней тоннажности, в качестве главных и вспомогательных двигателей, в основном, применяются четырехтактные среднеоборотные двигатели с наддувом, цилиндрическая мощность которых составляет 50...120 кВт.

Кроме того, в литературе отсутствуют данные по исследованию влияния небольших добавок водорода к основному топливу при работе таких двигателей на их основные показатели. Поэтому, с целью изучения целесообразности применения небольших добавок водорода к основному топливу именно для таких двигателей, нами был разработан экспериментальный стенд на основе четырехтактного среднеоборотного двигателя с наддувом 1Ч 20/27, цилиндрическая мощность которого составляет порядка 60 кВт [10].

Целью настоящего исследования является выявление влияния небольших водородных добавок к основному топливу на экономичность среднеоборотных двигателей с наддувом небольшой мощности, работающих по винтовой характеристике.

2. Анализ результатов экспериментального исследования работы дизеля 1Ч 20/27 на водородных добавках

Первая серия экспериментов была проведена на двигателе 1Ч 20/27 при постоянной температуре воздуха на входе в компрессор $T_{в}=314$ К.

При работе по винтовой характеристике двигатель испытывался на режимах с частотами вращения коленчатого вала, равными 476, 546, 580 и 600 мин^{-1} , т.е. с относительной нагрузкой в пределах 0,5...1,0.

На каждом режиме работы дизеля определялся удельный эффективный расход дизельного топлива как без добавок водорода к нему g_e , г/(кВт·ч), так и с добавками водорода $g_e^{H_2}$, г/(кВт·ч).

Массовые добавки водорода на различных режимах определялись как отношение удельного расхода водорода g_{H_2} , г/(кВт·ч) к величине g_e , г/(кВт·ч), т.е.

$$m_{H_2} = \frac{g_{H_2}}{g_e} \cdot 100, \%$$

Величина этих добавок регулировалась в широком диапазоне (от 0,04 до 0,12 %), и при этом определялась величина удельного эффективного расхода топлива $g_e^{H_2}$, г/(кВт·ч).

Полученные экспериментальные данные позволяли определить такие основные показатели работы дизеля на каждом режиме:

– абсолютная и относительная экономия дизельного топлива при подаче водорода в цилиндр дизеля соответственно:

$$\Delta g_e^{H_2} = g_e - g_e^{H_2}, \text{ г/(кВт·ч)}, \quad (1a)$$

$$\Delta g_e^{-H_2} = \frac{\Delta g_e^{H_2}}{g_e} \cdot 100, \%; \quad (1б)$$

– эффективный КПД работы дизеля без добавок водорода и с ними соответственно:

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot 10^5}{g_e \cdot 42700}, \%; \quad \eta_e^{H_2} = \frac{3600 \cdot 10^5}{b_e \cdot 42700}, \%, \quad (2)$$

где b_e – приведённый удельный расход топлива дизеля с учётом добавок водорода, величина которого получена из выражения

$$b_e = g_e^{H_2} + 2,83 \cdot g_{H_2}, \text{ г/(кВт·ч)}. \quad (3)$$

Коэффициент 2,83 в выражении (3) представляет собой отношение удельной теплоты сгорания водорода $Q_H^{H_2}$ и дизельного топлива Q_H^{DT} , т.е.

$Q_H^{H_2} / Q_H^{DT} = 2,83$. При этом принимались следующие значения $Q_H^{H_2} = 121000$ кДж/кг и $Q_H^{DT} = 42700$

кДж/кг;

– абсолютное и относительное изменение эффективного КПД дизеля

$$\Delta\eta_e^{H_2} = \eta_e^{H_2} - \eta_e, \% \quad (4)$$

$$\Delta\bar{\eta}_e^{-H_2} = \Delta\eta_e^{H_2} / \eta_e, \% \quad (5)$$

Расход дизельного топлива двигателем при его работе с добавками водорода можно определить через коэффициент влияния K_{H_2} , который определяется как отношение

$$K_{H_2} = g_e^{H_2} / g_e \quad (6)$$

тогда

$$g_e^{H_2} = K_{H_2} \cdot g_e, \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)} \quad (7)$$

Экспериментальные данные, полученные нами, позволили определить значения коэффициента K_{H_2} в зависимости от относительной нагрузки дизеля, величины добавок водорода m_{H_2} , частоты вращения коленчатого вала n , мин^{-1} и характеристики, по какой он работает. При работе дизеля по винтовой характеристике получена такая эмпирическая зависимость:

$$K_{H_2} = 1 - \frac{1,045 \cdot m_{H_2}}{n^{0,707} (0,0125 + m_{H_2}^2)} \quad (8)$$

Формула (8) описывает зависимость $K_{H_2} = f(m_{H_2}, n)$ для дизеля 1Ч 20/27 с погрешностью не более 3 % и справедливо для $m_{H_2} = (0,04 \dots 0,12)$ и $n = 476 \dots 600 \text{ мин}^{-1}$.

На рис. 1 представлены зависимости влияния частоты вращения коленчатого вала дизеля n и величины добавок водорода m_{H_2} на величину коэффициента влияния K_{H_2} .

Так, с увеличением m_{H_2} от 0 до 0,12 %, величина K_{H_2} уменьшается до значения порядка 0,95 при номинальной нагрузке двигателя ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$) и до величины примерно 0,94 при нагрузке 0,5 от номинальной ($n = 476 \text{ мин}^{-1}$). Из приведенных зависимостей также следует, что увеличение m_{H_2} более, чем на 0,1 %, практически не приводит к дальнейшему снижению K_{H_2} .

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований влияния частоты вращения коленчатого вала n и величины добавки m_{H_2} на экономичность работы дизеля 1Ч 20/27.

Так, увеличение добавки водорода m_{H_2} до 0,12 % приводит к абсолютной экономии топлива до 14 г/(кВт·ч), а относительной до 6 %. Причем,

начиная с $m_{H_2} = 0,1 \%$, прироста экономии топлива практически не наблюдается.

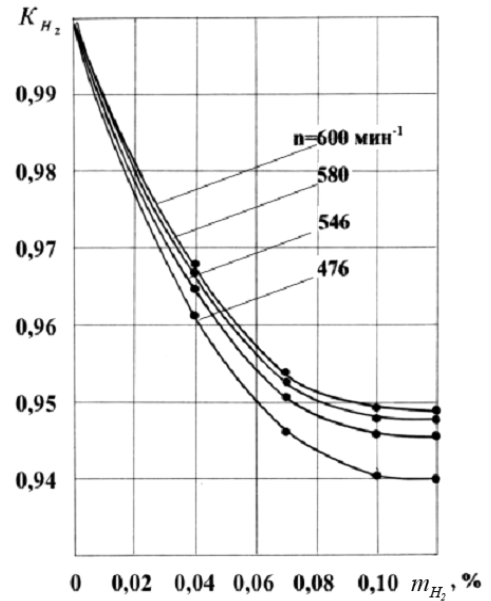


Рис. 1. Зависимость коэффициента K_{H_2} от величины добавки водорода m_{H_2} к основному топливу и частоты вращения коленчатого вала n для дизеля 1ЧН 20/27, работающего по винтовой характеристике

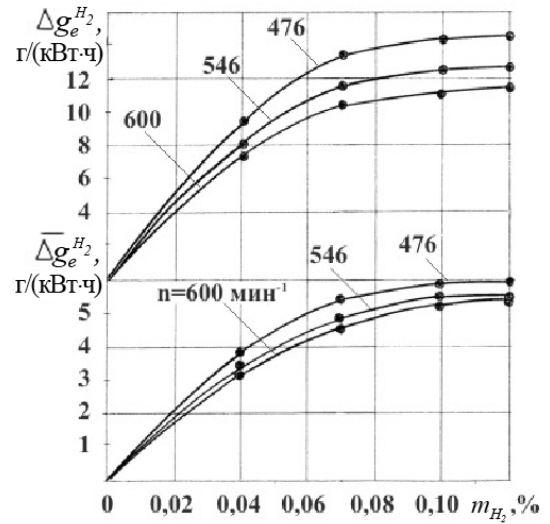


Рис. 2. Показатели топливной экономичности $\Delta g_e^{H_2}$ и $\Delta g_e^{-H_2}$ дизеля 1ЧН 20/27, работающего по винтовой характеристике, от величины добавок водорода к основному топливу m_{H_2} и частоты вращения коленчатого вала n

Следует отметить, что добавка водорода к основному топливу дизеля на частичных (долевых)

режимах приводит к большему эффекту, чем при номинальных нагрузках. Так, добавка $m_{H_2} = 0,1\%$ на номинальном режиме ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$) позволяет экономить примерно $11 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, а при той же величине m_{H_2} и $n = 476 \text{ мин}^{-1}$, сокращение удельного эффективного расхода топлива может составить около $15 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$.

На рис. 3 представлено сравнение показателей эффективности работы дизеля 1ЧН 20/27 при его работе с добавками водорода к основному топливу и без них.

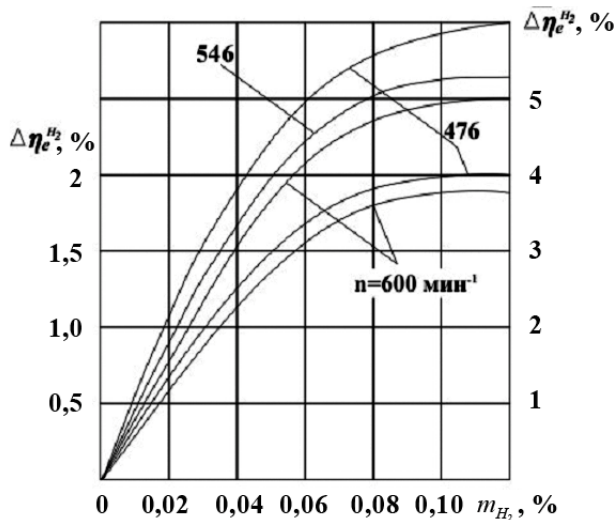


Рис. 3. Показатели эффективности работы дизеля 1ЧН 20/27 по винтовой характеристике в зависимости от величины добавок водорода к основному топливу m_{H_2} и частоты вращения коленчатого вала n

Представленные данные показывают, что увеличение добавок водорода до $0,12\%$ приводит к увеличению абсолютного значения эффективного КПД двигателя на величину $\Delta\eta_e^{H_2}$, достигающего значений до $2,0\%$, относительного $\Delta\eta_e^{-H_2}$ – до $6,0\%$. Причем увеличение эффективности работы дизеля наблюдается при росте величины m_{H_2} до значения порядка $0,1\%$, после чего увеличение добавок водорода не влияет на эффективность работы дизеля.

Следует отметить, что добавки водорода к основному топливу дизеля более эффективны на частичных (долевых) режимах его работы. Так, при $n = 476 \text{ мин}^{-1}$ и $m_{H_2} = 0,1\%$, изменение $\Delta\eta_e^{-H_2}$ составляет примерно $6,0\%$, в то время как при номинальной нагрузке ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$) $\Delta\eta_e^{-H_2} = 5\%$.

Выводы

1. Применение небольших добавок водорода к основному топливу ($0,04\text{...}0,12\%$) среднеоборотного дизеля с наддувом приводит к повышению топливной экономичности работы двигателя; при этом абсолютная экономия топлива может достигать величины $14,5 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$, а относительная – до 6% .

2. Добавки водорода от $0,04$ до $0,12\%$ к основному топливу дизеля позволяют повысить эффективность его работы. Так, величина $\Delta\eta_e^{H_2}$ увеличивается до $2,0\%$ при $m_{H_2} = 0,1\%$, а $\Delta\eta_e^{-H_2}$ – до $6,0\%$.

Литература

1. Суркин, В. И. Снижение дымности отработавших газов дизеля отключением части цилиндров [Электронный ресурс] / В. И. Суркин, А. А. Петелин, С. Ю. Федосеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20, № 33. – С. 69–74. – Режим доступа: <http://dspace.susu.ac.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/2137/11.pdf?sequence=1>. – 12.09.2014.

2. Сирота, А. А. Повышение экономичности судовых дизелей путем использования водорода в качестве добавок к топливу [Текст] / А. А. Сирота // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – № 1. – С. 63–67.

3. Водородные добавки к углеродному топливу как первый этап перехода судовых высокооборотных ДВС на экологически чистое водородное топливо [Текст] / А. А. Сирота, А. И. Чураков, О. А. Голиков, Н. И. Радченко // Праці Інституту електродинаміки НАН України : зб. наук. праць. – К. : Вид-во Іє НАНУ, 2006. – С. 111–114.

4. Syrota, A. Increasing the efficiency of high speed internal combustion engines by hydrogen adding to fuel [Text] / A. Syrota, N. Radchenko, A. Churacov // Heat Transfer and Renewable sources of Energy. – Szczecin (Poland), 2006. – С. 207–211.

5. Сирота, А. А. Повышение экологической безопасности и энергетической эффективности судовых высокооборотных двигателей внутреннего сгорания путем добавок водорода к топливу [Текст] / А. А. Сирота, Н. И. Радченко, А. И. Чураков // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2006. – № 1 (406). – С. 181–186.

6. Сирота, А. А. Водородные добавки к топливу как способ повышения эффективности судовых высокооборотных дизелей [Текст] / А. А. Сирота, Н. И. Радченко, А. И. Чураков // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2006. – № 3 (408). – С. 121–127.

7. Сирота, А. А. Оптимальные режимы тригенерационных судовых дизельных установок [Текст] / А. А. Сирота // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 4/40. – С. 29–34.

8. Вагнер, В. А. Применение альтернативных топлив в ДВС [Электронный ресурс] / В. А. Вагнер. – Режим доступа: http://aotai.secna.ru:8080/Books/Files/Vestn_2000_02/10/10.htm. – 12.09.2014.

9. Новоселов, С. В. Возможности использования водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / С. В. Новоселов // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Приложение к журналу "Ползуновский альманах". – 2000. – № 2. – Режим доступа: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/va2000_2/pages/14/14.htm. – 12.09.2014.

10. Сирота, А. А. Экспериментальный стенд для дослідження впливу водневих домішок на показники роботи суднового середньообертового двигуна з наддувом [Текст] / А. А. Сирота, Ю. Г. Щербак // *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická konference «Věda a technologie - 2014»*. – Díl 33. Technické vědy. : Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o. – S. 28-34.

11. Могила, В. Водородный коктейль для локомотива [Электронный ресурс] / В. Могила // *Магистраль*. – 2013. – 6 ноября. – Режим доступа: <http://magistral-uz.com.ua/articles/vodorodnyj-koktejl-dlja-lokomotiva.html>. – 12.09.2014.

Поступила в редакцию 12.09.2014, рассмотрена на редколлегии 19.11.2014

Рецензент: д-р техн. наук, профессор А.С. Титлов, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса.

ЕКОНОМІЧНІСТЬ СУДНОВОГО СЕРЕДНЬООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ, ЯКИЙ ПРАЦЮЄ ПО ГВИНТОВІЙ ХАРАКТЕРИСТИЦІ, ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕВЕЛИКИХ ДОМІШОК ВОДНЮ ДО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

О. А. Сирота, М. І. Радченко, Ю. Г. Щербак

У роботі наведено результати експериментального дослідження впливу невеликих водневих домішок до основного палива на економічність середньообертових дизелів з наддувом невеликої потужності, що працюють по гвинтовій характеристиці. Визначено, що використання невеликих домішок водню до основного палива (0,04...0,12 %) для середньообертового дизеля 1Ч 20/27 призводить до підвищення паливної ефективності двигуна; при цьому абсолютна економія палива може сягнути величини 14,5 г/(кВт·год), а відносна – 6 %. Водневі домішки 0,04...0,12 % до основного палива підвищують ефективність дизеля. Так, ефективність дизеля $\Delta\eta_e^{H_2}$ збільшується на 2,0 % при домішках водню $m_{H_2} = 0,1 \%$, а у відносних величинах $\frac{-H_2}{\eta_e}$ – на 6,0 %. Показано, що невеликі домішки водню до основного палива дизеля більш ефективні на часткових навантаженнях.

Ключові слова: середньообертовий дизель; водневі домішки; питома витрата палива; економія дизельного палива; гвинтова характеристика.

PROFITABILITY OF SHIP MEDIUM-SPEED DIESEL WITH APPLICATION OF SMALL ADDITIVES OF HYDROGEN TO THE DIESEL FUEL, WORKING ACCORDING TO THE SCREW CHARACTERIC

A. A. Sirota, N. I. Radchenko, Yu. G. Shcherbak

Results of experimental investigation of influence of small hydrogen additives to the main diesel fuel on fuel efficiency of medium speed diesels with air compression, working according to the screw characteristic. It is defined that small hydrogen additions to basic fuel (0.04...0.12 %) in medium-speed supercharged diesel engine 1Ч 20/27 result in improved fuel efficiency of the engine; in such case the absolute fuel saving can reach 14.5 g/(kW·h) and relative fuel saving can be up to 6 %. Hydrogen additives 0.04...0.12 % to the main diesel fuel increases the efficiency of diesel engine. So, the efficiency of diesel $\Delta\eta_e^{H_2}$ increases by 2.0 % with hydrogen additives $m_{H_2} = 0,1 \%$ and in relative values $\frac{-H_2}{\eta_e}$ – by 6,0 %. It was shown that small hydrogen additions to basic diesel fuel are more effective at part loads.

Key words: medium – speed of diesels; hydrogen additions; specific fuel consumption; economy of diesel fuel; screw description.

Сирота Александр Архипович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры качества, стандартизации и эколого-техногенной безопасности, Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, Николаев, Украина, e-mail: butoma-1@mksat.net.

Радченко Николай Иванович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой кондиционирования и рефрижерации Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Щербак Юрий Георгиевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры качества, стандартизации и эколого-техногенной безопасности, Черноморский государственный университет им. Петра Могилы, Николаев, Украина, e-mail: butoma-1@mksat.net.