

*Голиков А.А., к.т.н., профессор, Чураков А.И., инженер,
Одесская национальная морская академия*

*Сирота А.А., к.т.н., доцент, Николаевский государственный гуманитарный
университет им. Петра Могилы*

*Радченко Н.И., д.т.н., профессор, Национальный университет кораблестроения
им. адм. Макарова, НИИ проблем экологии и энергосбережения, г. Николаев*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ВОДОРОДА К ТОПЛИВУ НА ТОПЛИВНУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ СУДОВЫХ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Экспериментально исследовано влияние экологически безопасных водородных добавок к традиционному органическому топливу на топливную экономичность судовых высокооборотных дизелей на номинальной и частичных нагрузках. Получены опытные данные по удельному эффективному расходу дизельного топлива. Показано, что малые водородные добавки оказывают стабилизирующее воздействие на топливную экономичность дизеля на частичных нагрузках.

The influence of ecological safety hydrogen additives to traditional organic fuel upon ship high speed diesel engines fuel economical efficiency at normal and partial loads is investigated experimentally. The experimental data on specific effective diesel fuel consumption are obtained. It is shown that small hydrogen additives make a stabilization effect upon fuel economical efficiency of diesel at partial loads.

1. Анализ состояния проблемы, постановка цели и задач исследования

Сокращение природных запасов углеродного топлива и экологические проблемы, связанные с его использованием, остро ставят вопрос его замены альтернативными источниками энергии. В большинстве стран решение этой задачи усматривают в переходе на водородное топливо как экологически чистый источник энергии, запасы которого практически неисчерпаемы. Приняты соответствующие национальные и международные программы. Так, министерство энергетики США в 2004 году разработало долгосрочную комплексную программу, предусматривающую полный переход к водородной энергетике к 2030-2040 годам и создание соответствующей инфраструктуры.

Странами ЕС разработана аналогичная программа: Европейская технологическая платформа в области водородной энергетики и топливных элементов. Согласно долгосрочной модели развития энергетики, разработанной Международным институтом прикладного системного анализа в Австрии и Токийской энергетической компанией, на смену природному газу придут альтернативные источники энергии и прежде всего водород, а традиционные ископаемые энергоресурсы после 2050 года утратят свою доминирующую роль как первичное топливо.

Транспорт как крупный потребитель углеродного топлива является одним из основных источников токсичных и тепловых выбросов. Поэтому особое внимание в программах уделяется его переводу на водородное топливо. Поскольку по КПД и экологическим параметрам прямое сжигание водорода в ДВС не целесообразно, то конечной целью ставится полное вытеснение

традиционных двигателей низкотемпературными твердоокисными электрохимическими топливными элементами. Так как КПД даже самых перспективных на сегодня технологий производства водорода из воды не превышает 60 %, а электроэнергии в топливных элементах – 60%, то общий КПД преобразования первичной энергии с учетом потерь вряд ли превысит 25 %. Для обеспечения конкурентоспособности электрохимических топливных элементов по сравнению с ДВС себестоимость их изготовления должна быть уменьшена в 4 раза. По прогнозам доля таких автомобилей в 2015 году не превысит 1,2 % количества автомобилей, находящихся в эксплуатации в 2000 году [6]. Кроме того, представляется весьма проблематичным удовлетворение потребности в платине для таких топливных элементов, которая даже при 5 % объеме их выпуска составит 20...30 % мирового производства металла.

Итак, несмотря на весьма оптимистичные прогнозы и программы полного перехода транспорта на водородное топливо и электрохимические топливные элементы, современный уровень технологий производства водорода и последующего преобразования его энергии в электрическую с помощью этих элементов, высокая цена таких систем генерации и трансформации, а также ограниченность природных запасов драгоценных металлов, требующихся для изготовления электродов, ожидать замены традиционных ДВС электрохимическими водородными топливными элементами в обозримом будущем не приходится. Очевидно, решением экологических и энергетических проблем, связанных с эксплуатацией последних, будет компромиссный вариант, предусматривающий применение небольших водородных добавок к традиционным топливам. В дополнение к экологической чистоте продуктов сгорания водорода этот газ обладает свойствами уникального топлива: высокими скоростью распространения пламени, теплотворной способностью (водорода – 120 МДж/кг или 10,8 МДж/м³, природного газа и нефтяных топлив – 30...50 МДж/кг, т.е. 1 кг H₂ равнозначен 4,1 кг условного топлива), хорошими диффузионными и каталитическими, интенсифицирующими процесс горения, свойствами, профилактической способностью, обеспечивающей возможность его использования для очистки камеры сгорания двигателя и проточной части от нагара.

Отечественные ученые и конструкторы достигли в этом направлении значительных успехов. Еще в конце 70-х годов коллективом отдела тепловых двигателей Института проблем машиностроения АН УССР под руководством И.Л. Варшавского совместно с В.А. Байковым и В.П. Журманом была осуществлена конвертация

автомобиля “Москвич-412” с целью эксплуатации на бензоводородной смеси и водороде [2]. Тогда же на работу с добавками водорода, хранящегося в гидридах, был переведен и двигатель автомобиля ВАЗ-2101. Испытания показали, что применение добавок водорода наряду со снижением токсичности обеспечивает сокращение расхода бензина примерно на 40 % и повышение топливной экономичности двигателя на 10...15 %. Завершающим этапом работ по применению бензоводородной смеси в автомобильных двигателях стала эксплуатация в Харькове серийных таксомоторов “Волга” с гидридными баками для хранения водорода.

По данным НАМИ и Института проблем машиностроения НАН Украины применение бензоводородного топлива увеличивает КПД двигателя на 10...15 %, а на частичных режимах – на 17...22 % [3]. Специалисты ВАЗ прогнозируют увеличение КПД двигателей до 48 % (в 1,4 раза) при полной нагрузке и до 30 % (в 1,6 раза) при нагрузке 20 % максимальной [1]. Основанием для этого послужили результаты стендовых испытаний двигателя ВАЗ-2111 на бензоводородном топливе, показавшие возможность повышения его КПД выше, чем КПД тихоходного ДВС с турбонаддувом, на сегодня наиболее экономичного двигателя. При этом требования по ограничению выбросов СО, СН и NO_x выполнялись при коэффициенте избытка воздуха $\alpha > 1,7$.

Весьма остро проблема снижения выбросов токсичных выхлопных газов стоит в судовых ДВС. “Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов” (Приложение VI к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов МАРПОЛ 73/78), введенные в 1997 г., устанавливают нормы по окислам азота, озоноразрушающим веществам, окислам серы, летучим органическим соединениям и другим атмосферным выбросам. Международное соглашение по ограничению выброса оксидов азота NO_x с выхлопными газами судовых главных двигателей предложено ИМО (Международная морская организация) [5]. Весьма жесткие требования предъявляются к высокооборотным ДВС, токсичность выхлопных газов которых наиболее высокая. Проблема сокращения токсичных выбросов от высокооборотных ДВС особенно остро стоит в прибрежных водах и портах [4], где в основном они как раз и работают: в качестве вспомогательных (дизель-генераторов) или даже главных двигателей. Так, для вспомогательных двигателей при нахождении судов в прибрежные территориальные воды США предполагается введение требования по 6-7-кратному сокращению выбросов NO_x. Известно решение проблемы сокращения токсичных выбросов в территориальных водах и портах путем перехода на более легкий менее токсичный вид топлива при вхождении судна в прибрежную зону.

В таком режиме работают ДВС финской фирмы Wartsila [2]. Одним из вариантов реализации этого направления можно рассматривать применение водорода в качестве добавок к органическому топливу.

Целью исследования является экспериментальное исследование влияния водородных добавок к традиционному топливу на топливную экономичность высокооборотных двигателей внутреннего сгорания на номинальном и частичных режимах эксплуатации.

2. Экспериментальное исследование и анализ результатов

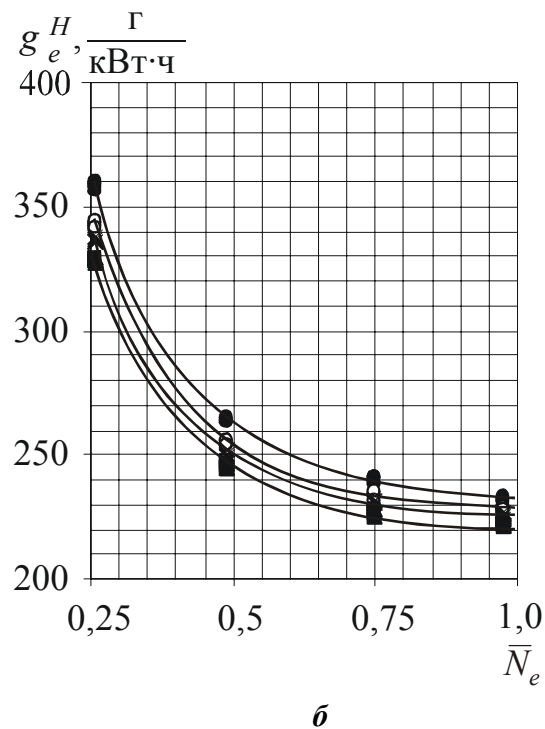
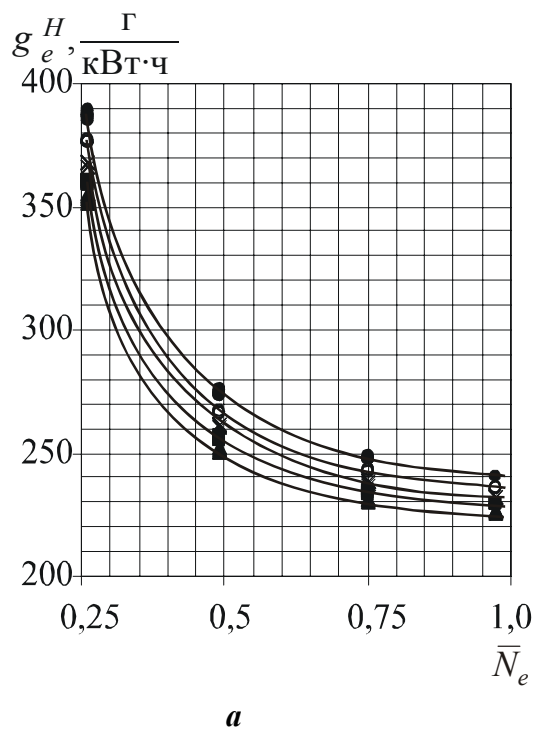
С целью оценки влияния водородных добавок к углеродному топливу на эффективность двигателей и количества этих добавок были проведены испытания судового высокооборотного дизеля без наддува марки 2 Ч 13,5/14 с номинальной частотой вращения коленвала 1500 об/мин. Номинальная мощность двигателя 29,4 кВт. Небольшие добавки водорода подавались в двигатель со свежим зарядом воздуха через всасывающий коллектор. Испытания двигателя проводились по двум нагрузочным характеристикам, по которым работают

дизельгенераторы, при постоянных частотах вращения коленчатого вала: $n = 1500$ об/мин (номинальная) и 920 об/мин (минимально устойчивая).

При работе дизеля на различных нагрузках \bar{N}_e 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 выполнялись по три раза, а затем усреднялись. Относительный массовый расход водорода $m_H = g_H/g_e \cdot 100$, %, изменялся от 0,5 до 2 %.

Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e^H от относительной нагрузки на двигатель \bar{N}_e при температуре воздуха на входе в двигатель $t_b = 20$ °С, числах оборотов коленвала $n = 1500$ и 920 об/мин и разных добавках водорода m_H представлена на рисунку.

Анализ результатов испытаний показывает, что топливная экономичность двигателя зависит от частоты вращения коленвала, при которой он работает по нагрузочной характеристике, загрузки \bar{N}_e и величины добавок водорода m_H . Так, при работе двигателя с частотой вращения $n = 1500$ об/мин и добавками водорода $m_H = (0,5...2)$ % (см. рис. 1, а) сокращение удельного эффективного расхода топлива g_e^H на номинальном режиме ($\bar{N}_e = 0,975$) составляет 5...15 г/(кВт·ч), или 2...6 % (меньшая величина соответствует 0,5 % добавке водорода,



Зависимость удельного эффективного расхода топлива g_e^H от относительной нагрузки на двигатель \bar{N}_e при температуре воздуха на входе в двигатель $t_b = 20$ °С, числах оборотов $n = 1500$ об/мин

(а) и 920 об/мин (б) и разных добавках водорода m_H , %:

а) ● – 0; ○ – 0,5; × – 1,0; □ – 1,5; ▲ – 2,0; б) ● – 0; ○ – 0,5; × – 1,0; ▲ – 2,0

большая – 2 %), при $\bar{N}_e = 0,75 - 6...17$ г/(кВт·ч), или 2,4...7,0 %, а при $\bar{N}_e = 0,5 - 7...22$ г/(кВт·ч), или 2,6...8,0 %.

Таким образом, эффект от применения добавок водорода с переходом на частичные нагрузки увеличивается. Возрастает также влияние самой доли водородных добавок, т.е. чем меньше нагрузка двигателя, тем доля добавок должна быть выше.

Как видно, чем больше m_H , тем кривые становятся более пологими, из чего следует также заключение о том, что водородные добавки отчасти нивелируют отрицательное влияние перехода на частичные нагрузки, которое сказывается на ухудшении топливной экономичности двигателя – увеличении удельного эффективного расхода топлива g_e^H .

Эти же закономерности влияния указанных факторов на топливную экономичность двигателя сохраняются и при числе оборотов коленвала $n = 920$ об/мин (см. рисунку, б). Несколько более крутой характер кривых свидетельствует, с одной стороны, о большем отрицательном влиянии частичных режимов на ухудшение топливной экономичности двигателя, а с другой – о необходимости увеличения доли водородных добавок и возрастании эффекта от их применения

по сравнению с эксплуатацией двигателя при $n = 1500$ об/мин.

Весьма малые доли водородных добавок (1...2%) существенно облегчают решение проблемы хранения водорода на борту судна. Вполне очевидно, что наиболее рациональным является его хранение в связанном состоянии с применением гидридообразующих материалов – гидридов. Этот способ основан на том, что некоторые металлические сплавы (магний-никель, магний-медь, железо-титановые сплавы) обладают свойством обратимого хранения водорода: способностью поглощать водород в относительно больших количествах при отводе теплоты и освобождать его при ее подводе. Такие взаимобратимые адсорбционно-десорбционные свойства гидридных энергоаккумуляторов обеспечивают многократное их применение и открывают широкие возможности для использования в них низкопотенциальных вторичных энергоресурсов судовой энергетической установки.

Выводы

Установлено, что применение добавок водорода к топливу обеспечивает сокращение удельного эффективного расхода топлива на

Література

1. Коротеев А.С., Смоляров В.А. Автомобиль и водород: встречу отменить нельзя // Энергия. – № 4. – 2004. – С. 3-10.
2. Кузык Б.Н., Кушлин В.И., Яковец Ю.И. На пути к водородной энергетике. – М.: Ин-т эконом. стратегий, 2005.
3. Мельник Г.В. Водород – энергоноситель XXI века // Двигателестроение. – 2005 – № 3 (221). – С. 48-49.
4. Стаценко В.Н., Якубовский Ю.В. Перспективы повышения экологической безопасности судовых энергетических установок // Судостроение. – № 5. – 2003. – С. 28-31.
5. Hellen G. Emission control of medium speed diesel engines in marine applications // Proceedings of International Shipbuilding Conference (ISC). Section G. "Ecology and Environmental Protections", St. -Petersburg, 1994.
6. Thomas C.E., James B.D., Zomax F.D.Jr., Kuhn I.F.Jr. // Int. J. Hydrogen Energy. – 2000. – Vol. 25. – P. 551.