

УДК 661.96.001

*А.А. Сирота, инж., Б.Г. Тимошевский, д-р техн. наук, Н.И. Радченко, инж.,  
А.И. Чураков, инж.*

## ИСПЫТАНИЯ СУДОВОГО ВЫСОКООБОРОТНОГО ДВС НА ТОПЛИВОВОДОРОДНОЙ СМЕСИ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ОКРУЖАЮЩЕГО ВОЗДУХА

### 1. Анализ проблемы, постановка цели и задач исследования

Высокооборотные ДВС применяются в качестве дизельгенераторов морских и речных судов. Их эффективность в значительной степени зависит от температуры воздуха, подаваемого в цилиндры. С повышением его температуры уменьшается коэффициент избытка воздуха, ухудшается смесеобразование, увеличиваются период задержки самовоспламенения топлива, температура выпускных газов и отвод теплоты от цилиндров, теплонапряженность двигателя, удельный расход топлива, снижаются эффективный КПД и мощность двигателя. Так, согласно [1] каждый градус повышения температуры окружающего воздуха вызывает уменьшение мощности судового ДВС на 0,5 %. Таким образом, проблема повышения эффективности работы судовых ДВС при высокой температуре воздуха стоит довольно остро.

Весьма перспективным направлением повышения энергетических, экономических и экологических показателей судовых ДВС является применение водорода в качестве топлива. Благодаря замкнутому циклу его производства и использования (из воды и с образованием воды как продукта его сгорания) водород является неисчерпаемым источником энергии. Однако полный переход ДВС на водородное топливо в обозримом будущем не представляется возможным, поскольку КПД даже самых совершенных и перспективных технологий производства водорода из воды не превышает 50 %, а хранение и транспортировка больших объемов водорода связаны со значительными энергетическими затратами, техническими сложностями обеспечения мер повышенной безопасности. Поэтому в качестве реальной альтер-

нативы можно рассматривать использование малых добавок водорода, не создающих проблем при их хранении. По данным НАМИ и Института проблем машиностроения НАН Украины применение водородных добавок к бензиновому топливу увеличивает КПД двигателя на 10...15 %, а на частичных режимах – на 17...22 % [2].

Таким образом, проблему повышения эффективности работы судовых высокооборотных ДВС при повышенной температуре окружающего воздуха целесообразно решать в рамках перспективного направления повышения энергетических и экологических показателей ДВС путем применения водородных добавок к углеродному топливу.

**Целью работы** является экспериментальное исследование влияния водородных добавок к топливу на эффективность высокооборотных ДВС при разных температурах окружающего воздуха и разработка на основе полученных данных рекомендаций по применению водородных добавок с целью улучшения экономических и энергетических показателей двигателей при повышенных температурах воздуха.

Для ее достижения были решены следующие задачи: получены опытные данные по мощности, удельному расходу топлива и КПД при разных температурах окружающего воздуха и работе высокооборотного судового ДВС с добавками водорода к углеродному топливу; разработаны рекомендации по применению водородных добавок с целью улучшения экономических и энергетических показателей двигателей при повышенных температурах воздуха.

2. Испытания высокооборотного ДВС с добавками водорода к топливу при разных температурах воздуха

С целью исследования влияние водородных до-

бавок к дизельному топливу на экономичность и энергетическую эффективность высокооборотных двигателей при разных температурах воздуха на входе в цилиндры двигателя были проведены экспериментальные исследования судового высокооборотного дизеля без наддува марки 2 Ч 13,5/14 номинальной мощностью  $N_{\text{ном}} = 29,4$  кВт и с номинальной частотой вращения коленчатого вала 1500 об/мин [3]. Небольшие добавки водорода подавались в двигатель со свежим зарядом воздуха через всасывающий коллектор.

Испытания 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). В настоящей работе представлены данные испытаний двигателя при  $n = 1500$  об/мин.

Исследования проводились на четырех режимах с относительными мощностями  $\overline{N}_e = N_e / N_{\text{ном}}$ , равными 1,0; 0,75; 0,50; 0,25. На каждом режиме работы двигателя (при относительной мощности  $\overline{N}_e$ ) определялся удельный эффективный расход дизельного топлива без применения добавок водорода  $g_e$ , г/(кВт·ч) и с добавками водорода  $g_e^H$ . Все замеры выполнялись на каждом режиме по несколько раз, а затем усреднялись. Расход водорода  $g_H$ , г/(кВт·ч), изменялся от 0,5 до 2 % расхода дизельного топлива и в процентах определялся как  $m_{H_2} = g_H / g_e \cdot 100$  %.

Анализ результатов испытаний показывает, что экономия дизельного топлива  $\overline{\Delta g_e} = (g_e - g_e^H) / g \cdot 100$ , %, за счет добавок водорода зависит от режима нагрузки на двигатель  $\overline{N}_e$ , величины  $m_{H_2}$  и температуры воздуха на входе.

На каждом режиме работы двигателя рассчитывался приведенный удельный эффективный расход топлива по зависимости

$$b_e = g_e + 2.84g_H, \text{ г/(кВт·ч)},$$

где 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

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot 10^5}{g_e Q_H} \cdot 100 \text{ \%};$$

– при работе с добавками водорода

$$\eta_e^H = \frac{3600 \cdot 10^5}{b_e Q_H} \cdot 100 \text{ \%},$$

где  $Q_H$  – низшая удельная теплота сгорания дизельного топлива, которая принималась равной 42700 кДж/кг.

Относительное изменение эффективного КПД двигателя за счет добавок водорода рассчитывалось как

$$\overline{\Delta \eta_e} = \frac{(\eta_e - \eta_e^H)}{\eta_e} \cdot 100 \text{ \%}$$

Зависимости относительного приращения КПД двигателя  $\overline{\Delta \eta_e}$  от температуры воздуха на входе  $t_b$  при разных нагрузках на двигатель  $\overline{N}_e$  и добавках водорода  $m_{H_2}$  представлены на рис 1. Как видно, в рассматриваемом интервале температур  $t_b$  относительное приращение КПД  $\overline{\Delta \eta_e}$  за счет применения добавок водорода изменяется от 1 % (на номинальном режиме) до 5 % (при  $\overline{N}_e = 0,25$ ). С повышением температуры  $t_b$  воздуха приращение КПД  $\overline{\Delta \eta_e}$  возрастает по линейному закону, причем с уменьшением нагрузки темп приращения  $\overline{\Delta \eta_e}$  увеличивается: прямые становятся круче. Таким образом, добавки можно рассматривать как эффективное средство ослабления отрицательного влияния повышения температуры окружающего воздуха и перехода на частичные режимы на энергетические показатели ДВС.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что графики, соответствующие величине водородных добавок  $m_{H_2} = 1,5$  %, располагаются выше, чем  $m_{H_2} = 2,0$  %, причем на всех режимах нагрузки двигателя. Это свидетельствует о существовании неко-

торой оптимальной величины добавки, лежащей в диапазоне значений  $m_{H_2} = 1,5 \dots 2,0 \%$  и обеспечивающей максимальное относительное приращение

КПД двигателя  $\overline{\Delta\eta_e}$ .

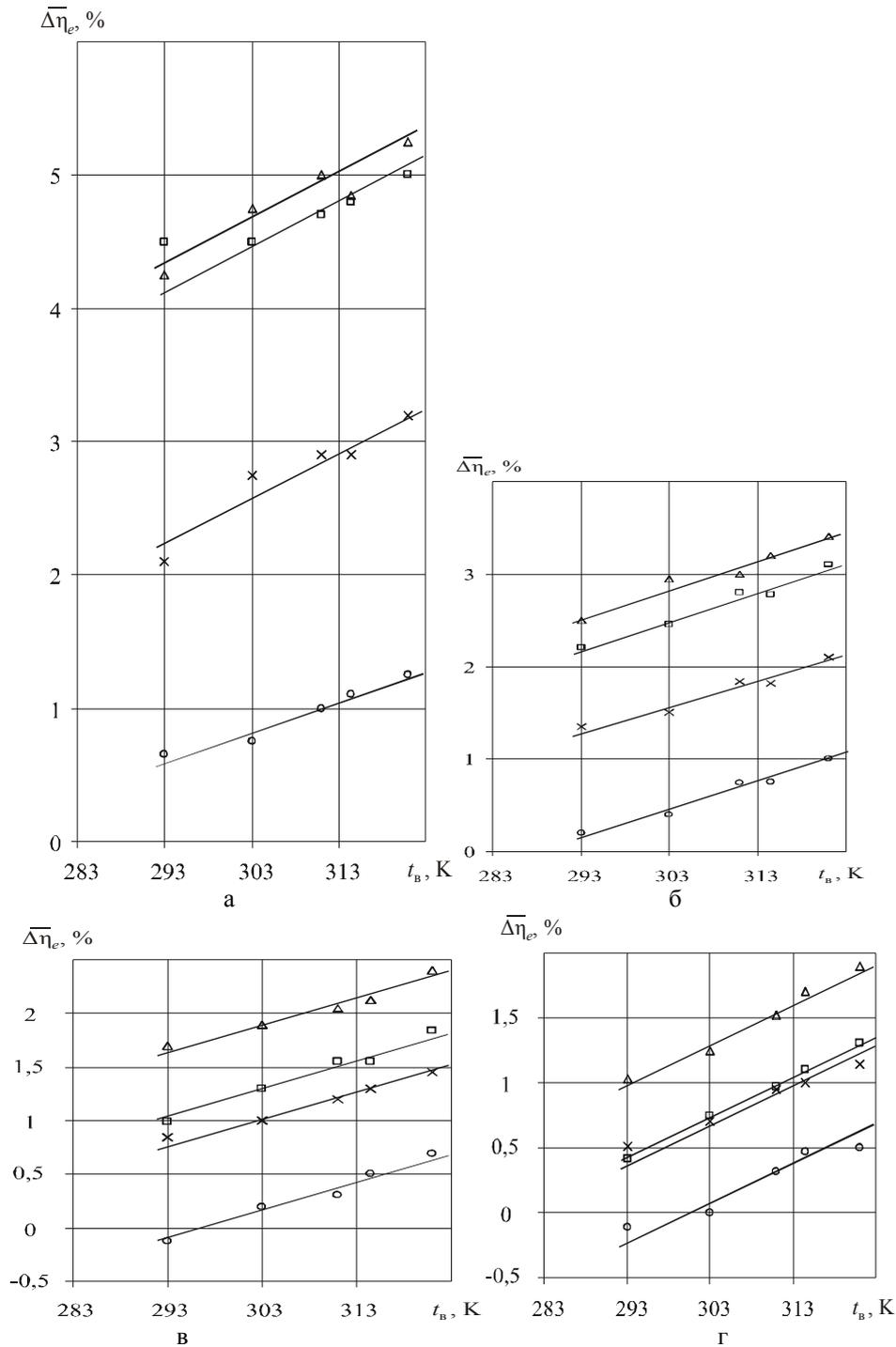


Рис. 1. Зависимость относительного приращения КПД двигателя  $\overline{\Delta\eta_e}$  от температуры воздуха на входе  $t_{в}$  при нагрузках на двигатель  $\overline{N_e} = 0,25$  (а), 0,5 (б), 0,75 (в) и 1,0 (г) и разных добавках водорода  $m_{H_2}$ , %: о –  $m_{H_2} = 0,5 \%$ ; × – 1,0 %; Δ – 1,5 %; □ – 2,0 %

Об экономической целесообразности применения водородных добавок можно судить по экономии

дизельного топлива, приходящейся на единицу массы добавки, т.е. об удельной ценности добавки. Для

этого воспользуемся относительным сокращением удельного эффективного расхода дизельного топлива  $\Delta g_e / g_{H_2}$ , представляющим собой отношение сокращения удельного эффективного расхода дизельного топлива  $\Delta g_e$ , г(кВт·ч), к удельному расходу водорода  $g_{H_2}$ , г(кВт·ч). Этот параметр показывает, сколько грамм дизельного топлива, приходящегося на 1 кВт эффективной мощности  $N_e$ , экономится при подаче в двигатель 1 грамма  $H_2$  на 1 кВт  $N_e$ . Он характеризует эффективность использования водорода и может быть назван, например коэффициентом эффективно-

сти использования водорода. При его максимальном значении эффективность использования водорода будет наибольшей.

Зависимости относительного сокращения удельного эффективного расхода дизельного топлива  $\Delta g_e / g_{H_2}$  от температуры воздуха на входе  $t_b$  при разных нагрузках на двигатель  $\overline{N_e}$  и добавках водорода  $m_{H_2}$  представлены на рис. 2. Как видно, с повышением температуры  $t_b$  величина  $\Delta g_e / g_{H_2}$  возрастает линейно, причем с уменьшением  $m_{H_2}$  темп приращения  $\Delta g_e / g_{H_2}$  увеличивается: прямые становятся круче.

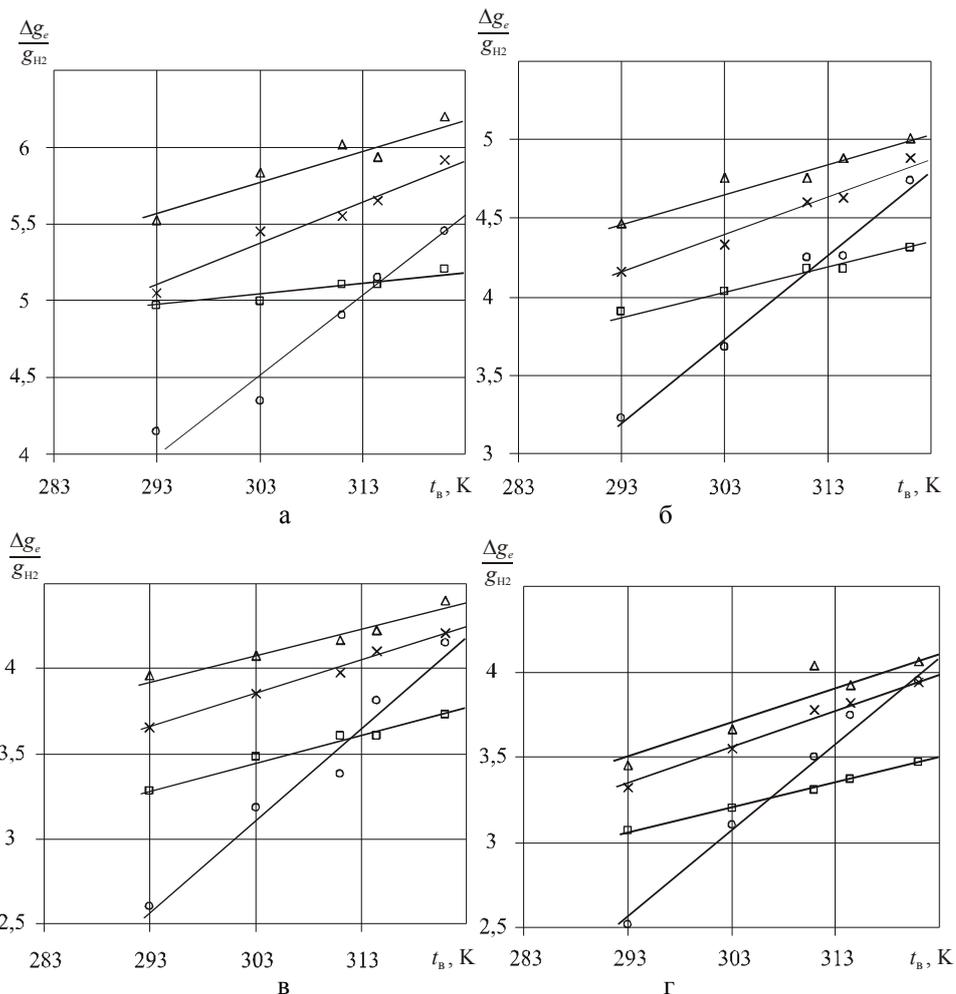


Рис. 2. Зависимость относительного сокращения удельного эффективного расхода дизельного топлива  $\Delta g_e / g_{H_2}$  от температуры воздуха на входе  $t_b$  при нагрузках на двигатель  $\overline{N_e} = 0,25$  (а),  $0,5$  (б),  $0,75$  (в) и  $1,0$  (г) и разных добавках водорода  $m_{H_2}$ , %: о –  $m_{H_2} = 0,5$  %; × –  $1,0$  %; Δ –  $1,5$  %; □ –  $2,0$  %

Как и в случае приращения КПД двигателя  $\overline{\Delta \eta_e}$  (рис. 1), на всех режимах нагрузки двигателя

графики, соответствующие величине водородных добавок  $m_{H_2} = 1,5$  %, располагаются выше, чем  $m_{H_2} = 2,0$  % (рис. 2). Это подтверждает существова-

ние оптимальной величины добавки, лежащей в диапазоне значений  $m_{H_2} = 1,5 \dots 2,0 \%$  и обеспечивающей максимальное относительное сокращение удельного эффективного расхода дизельного топлива  $\Delta g_e / g_{H_2}$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что водородные добавки являются весьма эффективным способом повышения экономических и энергетических показателей судовых высокооборотных ДВС при высоких температурах окружающего воздуха, а их малая величина (1...2 %) не создает особых проблем, связанных с производством и хранением водорода на борту судна.

#### Выводы

1. Применение небольших (1...2 %) добавок водорода к топливу компенсирует отрицательное влияние повышения температуры воздуха, подаваемого в цилиндры двигателя, на его экономические и энергетические показатели, обеспечивая сокращение

относительного (отнесенного к удельному расходу водорода) удельного эффективного расхода дизельного топлива на 2...6 % и увеличение относительного приращения КПД двигателя на 1...5 %.

2. С повышением температуры воздуха, подаваемого в цилиндры, и уменьшением нагрузки на двигатель эффект от использования водородных добавок возрастает.

#### Список литературы:

1. Гладков О.А., Лерман Е.Ю. Создание малотоксичных дизелей речных судов. Л.: Судостроение, 1990.
2. Мельник Г.В. Водород – энергоноситель XXI века // Двигателестроение. – № 3 (221). – 2005. – С. 48–49.
3. Сирота А.А., Чураков А.И. Испытания судового высокооборотного ДВС с добавками водорода // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – № 2. – С. 81–84.

УДК 426.43.

*Е.В. Белоусов, канд. техн. наук, Т.П. Белоусова, инж.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ СО СЛОЕВЫМ СЖИГАНИЕМ

### Введение

Важным аспектом научно-технического прогресса, на данном этапе и в ближайшей перспективе, является поиск альтернативных топлив для поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Это объясняется, с одной стороны, постоянным ростом цен на нефть, продукты переработки которой традиционно используются в качестве топлив для ДВС, а с другой стороны, чрезвычайно высокой распространенностью данного типа двигателей во всех сферах хозяйственной деятельности человека. Одним из

перспективных направлений в расширении топливной базы поршневых ДВС является исследование возможности использования для них в качестве моторного твердых топлив и суспензий на их основе. В последние десятилетия достигнут заметный прогресс в данном направлении, однако многие вопросы остаются неисследованными.

### 1. Анализ литературных источников

Наряду с объемными методами сжигания твердых топлив в составе различного рода суспензий [1], перспективным направлением в области их исполь-