

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2021.3\(486\).6](https://doi.org/10.15589/znp2021.3(486).6)
УДК 621.434.432

INVESTIGATION OF EFFECTS OF WAVE OSCILLATIONS IN FUEL EQUIPMENT OF DIESEL ENGINE WITH THE USE OF HYDROGEN ADDITIVES

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТІВ ХВИЛЬОВИХ КОЛИВАНЬ В ПАЛИВНІЙ АПАРАТУРІ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВОДНЕВИХ ДОБАВОК

Denys O. Shalapko
denys.shalapko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4311-3908

Д. О. Шалапко,
канд. техн. наук, старший викладач

Kherson branch of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson

Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон

Abstract. The study is based on the hydrodynamic wave effects in high-pressure fuel equipment of diesel internal combustion engines. Among the phenomena observed in the fuel equipment of the engine when using hydrogen additives to the main diesel fuel is the fluctuation of the maximum injection pressure, which causes a deterioration of the parameters of the fuel spray.

Studies of hydraulic oscillations in fuel equipment were performed on an experimental bench, which allows to test the wave effect when using hydrogen additives to diesel fuel. Modern high-precision measuring instruments were used during the development of the research stand. The results of experimental studies have shown that in the fuel equipment of high engine pressure there is a corresponding “wave effect” of oscillations. This phenomenon is caused by the landing of the discharge valve of the high-pressure fuel pump on the saddle, those respectively in the injector, the landing of the needle. The length of the high-pressure pipeline, the maximum fuel injection pressure, the speed of propagation of the pressure fluctuations affects the nature of the oscillations. The speed of propagation depends on the speed of the engine crankshaft. The high-pressure fuel pump was driven by an electric motor with regulation from the all-mode regulator and control by a frequency meter.

The characteristics of fuel injection are obtained, which demonstrate the peculiarities of changes in pressure waves depending on the presence of hydrogen impurities. By the obtained data analyze was determined that the impurity of hydrogen in a portion of 0.1% of the cyclic fuel supply (by weight) leads to the attenuation of wave oscillations and a decrease in the amplitude of oscillations by 12 ... 20%. The characteristics of hydrogen dissolution by diesel fuel are obtained. The consumption of hydrogen impurity depends primarily on the speed of the crankshaft, the injection pressure, and the hydrogen pressure. This nature of hydrogen consumption is explained by the periodic framework of limiting the dissolution process, the difference between the smallest value of the “pressure wave” of the excess pressure of the additive. The obtained data can be used to confirm the mathematical model of hydrogen dissolution when using it as an impurity in the fuel line.

Key words: internal combustion engine; hydrogen consumption; hydrogen impurities; high pressure fuel line.

Анотація. Дослідження базується на гідродинамічних хвильових ефектах у паливній апаратурі високого тиску дизельних двигунів внутрішнього згоряння. Серед явищ, що спостерігаються в паливній апаратурі двигуна за використання добавок водню до основного дизельного палива, відзначимо коливання максимального тиску впорскування, що викликає погіршення параметрів розпилювання палива.

Дослідження гідравлічних коливань у паливній апаратурі здійснювалися на експериментальному стенді, котрий дозволяє проводити випробування хвильового ефекту в разі застосування добавок водню до дизельного палива. Під час розробки досліджувального стенда використовувалися сучасні високоточні вимірювальні прилади. Результати експериментальних досліджень показали, що в паливній апаратурі високого тиску двигуна виникає відповідний «хвильовий ефект» коливань. Таке явище спричинене посадкою нагнітального клапана паливного насоса високого тиску на сідло та, відповідно, у форсунці посадкою голки. Довжина трубопроводу високого тиску, максимальний тиск упорскування палива, швидкість поширення хвилі коливання тиску впливають на характер коливань. Швидкість поширення залежить від частоти обертання колінчатого вала двигуна. Паливний насос високого тиску приводився в дію електродвигуном із регулюванням від всережимного регулятора та під контролем за допомогою частотоміра.

Розкрито характеристики впорскування палива, які демонструють особливості зміни хвиль тиску залежно від наявності водневої добавки. Проаналізувавши отримані дані, з'ясовано, що додавання водню порцією 0,1% від циклової подачі палива (по масі) призводить до приглушення хвильових коливань і зменшення амплітуди коливань на 12–20%. Визначено характеристики розчинення водню дизельним паливом. Витрата водневої добавки залежить насамперед від частоти обертання колінчатого вала, тиску впорскування і тиску водню. Такий характер витрати водню пояснюється періодичним обмеженням процесу розчинення, різницею найменшого значення «хвилі тиску» надлишкового тиску добавки. Одержані дані можна застосовувати для підтвердження математичної моделі розчинення водню за умови застосування його як добавки у паливопроводі.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; витрата водню; водневі добавки; паливопровід високого тиску.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Обмежені запаси викопної органічної енергії вимагають ширшого використання альтернативних видів палива і паливних добавок у транспортних одиницях. Упродовж найближчих десятиліть для малих та середніх транспортних і стаціонарних електростанцій одними з основних типів двигунів залишаться турбопоршневі двигуни внутрішнього згоряння з запалюванням від стиснення. Завдання підвищення ефективності таких двигунів може бути вирішене, зокрема, завдяки застосуванню перспективних паливних добавок [1; 2].

Як добавки до дизельного палива можна використовувати [3]:

- паливо для газових двигунів (зріджений або стиснений природний газ);
- скраплені нафтові гази (пропан, бутан);
- спирти та суміші бензилового спирту (метиловий, етиловий, ізобутиловий та інші спирти й їх суміші з бензином у різних пропорціях);
- ефіри (метилтретинний бутиловий ефір, метилтрет-метиловий ефір, етиловий третинний бутиловий ефір, дізопропіловий ефір, а також диметиловий ефір);
- синтетичне рідке паливо, отримане з природного газу та вугілля;
- біопаливо (біоетанол, біодизель), отримане з відновлюваної сировини;
- водень та добавки до палива на основі водню.

У статті здійснено експериментальне дослідження впливу застосування водневих газових добавок у лінії високопаливного обладнання двигуна внутрішнього згоряння на характеристики «хвильового ефекту» та характеристики вприскування двигуна внутрішнього згоряння.

Тому актуальним є вивчення можливості використання водневих добавок у паливопроводі високого тиску через спеціальний зворотний клапан завдяки «хвильовому ефекту» в паливному обладнанні [4; 5].

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є гідродинамічні хвильові ефекти у паливному обладнанні високого тиску дизельних двигунів. Завдяки використанню «хвильового ефекту» за допомогою спеціального зворотного

клапана можна вводити невеликі добавки (0,1–0,5% за масою) водню до основного палива. Конструктивна схема зворотного клапана показана на рис. 1.

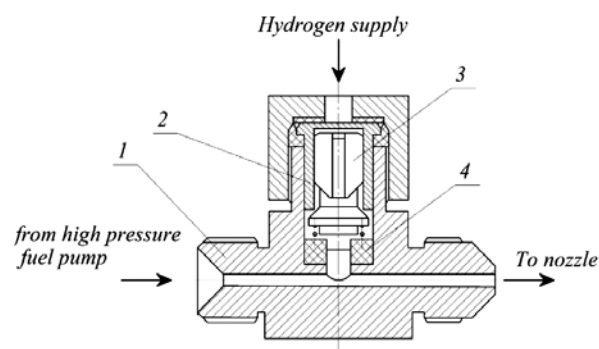


Рис. 1. Пристрій подачі водню до магістралі високого тиску: 1 – корпус; 2 – втулка клапана; 3 – зворотний клапан із направляючими; 4 – посадочне кільце

Серед запропонованих варіантів добавок до основного палива особливий інтерес викликає водень, оскільки, згідно з [6; 7], навіть мінімальні додавання водню (0,1–0,5% за масою) позитивно впливають на екологічні та економічні показники дизельного двигуна.

Структурно раціональним є подавання водню до паливної магістралі високого тиску між паливним насосом високого тиску і форсункою. Особливістю є додавання водню до дизельного палива в магістраль високого тиску на хвилі низького тиску за допомогою спеціального пристрою. В такому разі на хвилі тиску дизельне паливо насичується воднем і надходить у форсунку, а потім впорскується в циліндр двигуна. Після впорскування та зниження тиску в циліндрі з дизельного палива виділяється водень, сприяє подальшому подрібненню крапель і швидко дифундує в об'єм надпоршневого простору. Кількість водню, що додається до циклового подання дизельного палива, регулюється тиском подавання водню на вході до змішувального пристрою (див. рис. 1) [2]. Однак за використання газових добавок не слід перевищувати межі розчинності газу в паливі, щоб уникнути утворення газових пробок у паливопроводі високого тиску.

Цей спосіб дуже простий у використанні і не вимагає істотних змін у конструкції двигуна. Однак у спеціальній науково-технічній літературі

такий спосіб додавання водню маловивчений, що зумовлює перспективність його експериментальних досліджень.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є отримання залежностей на сичення дизельного палива добавкою водню для формування математичної моделі.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі умови:

- 1) розробити фізичну модель хвильових коливань у паливному обладнанні дизельного двигуна;
- 2) створити експериментальний стенд для вивчення хвильового ефекту з невеликими додаваннями водню до паливопроводу високого тиску;
- 3) отримати якісні результати щодо його впливу на параметри двигуна.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Спосіб додавання водню, описаний у [7], показує високу екологічну ефективність за використання невеликої кількості добавок водню за допомогою двопаливної інжекторної установки. Однак у цій роботі «хвильовий ефект» паливного обладнання та вплив водню на гідравлічні характеристики паливної магістралі не повністю розкриті.

Основні способи підвищення ефективності двигуна внутрішнього згоряння завдяки використанню водню як добавки до основного палива, визначені у ресурсах світової періодики, розглядаються в роботах Д.А. Павлова, С.А. Піонтковської [8], М.М. Патрахальцева [9]. Але вони досліджують лише подавання водню до впускного колектора. У доробках Р. Мобашері, М. Седдіка, З. Пенга [3], Н.Г. Певнева, В.В. Понамарчука [10] розглядається вплив додавання водню на параметри навколишнього середовища дизельного двигуна з аналізом раціонального співвідношення водню до палива. Але залишається відкритим питання співвідношення витрат водню, якщо його об'єм збільшити до 20%.

Альтернативне вирішення проблеми, викладене у праці М.Р. Ткача та інших [11], не передбачає додавання водню до палива, а використовує пряме подавання водню до дизельного балона. Водночас у роботах М.Р. Ткача, Д.О. Шалапка, Б.Г. Тимошевського [11; 12] використовують від 8 до 45% водню щодо дизельного палива. За словами авторів [13], використання водню як добавки до основного палива лише збільшує енергоємність палива. Це не підтверджується ні експериментально, ні моделюванням. Додавання водню в кількості 3% до маси призводить до збільшення ККД електростанції з ДВЗ на 1,5%. Однак у цьому випадку водень виступає як каталізатором згоряння, так і паливом, оскільки з цим додаванням енергетичний потенціал досягає 10% основного палива. Використання водню в НССІ в кількості добавки до

17% показує, що менша частка добавки є більш ефективною і призводить до «м'якшої» роботи двигуна. Хоча таке твердження стосується лише цього типу двигунів і не широко використовується у світовій промисловості машинобудування.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Методика дослідження

Фізична модель впорскування і можливість використання водневих добавок на паливній магістралі потребують подальших теоретичних та експериментальних досліджень для визначення раціональних параметрів подавання добавки й контролю процесу впорскування палива. Одним із методів дослідження є фізичне моделювання, що дозволяє отримати досить точні результати.

У сучасних швидкісних дизельних двигунах процес подавання палива займає всього 1–4 мс за високої швидкості роботи поршня насоса [4]. Стиснення та впорскування палива мають імпульсний нестационарний характер. Паливо саме по собі є пружним середовищем, в якому тиск поширюється зі швидкістю звуку (1200–1600 м/с), тож будь-яка зміна об'єму в заповненій гідравлічній системі викликає різку зміну тиску.

Імпульси тиску, що поширюються від джерела збурень, зустрічаючи перешкоди на кінцях системи, частково відбиваються й утворюють зворотну та повну хвилю, сильно спотворюючи характеристики нагнітання. По закінченню подавання палива хвилі тиску, відбиті від закритого нагнітального клапана, можуть викликати повторні стрибки голки після завершення основного періоду впорскування. Одержані так звані субнагнітання небажані, оскільки тиск нагнітання невеликий, а розпилення палива грубе та неоднорідне. Потік субнагнітання призводить до збільшення диму вихлопних газів, вуглецевого утворення, питомої витрати палива та створює передумови для коксування отворів розпилювача.

Після закінчення подавання палива рух і відображення хвиль у порожнині високого тиску (насадці насоса, нагнітальній трубі, насадці) поступово вщухають через незворотні втрати енергії внаслідок тертя, і встановлюється залишковий тиск. Зазвичай чим довша паливна магістраль і вища частота імпульсів впорскування, тим сильніший вплив хвильових явищ у системі на характеристики подавання палива. Цей фактор не має такого впливу на секцію «насос – форсунка», де відсутня інжекторна труба, а хвильовий ефект є незначним.

Результати експериментальних досліджень

Для детального вивчення цих процесів на базі паливної системи дизельного двигуна Д65 (4С11/13) (СРСР) було розроблено експериментальний агрегат ДВЗ-1-МДВ. Ця установка зображена на рис. 2, її зовнішній вигляд – на рис. 3, 4.

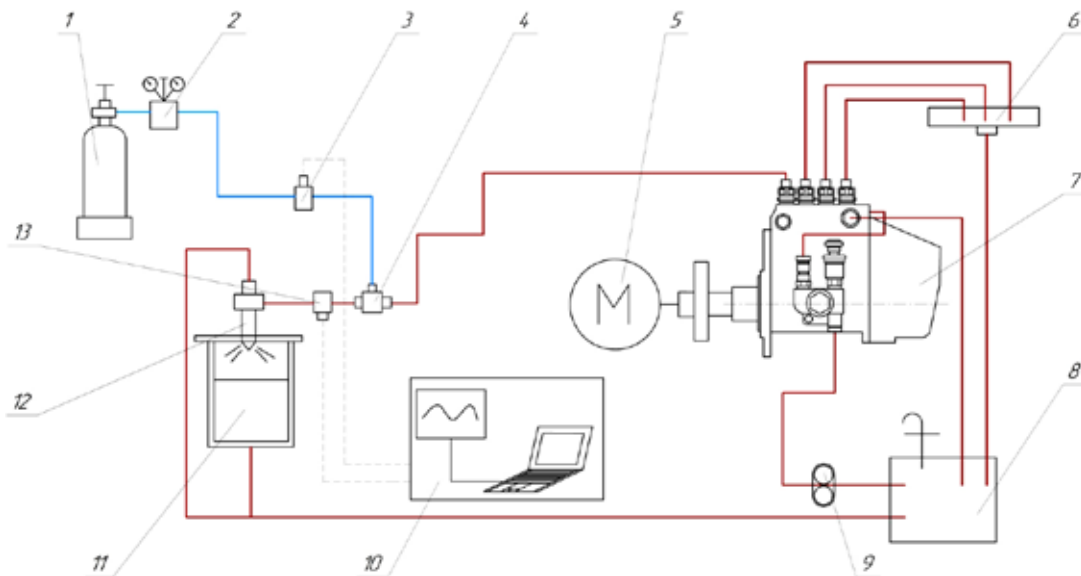


Рис. 2. Схема дослідного агрегату ДВЗ-1-МДВ:

1 – балон зі стисненим воднем; 2 – промисловий водневий редуктор;
 3 – датчик тиску; 4 – клапан для додавання водню в паливопровід високого тиску; 5 – електродвигун;
 6 – паливний бак для зливу палива;
 7 – паливний насос високого тиску; 8 – припливний бак; 9 – насос наддуву палива; 10 – комп’ютерна система для збору та обробки даних вимірювань; 11 – інжекторний бак; 12 – насадка; 13 – датчик тиску

Експериментальний блок складається з трьох підсистем:

- підсистема фізичного моделювання процесів уприскування палива з додаванням водню (на основі паливної системи двигуна Д65);
- підсистема видалення та автоматизованої обробки даних вимірювань;
- підсистема автоматичного контролю параметрів агрегату.

Із балона (1) об’ємом 5 літрів (рис. 2) водень через редуктор (2) надходить у клапан додавання добавок (4), який розміщується перед штуцером форсунок (12), встановленої на штوک і закріпленої у мірній склянці (11).

Значення тиску в паливній магістралі перетворюється на сигнал струму за допомогою динамічного волоконно-оптичного датчика тиску (13) для високотемпературних вимірювань тиску «Optrand AutoPSI-S2000» (США) з верхньою межею 200 МПа

Значення тиску в паливній магістралі перетворюється на сигнал струму за допомогою динамічного волоконно-оптичного датчика тиску (13) для високотемпературних вимірювань тиску «Optrand AutoPSI-S2000» (США) з верхньою межею 200 МПа

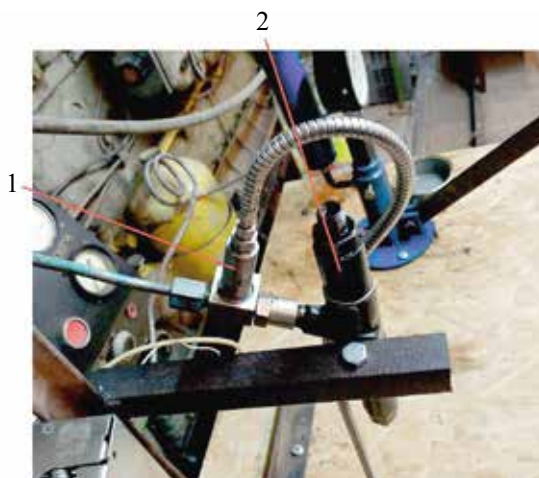


Рис. 3. Встановлення датчика «Optrand AutoPSI-S2000» (США) у магістралі високого тиску:

1 – датчик тиску; 2 – насадка

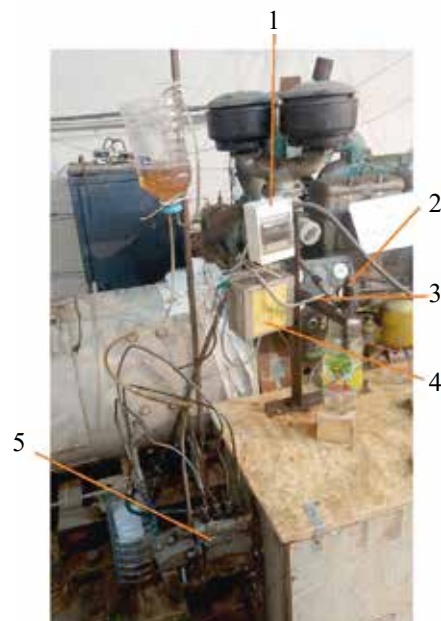


Рис. 4. Експериментальний агрегат на базі паливного обладнання двигуна 4Ч11/13:

1 – блок живлення для «ОВЕН»; датчики тиску; 2 – насадка; 3 – датчик тиску; 4 – блок фільтра сигналу; 5 – паливний насос високого тиску

та вихідним сигналом 0,5–5,0 В. Він дозволяє визначити момент початку впорскування палива, якісно оцінити величину тиску палива та дослідити процеси в паливопроводі високого тиску.

Сигнали від первинних датчиків зі стенда ДВЗ-1-МДВ передаються в електронному вигляді на осцилограф USB та до комп'ютеризованої системи вимірювання і запису даних «IRIS» (Росія) (10).

Сучасні первинні перетворювачі вимірюваних фізичних величин на електричні сигнали разом із комп'ютеризованим обладнанням для проведення експериментальних досліджень та програмним забезпеченням для обробки експериментальних даних на основі САПР забезпечують достатню надійність отриманої експериментальної інформації.

Характеристики основного вимірювального обладнання експериментального стенда ДВЗ-1-МДВ наведені в табл. 1.

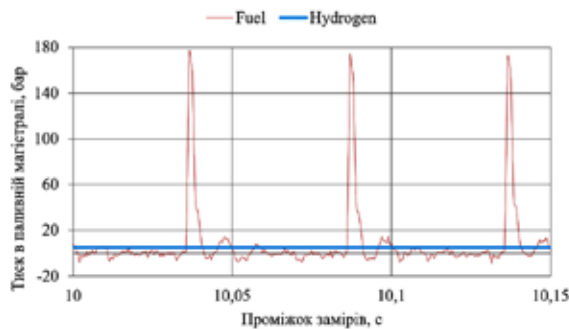
За результатами обробки отриманих експериментальних даних встановлено залежності подавання малих домішок водню (за масою) від тиску подавання та частоти обертання колінчатого вала (див. рис. 7). Водночас тиск водню змінювався в межах 2–10 МПа, а швидкість обертання – в діапазоні 60–100% від номінального ($n_{\text{ном}} = 1150 \text{ хв}^{-1}$).

Аналізуючи отримані результати, можна дійти висновку, що відповідний тиск для подавання водню в усьому діапазоні допустимих частот обертання колінчатого вала дизельного двигуна становить 5–8 МПа. Такі обмеження обумовлені насамперед раціональною концентрацією водню та межами його розчинності [7], а також проблемами безпечного зберігання й експлуатації водню.

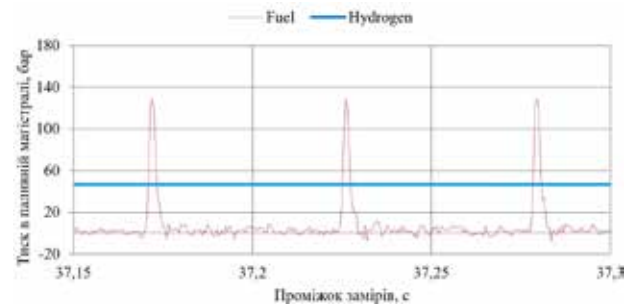
Також слід зазначити, що наразі якісна залежність впливу додавання водню від параметрів екологічних характеристик та паливної ефективності двигуна

Таблиця 1. Характеристика приладів експериментального стенда

Назва засобу вимірювання, обладнання	Марка	Межа вимірювання	Похибка вимірювання
Тахометр	«Вымпел»	600–8000 хв^{-1}	$\pm 1\%$
Датчик динамічного тиску	«Optrand AutoPSI-S2000»	0–200 МПа	$\pm 0,5\%$
Манометр	«ОВЕН ПД100-ДИ 6,0»	1,2–6,0 МПа	$\pm 0,5\%$
Частотомір	Ч4-34А	10 Hz–120 MHz	$\pm 1 \text{ о.в.}$



а)



б)

Рис. 5. Діаграма впорскування палива (виділено низку впорскувань):

а) без додавання водню; б) з додаванням водню

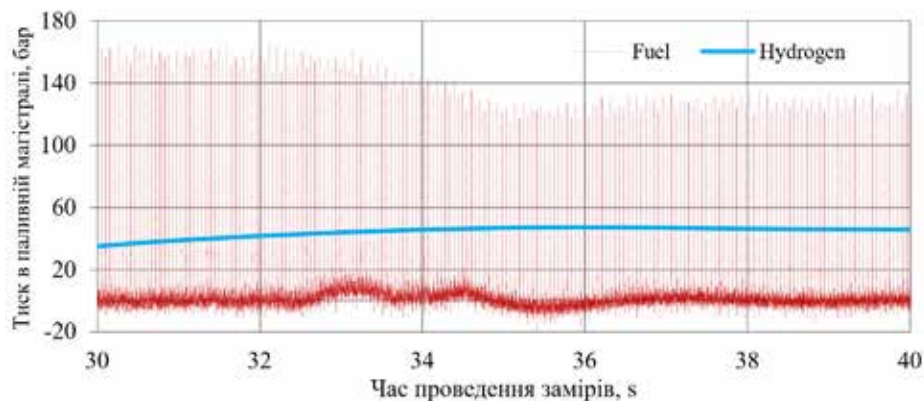


Рис. 6. Експериментальна схема впорскування палива з додаванням водню

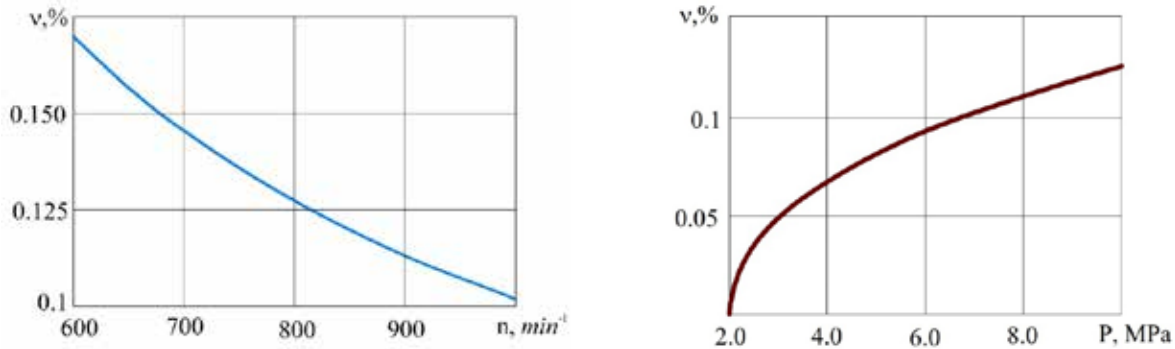


Рис. 7. Залежність циклового подавання водневих добавок від:

а) частоти обертання колінчатого вала (за тиску водню 7 МПа);

б) тиску подавання водню (за частоти обертання колінчатого вала 1000 хв⁻¹)

внутрішнього згоряння до кінця не вивчена. Це зумовлює подальші експериментальні дослідження на реальному двигуні з метою виявлення впливу частки добавки водню на ефективну витрату палива, характеристик внутрішньоциліндрових процесів (для створення діаграми показників двигуна внутрішнього згоряння) та концентрації забруднення вихлопними газами.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Сильні сторони. Використання невеликої кількості добавок водню в паливній магістралі високого тиску призводить до збільшення потужності двигуна на 3–7%, залежно від кількості добавки та навантаження двигуна. Компонент спалювання водню в тепловому балансі становить 1–3%, вартість водню в цьому випадку не перевищує 2% вартості палива.

Використання добавок водню у кількості 0,1% циклової дози палива призводить до зменшення питомої витрати палива на 2,3–3,7%, залежно від режиму роботи двигуна.

Порівняно з наявними методами додавання водню до дизельних двигунів внутрішнього згоряння, цей спосіб допомагає зберегти коефіцієнт надлишку повітря і має мінімальну витрату водню (0,1% порівняно з 5–10% у разі подавання до впускного каналу). Регулювання кількості водню здійснюється за допомогою налаштування паливного обладнання і не потребує додаткового устаткування.

Слабкі сторони. Певні труднощі викликає організація процесу подавання палива в двигун внутрішнього згоряння у разі використання невеликих добавок водню. Отже, в разі надлишкового тиску водню існує загроза виникнення газових пробок у магістралі високого тиску. Це загрожує порушенням стабільної роботи двигуна, пропущеними спалахами, погіршенням екологічних характеристик та надійності двигуна.

Можливості. Подальший розвиток такого методу вимагає розробки математичної моделі розчинності водню за допомогою методу його додавання. Застосування цього методу додавання водню моделюється для танкера типу «SVL LIBERTY» (спущений СМГ «Херсонська верф», Україна) дедвейтом 6970 тонн. Тож із середнім переходом у 1800 миль економія палива сягає 850 у.о. для рейсу з урахуванням вартості водню.

Складнощі. До витрат на запровадження цієї технології віднесемо придбання обладнання з металогідридними акумуляторами, електролізером та системою подавання водню. Ще одна складність – оснащення судна додатковими засобами безпеки під час використання вибухових газів. Серед аналогів цього методу необхідно виділити застосування двопаливних форсунок [7], але в цьому випадку конструкція паливної системи значно ускладнюється та її надійність знижується.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено фізичну модель коливань хвиль у паливному обладнанні дизельного двигуна, яка обґрунтовує доцільність та можливість використання невеликих добавок водню у паливі на магістралі падіння тиску. Особливістю цієї моделі є можливість враховувати часові інтервали поділу фаз нагнітання, розділені, відповідно, на сегменти, що призводить до коливань у паливопроводі. За подальшого моделювання процесу поглинання водню ділянки фази нагнітання враховуються для уточнення моделі розчинення.

2. Створено експериментальний стенд, що включає комп'ютерну систему для збору, запису та обробки даних вимірювання. Це дозволяє досліджувати процеси в паливній магістралі двигуна високого тиску з додаванням водню.

3. Отримано залежності масової частки подавання водню до основного палива від тиску подавання добавки та частоти обертання колінчатого вала двигуна.

З'ясовано, що, крім тиску подавання водню, навантаження та частота обертання колінчатого вала дизельного двигуна однаково якісно впливають на процес насичення дизельного палива воднем. У такому разі доцільно подавати тиск водню в межах 5–8 МПа.

4. Визначено, що додавання водню в кількості $v=0,1\%$ за тиску затягування пружини форсунки $P_{зт}=17,6$ МПа призводить до зниження максимального тиску нагнітання $P_{вн}$ на 2–3 МПа через зміни фізико-хімічних властивостей палива.

REFERENCES

- [1] An H. et al. (2013) A numerical study on a hydrogen assisted diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 38(6), pp. 2919–2928. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.062.
- [2] Deb M. et al. (2015) An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 40(27), pp. 8586–8598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.125.
- [3] Mobasheri R., Seddiq M., Peng Z. (2018) Separate and combined effects of hydrogen and nitrogen additions on diesel engine combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 43(3), pp. 1875–1893. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.070.
- [4] Szwaja S., Grab-Rogalinski K. (2009) Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 34(10), pp. 4413–4421. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.020.
- [5] Wu H. W., Wu Z. Y. (2012) Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel/hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, no. 42, pp. 154–162. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.004.
- [6] Yang Z. et al. (2015) Effects of H₂ addition on combustion and exhaust emissions in a diesel engine. *Fuel*, no. 139, pp. 190–197. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.08.057.
- [7] Wagner V. A., Matievsky D. D. (1985) Osushchestvleniye prisadki vodoroda k toplivu i yeye vliyaniye na pokazateli raboty dizelya [Implementation of hydrogen additives to fuel and its influence on the performance of a diesel engine]. *Motion-Television Building*, no. 2, pp. 53–56. [in Russian]
- [8] Pavlov D. A., Piontkovskaya S. A. (2016) Osushchestvleniye prisadki vodoroda k toplivu i yeye vliyaniye na pokazateli raboty dizelya [Features of the use of hydrogen in an internal combustion engine with various methods of forming fuel-air mixtures]. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, no. 4–5. [in Russian]
- [9] Patrahaltsev N. N. (2002) Apparatura dlya gazodizel'nogo protsessa [Equipment for the gas-diesel process]. *Automotive Industry*, no. 4, pp. 22–23. [in Russian]
- [10] Pevnev N. G., Ponomarchuk V. V. (2017) Vliyaniye vodorodosoderzhashchey dobavki k osnovnomu motornomu toplivu na indikatornyye parametry i effektivnyye pokazateli avtomobil'nogo dvigatelya [Influence of a hydrogen-containing additive to the main motor fuel on indicator parameters and effective indicators of an automobile engine]. *SibADI Bulletin*, no. 4–5, pp. 56–57. [in Russian]
- [11] Tkach M. R. et al. (2017) Utilization of secondary heat energy of marine low speed engine which uses alternative fuel. *Internal Combustion Engines*. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.2.02.
- [12] Shalapko D. O., Tkach M. R., Timoshevsky, B. G. (2017) Osnovni polozhennya matematychnoyi modeli dodavannya vodnyu na liniyi vysokoho tysku palyvnoyi aparatury [Fundamentals of the mathematical model for adding water on the line of a high-yew fire apparatus]. *Bulletin of the Kherson National Technical University*, no. 3(62), pp. 233–237. [in Ukrainian]. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.
- [13] Shalapko D. O., Timoshevsky B. G., Tkach M. R. (2016) Polipshennya robochykh kharakterystyk dyzel'nykh dvyhuniv za dopomohoyu dodavannya vodnyu [Improvement of the working characteristics of diesel engines for additional availability]. *Water Transport*, no. 2(25), pp. 24–28. [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] An H. et al. (2013) A numerical study on a hydrogen assisted diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 38(6). С. 2919–2928. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.062.
- [2] Deb M. et al. (2015) An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 40(27). С. 8586–8598. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.125.
- [3] Mobasheri R., Seddiq M., Peng Z. (2018) Separate and combined effects of hydrogen and nitrogen additions on diesel engine combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 43(3). С. 1875–1893. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.070
- [4] Szwaja S., Grab-Rogalinski K. (2009) Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. № 34(10). С. 4413–4421. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.03.020.
- [5] Wu H. W., Wu Z. Y. (2012) Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel/hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine. *Applied Thermal Engineering*. № 42. С. 154–162. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.004.
- [6] Yang Z. et al. (2015) Effects of H₂ addition on combustion and exhaust emissions in a diesel engine. *Fuel*. № 139. С. 190–197. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.08.057.
- [7] Вагнер В. А., Матиевский Д. Д. (1985) Осуществление присадки водорода к топливу и ее влияние на показатели работы дизеля. *Двигателестроение*. № 2. С. 53–56.

- [8] Павлов Д. А., Пионтковская С. А. (2016) Особенности применения водорода в ДВС при различных способах формирования топливовоздушных смесей. *Известия Самарского Научного Центра РАН*. С. 4–5.
- [9] Патрахальцев Н. Н. (2002) Аппаратура для газодизельного процесса. *Автомобильная Промышленность*. № 4. С. 22–23.
- [10] Певнев Н. Г., Понамарчук В. В. (2017) Влияние водородосодержащей добавки к основному моторному топливу на индикаторные параметры и эффективные показатели автомобильного двигателя. *Вестник СибАДИ*. № 4–5. С. 56–57.
- [11] Ткач М. Р. и др. (2017) Utilization of secondary heat energy of marine low speed engine which uses alternative fuel. *Internal Combustion Engines*. DOI: 10.20998/0419-8719.2017.2.02.
- [12] Шалапко Д. О., Ткач М. Р., Тимошевский, Б. Г. (2017) Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 3(62). С. 233–237. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.
- [13] Шалапко Д. О., Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р. (2016) Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню. *Водний транспорт*. № 2(25). С. 24–28.

© Шалапко Д. О.
Дата надходження статті до редакції: 06.09.2021 р.
Дата затвердження статті до друку: 20.09.2021 р.