

© О. І. Закревський, старший наук. співробітник,  
e-mail: ozakrevsky@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0002-6810-5146;  
© А. В. Голик, канд. техн. наук, завідувач відділу,  
e-mail: aholyk@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0002-0994-9541;  
© М. Б. Назаренко, канд. техн. наук,  
заступник начальника центру,  
e-mail: nnazarenko@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0001-8649-9014;  
© В. С. Устименко, канд. техн. наук, завідувач  
сектору, e-mail: vustymenko@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0003-3657-077X  
(ДП «ДержавтотрансНДІпроект»)

© Oleksandr Zakrevsky, Senior Research Fellow,  
e-mail: ozakrevsky@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0002-6810-5146;  
© Andrii Holyk, Ph.D., Head of Division,  
e-mail: aholyk@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0002-0994-9541;  
© Mykola Nazarenko, Ph.D.,  
Deputy Head of Centre,  
e-mail: nnazarenko@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0001-8649-9014;  
© Viktor Ustymenko, Ph.D., Head of Section,  
e-mail: vustymenko@insat.org.ua,  
ORCID: 0000-0003-3657-077X  
(SE «State Road Transport Research Institute»)

## ДОБАВКИ ВОДНЮ ДЛЯ ДВИГУНІВ ІЗ ЗАПАЛЮВАННЯМ ВІД СТИСНЕННЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

### HYDROGEN ADDITIVES FOR COMPRESSION-IGNITION ENGINES: STATUS AND PROSPECTS OF APPLICATION

**Анотація.** Розглянуто результати експериментальних досліджень, а також перспективи застосування добавок водню як моторного палива для двигунів із запалюванням від стиснення, зокрема автомобільних дизелів. Проаналізовано можливість та умови роботи дизеля з добавками водню. Визначено, що під час конвертування дизелів та їх адаптації для використання добавок водню слід враховувати суттєві відмінності фізико-хімічних властивостей водню і дизельного палива. Наведені приклади адаптації дизелів для роботи з добавками водню та методи зниження викидів забруднювальних речовин, які можуть бути застосовані на автомобільному транспорті.

**Ключові слова:** водень; дизельне паливо; дизельний двигун (дизель); двопаливний (газодизельний) двигун; конвертування двигунів.

**Abstract.** A review of scientific and technical literature sources allows for a discussion of the prospects of using hydrogen additives as fuel for converted diesel engines. Accordingly, the article provides characteristic examples of developments, including methods and means for adapting diesel engine operation to hydrogen additives, as well as innovative scientific and technical solutions applied for the deployment of hydrogen in this direction. In Ukraine, as in the rest of the world, scientific research has been conducted on the use of hydrogen additives for compression-ignition internal combustion engines. In particular, in recent years, such research has focused on adding small amounts of hydrogen as an additive to the primary fuel, as well as adding hydrogen-containing gas to improve engine efficiency and enhance their environmental performance. Thus hydrogen additives can serve as an alternative to liquid oil-based fuels, including being used in compression-ignition transport engines. When converting diesel engines and adapting them for the use of hydrogen additives, it is necessary to take into account the significant differences in the physico-chemical properties of hydrogen and diesel fuel, such as density, gravimetric and volumetric calorific value, auto-ignition temperature, and others. The examples provided in the article confirm that converting diesel engines and adapting them to the use of hydrogen additives can not only ensure saving of petroleum motor fuel but also improve the operational and environmental performance of the engines.

**Keywords:** hydrogen; diesel fuel; diesel engine; dual fuel engine; engine conversion.

#### Вступ

У попередніх публікаціях автори розповідали про історію застосування водню як моторного палива для двигунів внутрішнього згорання, висвітлюючи загальні теоретичні положення щодо використання водню на автомобільному транспорті, а також дослідження і розробки у цій сфері стосовно двигунів із примусовим запалюванням. Ця публікація присвячена результатам

експериментальних досліджень застосування добавок водню, а також добавок водневмісних газів, зокрема так званого «газу Брауна», у двигунах із запалюванням від стиснення – дизелях.

Можливість роботи класичного дизеля на «чистому» водні (100 % H<sub>2</sub>) із запалюванням газоповітряної суміші від стиснення досліджували ще в другій половині минулого століття [1].

Фізико-хімічні властивості водню мають суттєві відмінності від дизельного палива – значно вища температура самозаймання (820–870 K проти 480–530 K), відсутність рідкої фази й мастильності, інша кінетика формування полум'я, інші межі займистості та енергія запалювання. Запалювання водневих гомогенних газоповітряних сумішей вимагає надмірно високих ступенів стиснення та/або істотного попереднього підігріву суміші (до 400–500 K), що спричиняє ризики неконтрольованого запалювання на впуску, детонації та високих викидів оксидів азоту з відпрацьованими газами, а також ризики для надійності й безпеки.

Високий тиск і температура посилюють шкідливий вплив водню насамперед на високміцні конструкційні сталі (матеріали колінчастих валів, шатунів, паливної апаратури високого тиску), що проявляється водневим окрихченням: водень дифундує в метал, знижує його пластичність, спричиняє утворення мікротріщин і може призводити до руйнування елементів конструкції.

Зазначені виклики до цього часу не дозволили створити промисловий зразок класичного дизеля на «чистому» водні, зокрема, для транспортних засобів.

Отже, в цій статті здійснено огляд наукових публікацій, які дозволяють розглянути перспективи застосування не «чистого» водню, а його добавок як моторного палива для конвертованих дизелів, а також добавок водневмісних газів. Наведено характерні приклади розробок, зокрема конвертування дизелів у двопаливні (газодизельні) двигуни (із запалюванням газоповітряної суміші запальною дозою дизельного палива) та їх адаптації для використання добавок водню,

### Основна частина

За наявними публікаціями дослідження можливості застосування добавок водню та водневмісних газів для двигунів із запалюванням від стиснення тривають як в Україні [2-4, 12], так і в інших країнах [1, 5-11]. Зокрема, останніми роками такі дослідження виконувались за напрямом щодо додавання невеликих за обсягом домішок власне водню до основного палива, а також додавання водневмісного газу, для сприяння підвищення ефективності роботи двигунів та поліпшення їхніх екологічних характеристик.

Наприклад, в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України запропоновано технічне рішення стосовно покращення екологічних показників малолітражного дизельного двигуна шляхом додавання до основного (дизельного) палива мікродомішок атомарного та молекулярного водню.

Суміш атомарного та молекулярного водню отримували в компактному електролізері, який порівняно легко під'єднується до паливної системи транспортного засобу і який позбавляє необхідності створювати спеціальну систему живлення воднем (з досить габаритним та пожежонебезпечного обладнанням). Отже, штатна система живлення двигуна паливом була доповнена додатковим компонентом (електролізером), із якого водень дозовано подається у впускний колектор двигуна. Дослідження показників токсичності відпрацьованих газів двигуна виконано для трьох режимів його навантаження – 0,8; 1,0; 1,2 кВт з використанням як «чистого» дизельного палива, так і дизельного палива з додаванням мікродомішок водню у відносній кількості – 0,49; 1,15; 1,83 % за масою.

Екологічний ефект полягає у практично повному виключенні зі складу відпрацьованих газів незгорілих вуглеводнів: зниженні концентрації оксиду вуглецю майже до нуля, а концентрації оксидів азоту на 14–26 відсотків [2].

У Національному транспортному університеті проводились експериментальні дослідження дизеля 4С11,0/12,5 (Д-241) за навантажувальною характеристикою ( $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ ) за сталої величини добавки водневмісного газу – так званого «газу Брауна». Основним завданням було визначення оптимальної величини такої добавки (яку в підсумку встановлено на рівні 5 %) для заданого режиму роботи за найкращої паливної економічності.

Аналіз результатів досліджень засвідчив, що зменшення величини питомого споживання дизельного палива становило близько 3,5 % в усьому діапазоні навантажувальної характеристики, при цьому потужність підвищувалась на 1,5 відсотка. Максимального зниження питомого споживання дизельного палива (на 4,75 %) було досягнуто за відсоткової частки водневмісного газу 5,32. Концентрація забруднювальних речовин, у першу чергу – вуглеводнів, у випускних газах суттєво

знижувалась (майже на 30 %) в усьому діапазоні навантажувальної характеристики; незначне зниження концентрації оксидів азоту відзначалось в режимі холостого ходу і невеликих навантажень [3].

У Національному університеті кораблебудування здійснювалися випробування та дослідження робочого процесу в суднових двигунах та їхній паливній апаратурі за використання малих домішок (*добавок*) водню до дизельного палива. Встановлено, що використання таких домішок сприяє покращенню експлуатаційних (економічних) показників роботи дизеля, зокрема, підтверджено приріст потужності – на 1,7–3,4 %, зменшення питомої витрати палива – на 2,2–3,7 %, залежно від частки доданого водню.

Використання малих домішок водню до основного палива приводить до скорочення довжини факелу розпиленого палива та збільшення його кута розкриття. Завдяки покращенню якості розпилу кут випередження впорскування потребує коригування; раціональний кут випередження впорскування палива, який лежить у межах від  $-7^\circ$  до  $-2^\circ$  від заводських налаштувань, дозволяє підвищити ефективну потужність двигуна на 4,1–5,5 %. Визначено і раціональний діапазон додавання водневої домішки, що становить 0,05–0,15 % за масою. Загалом, визнано ефективність застосування малих домішок водню на сучасних судових двигунах [4].

У дослідженні Університету Малайзії (за участі Індонезійського інституту природничих наук) вивчали характеристики згорання дизельно-водневого двопаливного (*газодизельного*) двигуна в режимах низьких навантажень. Оскільки водень неможливо безпосередньо використовувати в дизельному двигуні через значно вищу температуру самозаймання водню, ніж у дизельного палива, було застосовано збагачення паливоповітряної суміші воднем.

Для досліджень характеристик згорання газодизеля одноциліндровий експериментальний дизель з безпосереднім впорскуванням був конвертований для використання добавок водню. Водень подавали у впускний колектор через змішувач перед входом у камеру згорання. Двигун працював за постійної частоти обертання  $2000 \text{ хв}^{-1}$  і навантаження 10 Нм. Водень вводили з рівнями подачі 21,4, 36,2 та 49,6 л/хв. Було

досліджено питоме споживання енергії, індикаторний коефіцієнт корисної дії і тиск у циліндрі. Під час додавання водню навантаження двигуна та частоту обертання підтримували сталими шляхом зменшення подачі дизельного палива. У результаті частину дизельного палива заміщували добавкою водню.

Результати досліджень та відповідні розрахунки показали, що за малих навантажень заміщення воднем дизельного палива зменшує піковий тиск у циліндрі та ефективність роботи двигуна. Загалом хід реакції уповільнюється через зменшення швидкості згорання. Заміщенням дизельного палива подачею водню 21,4; 36,2 та 49,6 л/хв під час досліджень було досягнуто зниження споживання дизельного палива на 50, 90 і 97 %.

Проте, ці відносно великі добавки водню негативно впливають на питоме споживання енергії та ефективність роботи двигуна. Збільшення подачі водню під час роботи з малими навантаженнями призводить до зростання питомого енергоспоживання. Це означає, що для отримання однакової вихідної потужності потрібно більше палива. Збільшення подачі водню відповідно зменшує частку дизельного палива. Низька частка дизельного палива може виявитися недостатньою для ефективного згорання, для запалювання воднево-повітряної суміші та призводить до більш пізнього початку згорання [5].

В Університеті Бухаресту досліджували використання водню в автомобільному дизелі з турбонаддувом К9К. Експерименти проводили за частоти обертання  $2000 \text{ хв}^{-1}$  з різним рівнем навантаження двигуна: 40 %, 55 %, 70 % і 85 %; контролювали декілька показників для оцінки впливу добавок водню на питоме споживання енергії, паливну економічність, максимальний тиск і характеристики тепловіддачі.

Було встановлено, що за навантаження двигуна 55 % завдяки додаванню водню збільшився коефіцієнт корисної дії на 5,3 %, забезпечуючи економію дизельного палива на рівні 1,32 кг/год. Інтенсивність зростання пікового тиску і максимальний тиск почали підвищуватися внаслідок збільшення кількості палива, яке згоряло у фазі попереднього змішування, все ще

залишаючись у надійних експлуатаційних межах. Застосування водню забезпечило зменшення викидів CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> та димності у порівнянні з класичним живленням [6].

В Індійському інституті технологій (м. Нью-Делі) проведені дослідження, спрямовані на реалізацію одного зі способів адаптації дизеля для роботи на водні як моторному паливі – конвертування його у водневий двигун з іскровим запалюванням [7].

В іншій індійській науковій установі – Національному інституті технології (Агартала) було проведено дослідження «Аналіз процесу згоряння та показників роботи при безпосередньому впорскуванні водню з використанням дизельного палива як джерела запалювання за фіксованого моменту впорскування і різної тривалості впорскування».

У цій експериментальній роботі у впускний колектор одноциліндрового дизеля (невеликої потужності) з безпосереднім впорскуванням дизельного палива впорскували водень через форсунку із застосуванням технології ТМІ (Time Manifold Injection) — впорскування у впускний колектор з керуванням моментом впорскування. Двигун працював в режимі повного навантаження за номінальної частоти обертання 1500 хв<sup>-1</sup>, а подачу водню змінювали покроково, щоб отримати різні співвідношення енергії. За допомогою електронного блоку управління (ECU) під час кожного впорскування кількість впорскуваного газу змінювали, щоб оцінити вплив кількості введеного водню за цикл роботи на двох паливах (дизельному і водні). Моменти впорскування газу не були обрані довільно, було приділено велику увагу створенню гомогенної суміші для свіжого заряду під час впорскування. Були обрані моменти впорскування водню 10, 50 і 80 градусів після ВМТ.

Максимальний тиск впорскування за 10 градусів після ВМТ досяг 62,73 бар за максимального навантаження і тривалості впорскування 9000 мікросекунд. Отже, стратегія впорскування за 10 градусів після ВМТ забезпечувала максимальну можливість утворення однорідного заряду, що приводило до більш повного згоряння та, як наслідок, більшого зростання тиску, порівняно з іншими методиками впорскування [8].

Також індійські науковці (з двох університетів в м. Хайдарабад) виконали

роботу «Експериментальні дослідження воднево-дизельного двопаливного двигуна за різних ступенів стиснення». Двигуном, використаним у цьому дослідженні, був одноциліндровий газодизель з безпосереднім впорскуванням Kirloskar AV-1 з водяним охолодженням. Дизельне паливо впорскувалось через форсунку з каліброваним отвором 0,15 мм; одночасно через форсунку для стисненого природного газу впорскувався водень безпосередньо в циліндр. Двигун був модифікований, і створено можливість змінювати ступінь стиснення від 14,5 до 24,5. Для забезпечення параметрів горіння було використано спеціальне програмне забезпечення. Частоту обертання двигуна підтримували постійною (1400 хв<sup>-1</sup>) шляхом регулювання подачі водню. Експерименти повторювали, змінюючи ступінь стиснення: 16,35, 18,35, 20,22 і 24,5. Щоб вивчити вплив температури на вході на утворення оксидів азоту, температуру повітря на вході плавно змінювали, щоб уникнути ризику попереднього загоряння водню у впускному колекторі для одного коефіцієнту стиснення 24,5.

У результаті досліджень зроблено такі висновки:

- теплова ефективність зростає зі збільшенням частки водню, і є максимальною за 100 % водню. Для всіх ступенів стиснення встановлено, що спочатку – за низької частки водню та малої потужності її значення є меншим;

- застосування водню як палива дає кращі результати за високих ступенів стиснення;

- викиди вуглеводнів різко зменшуються зі збільшенням заміщення воднем і стають практично нульовими за 100 % водню;

- викиди оксиду вуглецю безперервно зменшуються зі збільшенням заміщення воднем для всіх ступенів стиснення за 100 % навантаження;

- зі збільшенням частки водню рівень оксидів азоту також зростає. Встановлено, що він є вищим за більшого ступеня стиснення та вмісту водню;

- утворення твердих частинок різко зменшується зі збільшенням частки водню;

- для меншої частки водню та більшої – дизельного палива зростання тиску зменшується зі зменшенням навантажень;

- швидкість виділення тепла зростає зі збільшенням кількості водню за високих потужностей;

- пікові тиски для всіх ступенів стиснення були отримані за максимальних заміщень воднем та високих потужностей;

- підвищена температура на вході призводить до збільшення утворення оксидів азоту та прискорення швидкості горіння. Спостерігається різке збільшення оксидів азоту з 400 до 900 ppm, коли температура підвищується з 65 °C до 85 °C [9].

Цікавим є винахід Дональда Овенса з Каліфорнії (США), підтверджений патентом № US9574492B2, яким запропоновано портативну систему додаткової подачі водню та метод зниження викидів твердих частинок й інших шкідливих речовин дизельними двигунами в режимах холостого ходу, коли двигуни працюють в неоптимальних режимах.

За класифікацією цю розробку віднесли до пристроїв для генерації водню. Проте суть винаходу є ширшою, адже стосується системи живлення (воднем) та способу підвищення ефективності горіння в камері згорання дизельних (та інших) двигунів, а також зниження викидів твердих частинок та інших шкідливих речовин у режимах ялового (холостого) ходу. Досить тривалий час роботи на холостому ході (наприклад, для забезпечення комфортних умов для водія та пасажирів, роботи допоміжного обладнання тощо) характерний для двигунів важких вантажівок, що здійснюють дальні перевезення, міжміських автобусів, а на залізниці – тепловозів. Порівняно тривалий режим роботи двигуна на яловому ході властивий і для транспортних засобів, що експлуатуються в умовах міського дорожнього руху.

Отже, зазначена розробка – це портативна система, що дозволяє методом електролізу генерувати в потрібній кількості (в певний момент) газоподібний водень, контролювати та регулювати його подачу у впускний тракт двигуна внутрішнього згорання, тим самим забезпечуючи більш повне згорання палива в камері згорання. Водень і кисень генерують електролізером за низьких температур і тиску з демінералізованої води. Водень і кисень подають окремими трактами, отже гази залишаються розділеними. Водень направляють у впускну систему двигуна, тоді як кисень відводять в атмосферу.

Окрім дизельного палива, нова система була випробувана для таких вуглеводневих видів палива, як метилциклогексан, толуол, декалін, пропан і гас. Для кожного палива вимірювали дані швидкості полум'я за різних умов.

Результати показали значне збільшення швидкості ламінарного полум'я з додаванням водню. У деяких випадках результати були майже лінійними. Очевидно, що точний характер згорання з використанням водню залежить від летючості палива. Додавання водню, за деяких умов, збільшувало швидкість згорання вуглеводневого палива більш ніж удвічі. Збільшення швидкості полум'я для багатьох палив поширюється на нормальний та підвищений тиск. Завдяки цьому збільшенню швидкості полум'я можна підвищити ефективність згорання та знизити викиди твердих частинок.

Система може живитися від автомобільного генератора, автономної батареї, тепла відпрацьованих газів або сонячної енергії. Система використовує датчик двигуна або інтерфейс бортової діагностики (OBD), під'єднаний до OBD-терміналу автомобіля чи іншого електронного контролера, щоб регулювати живлення системи та відстежувати частоту обертання двигуна і роботу системи додаткової подачі водню, що миттєво генерує потрібну кількість водню і подає в двигун за певної частоти обертання двигуна, визначеної OBD-терміналом автомобіля. Отже, виробництво водню для двигуна контролюється і регулюється як у режимі валового ходу, так і в інших режимах роботи. Водень, що виробляється, відразу використовується двигуном. Водень не зберігають ані в транспортному засобі, ані навколо нього [10].

Японські дослідники з Університету Ямагучі та компанії Honda виконали дослідження «Вплив додавання водню до впускного повітря на згорання та екологічні характеристики дизельного двигуна». У роботі застосували одноциліндровий дизель з охолоджуваною системою рециркуляції відпрацьованих газів (EGR). Дизельне паливо впорскували безпосередньо в камеру згорання за допомогою системи Common Rail. Відпрацьовані гази подавали в охолоджувач EGR, а потім – до впускного колектора.

Загалом, експериментально досліджені робочі показники та екологічні характеристики дизеля з додаванням водню до впускного повітря за пізніх моментів упорскування

дизельного палива. Момент упорскування дизельного палива та частку водню у впускній суміші змінювали, тоді як теплову енергію, яка вироблялась за рахунок дизельного палива та водню за секунду, підтримували сталою на певному рівні.

Викиди оксидів азоту за частки водню 8-10 об. % були меншими, ніж без водню, за середніх і високих навантажень, оскільки момент упорскування дизельного палива було відтерміновано до такту розширення. Отже, викиди оксидів азоту досягли мінімуму за певної частки водню в суміші. Максимальна швидкість наростання тиску в циліндрі також досягла мінімуму за частки водню 10 об. %. Однак, бажано встановлювати максимальну швидкість наростання тиску в циліндрі менше ніж 0,5 МПа/град., щоб забезпечити низький рівень шуму згоряння, як і викидів оксидів азоту. Саме в разі впорскування дизельного палива при 4-6 градусах після ВМТ і 10 об. % водню максимальна швидкість наростання тиску в циліндрі була нижчою за обрану допустиму межу – 0,5 МПа/град.

Поєднання додавання водню з пізнім моментом упорскуванням дизельного палива сприяло згорянню за низьких температур, за якого викиди оксидів азоту зменшувалися без збільшення частки незгорілого палива. Для подальшого зменшення викидів оксидів азоту і димності випробувано різні ступені рециркуляції відпрацьованих газів. Димність збільшувалась зі зростанням ступеня рециркуляції, проте додавання 3,9 об. % водню у впускне повітря зменшувало димність більш ніж на 50 %. Ефект зменшення димності від додавання водню був більшим за вищий ступінь рециркуляції та пізніший момент впорскування дизельного палива. Як результат, у разі впорскування дизельного палива за 2 градуси до ВМТ із часткою водню 3,9 об. % димність становила 0 %, викиди оксидів азоту були низькими, циклові коливання – незначними, а максимальний тиск у циліндрі був прийнятним за майже стехіометричних умов без зниження теплової ефективності [11].

Фахівці ДП «ДержавтотрансНДІпроект» у тезах доповіді [12] запропонували провести дослідження впливу добавок водню на робочі показники та екологічні характеристики газодизельних двигунів, які працюють на стисненому природному газі із запальною

дозою дизельного палива. При цьому було б доцільно вивчити досвід демонстраційних проєктів, виконаних у США з використанням сумішей стисненого природного газу з воднем, відомих під комерційною назвою Hythane® (HCNG; 10–30 об. % водню, що відповідає приблизно 1,3–4,8 мас. %).

Практична реалізація викладених результатів досліджень і розробок, започаткування та поширення застосування добавок водню для дизелів, передусім у сфері автомобільного транспорту, стануть можливими за умови створення в Україні мережі водневих заправних станцій, що передбачено проєктом Водневої стратегії України [13], а також розроблення і впровадження безпечного газобалонного обладнання для зберігання водню на борту транспортного засобу і додаткової паливної апаратури для подачі добавок водню у двигун.

## Висновки

Наведені у статті результати експериментальних досліджень підтверджують перспективність застосування добавок водню та водневмісних газів у двигунах із запалюванням від стиснення для часткового заміщення дизельного палива, а також обґрунтовують доцільність досліджень використання сумішей стисненого природного газу та водню для газодизельних двигунів.

Обґрунтоване результатами досліджень належне врахування суттєвих відмінностей фізико-хімічних властивостей водню та дизельного палива під час переобладнання дизелів і їх адаптації до застосування добавок водню здатне поліпшити робочі показники та екологічні характеристики базових дизелів, зокрема транспортних.

## References

1. Karim, G. A., Klat, S. R. (1976). Hydrogen as a fuel in compression ignition engines. *Mechanical Engineering*, 98, 34–39.
2. Levterov, A. M., Bgantsev, V. M. (2019). Motor study of the impact of hydrogen microadditives on the toxicity indicators of a small-volume diesel. *Internal combustion engines*, (1), 46–49.
3. Hovorun, A. H., Korpach, A. O., Filonenko, O. D. (2016). The impact of adding hydrogen-containing gas on diesel performance under the loading mode. *Herald of KhNADU*, (74), 45–48.

4. Shalapko, D. O. (2019). Increasing the efficiency of ship engines of internal combustion by means of using small hydrogen additives to the main fuel. [Thesis of a dissertation on obtaining a scientific degree of a candidate of technical sciences]. Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

5. Santoso, W. B., Bakar, R. A., Nur, A. (2013). Combustion characteristics of diesel-hydrogen dual-fuel engine at low load. *Energy Procedia*, 32, 3–10.

6. Cernat, A., Pana, C., Negurescu, N., Lazaroiu, G., Nutu, C., Fuiiorescu, D. (2020). Hydrogen—An alternative fuel for automotive diesel engines used in transportation. *Sustainability*, 12(22), 9321.

7. Unni, J. K., Bhatia, D., Dutta, V., Das, L. M., Jilakara, S., Subash, G. P. (2017). Development of hydrogen fuelled low NO<sub>x</sub> engine with exhaust gas recirculation and exhaust after treatment. *SAE International Journal of Engines*, 10(1), 46–54.

8. Bose, P. K., Banerjee, R., Deb, M. (2011). Combustion and performance analysis of hydrogen direct injection with diesel as an ignition source at a particular injection timing with varying injection durations. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 5(2), 227–234.

9. Masood, M., Mehdi, S. N., Reddy, P. R. (2007). Experimental investigations on a hydrogen–diesel dual-fuel engine at different compression ratios. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129(2), 572–578.

10. Owens, D. W. (2017). Portable hydrogen supplemental system and method for lowering particulate matter and other emissions in diesel engines at idle (U.S. Patent No. US9574492B2). United States Patent and Trademark Office.

11. Miyamoto, T., Hasegawa, H., Mikami, M., Kojima, N., Kabashima, H., Urata, Y. (2011). Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(20), 13138–13149.

12. Holyk, A. V., Zakrevsky, O. I., Nazarenko, M. B. (2022). Prospects for the use of hydrogen in diesel engines operating on the gas-diesel cycle. In the book: Prospects for the development of road transport and infrastructure: Collection of theses of the All-Ukrainian scientific and practical conference (pp. 287–289). State Enterprise “State Road Transport Research Institute”.

13. Skosar, V. Yu., Voroshylov, O. S. (2022). Some elements of the H<sub>2</sub> strategy. In: Prospects for the development of automotive transport and infrastructure: a collection of papers of the International scientific and practical conference (December 14–16, 2022) (pp. 162–165). State Enterprise “State Road Transport Research Institute”.