

УДК 621.4-67

doi: 10.32620/aktt.2023.4sup1.05

О. Г. АНДРІЄЦЬ, О. А. ШЕВЧЕНКО, В. М. ОХМАКЕВИЧ, М. В. ХИЖНЯК

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ У ТЕПЛОВИХ ДВИГУНАХ

Предмет дослідження - використання інших альтернативних палив та водню у теплових двигунах в різних концентраціях на різних режимах експлуатації. **Метою** роботи є декарбонізація різних видів транспорту, особливо авіаційного, для підвищення енергоефективності та екологічних показників теплових двигунів. **Завдання:** дослідити використання таких альтернативних палив, як біопаливо, синтетичне паливо, водень та водневі суміші. Використання авіаційних палив показує, що вони повинні задовольняти відповідним вимогам, тому вибір альтернативних палив повинен задовольняти цим вимогам з покращенням їх характеристик, перш за все, з енергоефективності та екологічних показників. Для цього, починаючи з наземного випробування сучасного авіаційного двигуна, фірмою Rolls-Royce було проведено випробування на ранньому концептуальному демонстраторі з використанням зеленого водню. Зелений водень був створюваний енергією вітру та припливів щоб довести, що водень може бути авіаційним паливом майбутнього з нульовим викидом вуглецю. Після аналізу ранньої концепції наземних випробувань розробники планують серію подальших випробувань на стенді, що призведе до повномасштабного наземного випробування реактивного двигуна на зеленому водні у перспективі досягти нульового чистого викиду вуглецю з двигуна **Методи дослідження.** Згідно з рекомендаціями IPCC про використання дефіцитного палива підраховані коефіцієнти шкідливих викидів (EI) для деяких типів літаків для циклу Landing Take Off (LTO) (посадка / зліт). За таким самим методом підраховуються шкідливі викиди при використанні в двигунах альтернативних палив. Оскільки викиди від реактивного палива відіграють важливу роль у парниковому ефекті, для зменшення викидів впроваджуються нові технології, серед яких однією з найефективніших і екологічно чистих є використання біопалива, оскільки біопаливо виробляється за допомогою сучасних біологічних процесів. В роботі виконано експериментальне дослідження впливу додатка водню до традиційного дизельного палива двигуна внутрішнього згорання. **Результати.** Визначено, що подача невеликих добавок газоподібного водню в колектор дизеля підвищує коефіцієнт корисної дії двигуна на номінальному та в більшій мірі на часткових режимах роботи. Покращуються екологічні параметри дизеля: зменшується концентрація оксидів азоту у вихлопних газах, на 30-40% і на 35% знижується вміст сажі. Визначено розрахунковий метод для кількісної оцінки шкідливих викидів при використанні альтернативних палив в авіаційних двигунах. **Висновки.** Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що отримані залежності можуть бути використані при виборі виду палива для теплових двигунів та визначення оптимальної концентрації альтернативного палива, наприклад водню, для підвищення енергоефективності та покращення екологічних показників теплових двигунів.

Ключові слова: альтернативне паливо; тепловий двигун; біопаливо; зелений водень; коефіцієнт корисної дії; шкідливі викиди.

Вступ

Сучасний період характеризується інтенсивним наступом альтернативних технологій у всіх сферах, особливо у використанні екологічно нейтрального палива замість викопних енергоресурсів. У Євросоюзі діє «Зелена угода» («GreenDeal»), у світі створений Союз з чистого водню («CleanHydrogen»), потужні компанії вкладають значні ресурси у декарбонізацію різних видів транспорту. Вже до 2025 року фахівці очікують активізацію проєктів з декарбонізації економіки – проєктів зі зниженим вуглецевим та азотним слідом, штрафами за надмірні викиди шкідливих речовин та використання вуглеводневих палив. У

ЄС послідовно включають усе, що зв'язано з рухом, у схему торгівлі квотами на шкідливі викиди.

Транспорт – одна з першочергових сфер застосування зеленого водню, Україна єдина з країн не членів ЄС, хто представлений у Європейській водневій асоціації. Дослідження з використання рідкого водню, в авіації почалися ще з кінця XX сторіччя. Також поширюється використання таких альтернативних палив, як біопаливо, синтетичне паливо та інші. У Франції дослідження авіаційного біопалива (БП) почалося у 90-х роках XX століття. На заводі Snecma більш, ніж 500 двигунів CFM-56-7B, що використовуються на літаках Boeing 737, без конструкційних змін напрацювали більше 50 млн. операційних годин

на суміші 30 % біопалива і 70 % авіаційного гасу JetA1 з метою оцінки впливу палива на об'єм викидів CO₂ і потужність. Перший пробний переліт Лондон – Амстердам з використанням біопалива (суміші 20% палива на основі олії кокосу й бразильських горіхів бабассу та 80% традиційного авіаційного гасу) на одному з чотирьох двигунів літака Боїнг 747 здійснила Британська авіакомпанія Virgin Atlantic у лютому 2008 р. Після цього відбулися випробувальні польоти на різних типах літальних апаратів і двигунів авіакомпаній Японії, Франції, Іспанії, США, Китаю [1,2] із застосуванням сумішей 50% БП і звичайного авіаційного гасу без конструкційних змін двигунів. Наразі авіаперевізники переходять від експериментальних польотів до комерційного використання біопалива. Літаки авіакомпанії Qatar Airways (Катар) вже декілька років застосовують суміші 1:1 традиційного і синтетичного гасу: політ літака цієї авіакомпанії з Йоганнесбурга відбувся на 100% синтетичному гасі.

1. Постановка задачі дослідження

Перехід до тривалих польотів примусив хімотологів розробити спеціальні термостабільні палива - реактивні, тобто авіаційні гаси. Зростання споживання карбонатних, нафтових палив [1,2] призвело до значного збільшення темпів витрачання не поновлюваних запасів нафти, які за прогнозами можуть бути повністю вичерпані вже в нинішньому столітті, тому постала проблема пошуку і досліджень альтернативних палив, що також дають можливість значно зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу.

У якості змінників традиційних авіаційних палив пропонуються і випробовуються:

а) біопаливо (БП) рідке - спирти (метанол з відходів деревообробної промисловості та етанол з цукрового буряку, очерету цукру, горіхів бабассу).

б) кріогенні палива – водень рідкий і скраплений природний газ (СПГ), що містить не менше 85% метану.

в) зріджений вуглеводневий газ (ЗВГ) – суміш пропану, бутану і можливо пентану - його називають авіагазом або авіаційним сконденсованим паливом.

г) синтетичне рідке вуглеводневе паливо, що отримують за методом Фішера – Тропша з синтезу газу (суміш CO і H₂), що одержують газифікацією твердих палив (вугілля, сланців) або конверсією метану [3].

г) рідке біопаливо (БП) - спирти (метанол та етанол).

Перспективними щодо зменшення викиду парникових газів й мінімізації фінансових витрат вважаються синтетичні вуглеводневі палива, а також гідрогенізовані продукти переробки рослинних олій і тваринних жирів.

Досвід використання авіаційних палив показує, що вони повинні задовольняти вимогам:

1) високі енергетичні характеристики (густина, теплота згоряння);

2) оптимальна здатність випаровуватись, потрібна для повнішого випаровування і згоряння рідкого палива;

3) надійне прокачування, що забезпечується фізичною однорідністю (відсутністю твердих домішок, вільної води, кристалів льоду), а також низькою температурою початку кристалізації та не дуже високою в'язкістю при низькій температурі;

4) забезпеченість сировинними ресурсами, невисока ціна;

5) низька корозійність рідкого палива та продуктів згоряння; сумісність з неметалевими матеріалами (композитами, гумою, пластмасами, герметиками);

6) низька токсичність, якомога менша шкідлива дія на довкілля.

7) стабільність при транспортуванні, тривалому зберіганні та використанні. Палива для тривалих надзвучових польотів повинні бути термостабільними, тобто неохильними до утворення твердих осадів при температурі 150°C і вище;

8) низька схильність до утворення нагару і золи при згорянні.

Якою мірою відповідають цим вимогам різні палива? Рідкий водень і гідровані біопалива, особливо одержані з водоростей, сьогодні ще фінансово затратні для широкого використання, але швидкий розвиток технологій їх вироблення та транспортування, підготовка введення податку на карбонізаційні палива, у першу чергу на транспорті, дає можливість розглядати зелений водень як фінансово привабливий у найближчі роки.

У табл. 1 наведені значення густини (ρ) та нижчої масової теплоти згоряння палив (H_m), у таблиці 2 – абсолютна та відносна об'ємна теплота згоряння палив, у таблиці 3 - температура кипіння компонентів палив.

Таблиця 1

Енергетичні характеристики палив

Паливо	ρ , кг/м ³	H_m , МДж/кг
ТС-1	≥ 775 (293 К)	$\geq 42,9$
Т-6	≥ 840 (293 К)	$\geq 42,9$
Т-8В	≥ 800 (293 К)	$\geq 42,9$
Водень рідкий	73 (20,4 К, 30 МПа)	119,3
Метан (СПГ) рідкий	415	49,6
Пропан-бутан(ЗВГ)	501,0 (293 К)	48,2
Біопаливо (етилпальмітат)	857,7 (298 К)	39,1
Метанол	791,7(293 К)	19,9
Етанол	789 (293 К)	26,7

Таблиця 2

Абсолютна та відносна об'ємна теплота згоряння палив

Паливо	Hv, МДж/м ³	ΔHv, %
ТС-1	≥ 33248	0
Т-6	≥ 36036	+ 8,4
Т-8В	≥ 34320	+ 3,2
Рідкий водень	8490	- 74,5
Рідкий метан (СПГ)	20584	- 38,1
Пропан-бутан (ЗВГ)	24053	- 27,7
Біопаливо (метилпальмитат)	≈ 33450	+ 0,6
Метанол	15755	- 52,6
Етанол	21066	- 36,6

Таблиця 3

Температура кипіння компонентів палив

Речовина	Ткипіння °С,(К)
Водень	- 254,4 (20,6)
Метан (СПГ)	- 161,6 (11,4)
Пропан (ЗВГ)	- 42,1 (230,9)
Бутан (ЗВГ)	- 0,5 (272,5)
Біопаливо (Метилпальмитат)	211,5 (484,5) при 30 мм рт.ст.
Метанол	+ 64,5 (337,5)
Пропанол	+ 78,4 (351,4)

Порівняно з традиційними гасами криогенні палива, ЗВГ та спирти забезпечують надійніше займання й повніше згоряння, вони менш схильні до сажо- та нагароутворення.

Порівняно з традиційними гасами криогенні палива, ЗВГ та спирти забезпечують надійніше займання й повніше згоряння, вони менш схильні до сажо- та нагароутворення. Водню притаманні також надзвичайно широкі концентраційні межі займання, що обумовлює дуже високу стабільність його горіння. На прикладі біопалива - метилпальмитату видно, що біопалива з рослинних олій тут поступаються решті палив, але, як очікують, тверді частки (ТЧ) після їх спалювання, на відміну від ТЧ неповного згоряння нафтопродуктів, не є канцерогенними.

У складі рідких авіаційних гасів корозію металів викликають органічні кислоти (їх вміст не має перевищувати 0,9 % за масою) та деякі сполуки сульфуру (S, загальний вміст сульфуру в паливах має бути не більше, ніж 0,25 % за масою). У складі продуктів згоряння небезпечним є діоксид сульфуру IV (SO₂), а також домішки ванадію і молібдену. Останні – це каталізатори окиснення заліза, тому небезпечні при вмісті навіть 0,00001 % [8]. СПГ і ЗВГ містять невелику частку сульфуру, тому їх руйнівна дія на метали не перевищує відповідну дію традиційних палив. Небезпечна дія рідкого водню пов'язана з тим, що невеликі за розмірами молекули Н₂ дифундують через порожнини у кристалічних ґратках металів (1 об'єм палладію поглинає 850 об'ємів водню; 1 об'єм сталі при 500° С поглинає ≈ 0,05 об'ємів водню, а при 1450° С – до 2 об'ємів). Дифузія водню у метали призводить до підвищення їх крихкості. Це створює великі технічні труднощі в роботі з воднем при високих температурах і тиску.

лікі за розмірами молекули Н₂ дифундують через порожнини у кристалічних ґратках металів (1 об'єм палладію поглинає 850 об'ємів водню; 1 об'єм сталі при 500° С поглинає ≈ 0,05 об'ємів водню, а при 1450° С – до 2 об'ємів). Дифузія водню у метали призводить до підвищення їх крихкості. Це створює великі технічні труднощі в роботі з воднем при високих температурах і тиску.



Рис. 1. Двоатомна молекула зеленого водню

Біопаливо, одержане з рослинних олій пере-етерифікацією та наступним гідруванням, складається переважно з естерів. Під дією води ці речовини розкладаються на корозійно небезпечні вищі органічні кислоти й нижчі спирти. Використання палив цього типу потребуватиме додавання до них протикорозивних присадок. Спирти (метанол та етанол) за хімічною природою є слабкими кислотами, працювати у їх середовищі можуть тільки спеціальні нержавіючі сталі. Протизношувальна дія рідких нафтових палив забезпечується головним чином наявністю поверхневоактивних речовин (ПАР) і меншою мірою в'язкістю самого палива. Авіаційний гас ТС-1 містить достатньо природних ПАР, до палив РТ і Т-8В додають протизношувальну присадку «К» (суміш органічних кислот), але в'язкість цих палив приблизно однакова (1,5 мм²/с при 20 С).

Гас Т-6 із значно вищою в'язкістю (≈ 4 мм²/с при 20°С) не потребує протизношувальних присадок. Серед альтернативних палив найкращі протизношувальні властивості мають біопалива на основі рослинних олій. Контакт з воднем зменшує міцність металів і сприяє «водневому зношуванню» пар тертя. Стабільність реактивних палив при транспортуванні та зберіганні в найпершу чергу залежить від наявності ненасичених вуглеводнів (олефінів), здатних швидко окиснюватися з утворенням шкідливих продуктів. Вміст олефінів оцінюють йодним числом. Для палив різних марок йодне число не має перевищувати 0,5...3,5 г І₂/100 г, це відповідає найбільшому припустимому вмісту олефінів 0,3...1,9 % за масою. Рідкий водень і метан (основа СПГ) хімічно стабільні, їх тривале зберігання ускладнюється надзвичайно високою леткістю цих палив, що потребує підтримання дуже низької температури й надійної ізоляції. ЗВГ більш схильний до

окиснення, оскільки може містити 4...6 % ненасичених вуглеводнів. Найменш стабільними є біопалива на основі рослинних олій. Шкідливу дію на довкілля оцінюють за кількістю вуглекислого газу (CO_2), який утворюється при згорянні палив. Порівняно з традиційними авіаційними гасами об'єми викидів CO_2 , обчислені за рівняннями реакцій повного згорання, становлять для водню – 0%; для СПГ – 88%; для ЗПГ – 96%; для переестерифікованого та гідрованого біопалива на основі рослинних олій – 88%; для метанолу – 44%; для етанолу 61%.

Компанії Rolls-Royce та easyJet сьогодні підтвердили, що вони встановили нову віху в авіації, 22 грудня 2022р. запустивши перший у світі сучасний авіаційний двигун на зеленому водні, рис. 1. Наземне випробування було проведено на ранньому концептуальному демонстраторі з використанням зеленого водню, створеного енергією вітру та морських припливів. Це знаменує собою важливий крок на шляху доведення того, що водень може бути авіаційним паливом майбутнього з нульовим викидом вуглецю, і є ключовим доказом у стратегіях декарбонізації як Rolls-Royce, так і easyJet.

Випробування проводилися на відкритому випробувальному полігоні в МО Боскомб-Даун, Великобританія, з використанням переобладнаного регіонального авіаційного двигуна Rolls-Royce AE 2100-A. Зелений водень для випробувань надав ЕМЕС (Європейський морський енергетичний центр), - водень, вироблений з використанням відновлюваної енергії на їхньому заводі для виробництва водню з використанням нових технологій електрогенерації, що базуються на приливах та відливах морських хвиль на Оркнейських островах шельфа Великобританії. Після аналізу цієї ранньої концепції наземних випробувань партнерство планує серію подальших випробувань на стенді, що призведе до повномасштабного наземного випробування реактивного двигуна Rolls-Royce типу Pearl 15.

Партнерство засноване на компанії RacetoZero за підписаної угоди з ООН - сторони зобов'язались досягти нульового чистого викиду вуглецю з двигуна до 2050 року.



Рис 2. Наземний випробувальний стенд з ГТД АЕ-2100-А

Все більше досліджень приділяється останнім часом вивченню реалізації згорання водню та його забезпечення у надзвукових швидкостях потоку у камері згорання для створення гіперзвукових літальних апаратів (ГЛА) з гіперзвуковими повітряно-реактивними двигунами (ГПРД). Дослідження з розробки ГЛА з ГПРД доказали можливість його здійснення та економічну ефективність створення гіперзвукової транспортної системи [4]. Особливістю ГПРД є надзвукова швидкість повітряного потоку на вході в камеру згорання з числом Маху 1,5 – 3,5 [5] при збільшенні швидкості польоту ГЛА до 8-12 Маху. При таких швидкостях потоку час перебування палива (суміші) у камері згорання біля 1 мсек, а відносно низький статичний тиск біля 0,05-0,25МПа призводить до різкого ускладнення сумішоутворення, запалювання та стійкого горіння [5].

Різні газодинамічні та конструктивні розробки досліджуються для забезпечення запалення суміші (самозапалення водню) та стабілізації полум'я та дослідженнями встановлено, що вибір схеми та тиску подачі палива [6] визначають умови запалення і дозволяють регулювати процес згорання, наприклад, кут подачі водню на реалізацію стійкого горіння[7] та залежність підвищення тиску в камері згорання та замикання каналу від коефіцієнта надлишку палива, що має значення, наприклад, в діапазоні від $\beta = 0,30$ до $\beta = 1,2$. Займання суміші часто відбувається внаслідок взаємодії ударної хвилі з прикордонним шаром та його відривом, а може бути досягнуто зустрічною подачею палива та взаємодією струменів. Через технологічні міркування висновок у тому, що займання та стабілізація полум'я є основною проблемою під час розробки ГПРД, оскільки стабілізація горіння з мінімальними втратами повного тиску та високим рівнем тепловиділення є ключем до досягнення високих характеристик ГПРД.

2. Результати

2.1. Шкідливі викиди в авіаційних двигунах

Викиди від двигунів літака залежать від типу палива двигуна, навантаження двигуна, висоти польоту. Головні викиди ГТД – CO_2 , NO_x , SO_x . Коефіцієнти викидів CO_2 добре визначені з точки зору авіаційного палива та мають чітко визначену якість. NO_x і SO_x дуже незначні.

Кількість CO_2 , що виробляються двигуном, створює $2\text{C}_8\text{H}_{18} + 25\text{O}_2 \rightarrow 16\text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O}$. Це рівняння показує, що CO_2 буде пропорційним використанню палива. Згідно з джерелом рекомендацій IPCC про використання дефіцитного палива підраховані коефіцієнти шкідливих викидів (EI) для деяких типів

літаків для циклу Landing Take Off (LTO) (посадка/зліт), kg / LTO (табл.4).

Шкідливі викиди з авіаційних двигунів вважаються твердими частками (ТЧ) і мають вплив на зміну клімату. Тверді частки, які викидаються з ГТД, можна класифікувати як нестабільні та стабільні. Викиди ТЧ, що утворюються авіаційними двигунами, це наночастинки розмірами від (5 нм до 100 нм), містять різноманітні токсичні забруднювачі повітря вулицевої природи.

Таблиця 4

Коефіцієнти шкідливих викидів EI для деяких типів літаків для циклу LTO (посадка / зліт)

Тип літака (тип двигуна)	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂	Паливо
A 320 (CFM56-5B)	2560	0,04	0,1	0,7	810
B 727 (JT8D-1)	4455	0,3	0,1	1,4	1410
DC-9 (JT8D-5)	2780	0,8	0,1	0,9	880
B 727 (CFM56-3C1)	2625	0,08	0,1	0,8	830
Concorde (Rolls – Royce / SnecmaOlim- puse 593)	2029	10,7	0,8	6,4	6420

Для вимірювання ТЧ у літаків може бути використана методологія **FOA** (наближення першого порядку), яка вимірює масу ТЧ та оцінює нестабільні та стабільні ТЧ. Це методи, такі як: FOA v 1.0, FOA v 2.0, FOA v 3.0.

FOA v1.0: Для вимірювання стабільних ТЧ. Тут дані про витрату палива (**FF** – Fuel Flow) і числа диму (**SN** – Smoke Number) можна отримати з банку даних ICAO, використовуючи наступне рівняння:

$$EI \text{ (mg / Kg)} = 0,6 \text{ (SN)}^{1,8} * \text{ (FF)} .$$

FOA v2.0: Для вимірювання нестабільних ТЧ, використовуючи таке рівняння:

$$EI \text{ (mg / Kg)} = 2,4 \text{ (SN)}^{1,8} * \text{ (FF)} .$$

FOA v 3.0: У 2007 році він був розроблений, щоб включити всі компоненти (стабільні і нестабільні) для отримання точних результатів. Тож тут ми можемо використовувати наступне рівняння:

$$EI \text{ total} = EI \text{ vols} + EI \text{ nvols} .$$

Оскільки викиди від реактивного палива відіграють важливу роль у парниковому ефекті, для зменшення викидів впроваджуються нові технології, серед яких однією з найефективніших і екологічно чистих є використання біопалива. За таким же методом підраховуються шкідливі викиди при використанні в двигунах альтернативних палив. Оскільки біопаливо виробляється за допомогою сучасних високотехнологічних біологічних процесів, воно виробляється

безпосередньо із рослин, або опосередковано з сільськогосподарських, комерційних, побутових або промислових відходів. Згідно з дослідженнями NASA, біопаливо може скоротити викиди сажі принаймні на 50% та скоротити викиди парникових газів на 80% у порівнянні з традиційним реактивним паливом. Гарним прикладом для цього можуть бути авіакомпанія AlaskaAirline: у 2017 році вона здійснила до 75 комерційних рейсів, використовуючи біопаливо з рослинної олії, і планує використовувати суміш біопалива для своїх рейсів у майбутньому.

2.2. Застосування домішок водню у двигунах внутрішнього згорання

Метою цієї роботи є розрахункове дослідження впливу добавок водню в основне паливо при різному навантаженні двигуна типу МАК 6 М 25 номінальною потужністю 1500кВт та частотою обертання 750 об/хв, з питомою витратою дизельного палива 182г/кВт-год. У ході аналізу досліджувалась робота двигуна на різних навантаженнях до номінального режиму $Ne = 0,25 \dots 1,0$ та добавках водню в паливо від 0,5 до 10% від маси дизельного палива. У приміщеннях із системами подачі газоподібного водню в повітряний колектор дизеля з метою безпеки встановлюються датчики об'ємної концентрації водню, які спрацьовують за умов:

- при об'ємній концентрації 0,5% – дають звуковий та світловий сигнали;

- при об'ємній концентрації 1,0% подають сигнал на автоматичний клапан, який перекидає подачу водню в повітряний колектор дизеля.

На кожному режимі роботи дизеля визначалася питома ефективна витрата палива (b_e). Витрата водню g_h змінювався від 0,5 - 10% витрати дизельного палива g_e . Усі дані визначалися на кожному режимі. Витрата водню g_h , г/(кВт-год.), змінювався від 0,5 до 10 % витрати дизельного палива та у відсотках визначався як $m_{H_2} = g_h/g_e \cdot 100 \%$.

На кожному режимі роботи двигуна розраховується питома ефективна витрата палива за формулою:

$$b_e = g_e + 2,84g_h, \text{ г/(кВт-год)}, \quad (1)$$

де: 2,84 – є відношенням значень нижчої питомої теплоти згорання водню (121100 кДж/кг) та дизельного палива ($Q_h=42700$ кДж/кг).

Ефективний ККД двигуна визначався так:

- при роботі без добавок водню як:

$$\eta_{e=3600} = 10^5 / (g_e \cdot Q_h), \quad \% ; \quad (2)$$

- при роботі з добавками водню як:

$$\eta_{e=3600} = 10^5 / (b_e \cdot Q_h), \quad \% . \quad (3)$$

Економія дизельного палива за рахунок добавок водню на режимі визначалася як:

$$\Delta g_e^* = ((g_e - g_{eh}) / g_e) \cdot 100\%, \text{ г/(кВт·год)}. \quad (4)$$

Аналогічно визначалася відносна зміна ефективного ККД двигуна за рахунок добавок водню:

$$\Delta \eta_e^* = ((\eta_e - \eta_{eh}) / \eta_e) \cdot 100\%. \quad (5)$$

Очевидно, що про економічну доцільність застосування водневих добавок можна судити з економії дизельного палива, що припадає на одиницю маси добавки водню. З цією метою введено такий параметр, як відносне скорочення питомої ефективної витрати дизельного палива $\Delta g_e / g_h$, що є відношенням скорочення питомої ефективної витрати дизельного палива Δg_e , г/(кВт·год), до питомої витрати водню g_h , г/(кВт·год).

Цей параметр показує, скільки грамів дизельного палива, що припадає на 1 кВт ефективної потужності N_e , економиться при подачі в двигун 1 грама водню на 1 кВт N_e . Він характеризує ефективність використання водню та названий коефіцієнтом ефективності використання водню. За його максимального значення ефективність використання водню буде найбільшою.

Аналіз показав, що економія дизельного палива Δg_e (Δg_e^*) за рахунок застосування добавок водню залежить від частоти обертання колінчастого валу, з якою працює за навантажувальною характеристикою в залежності від ефективного тиску P_e .

Як видно на рис. 3 криві залежності $\Delta g_e / g_{H_2}$ – економія витрати палива від кількості добавок водню m_{H_2} мають екстремуми, яким відповідають добавки водню m_{H_2} , що становлять приблизно 1,5 %. Зі зменшенням навантаження на двигун N_e ефективність використання водню збільшується, що підтверджує доцільність застосування добавок для компенсації негативного впливу часткових режимів навантаження на економічність дизеля.

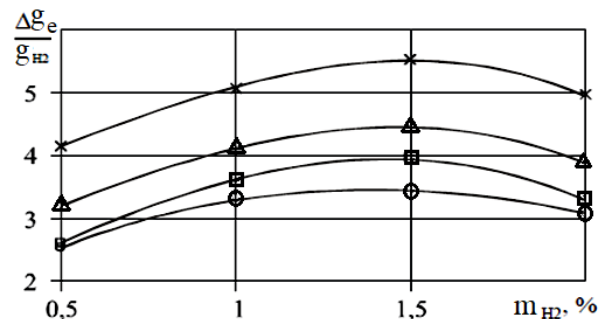


Рис. 3. Залежність відносного скорочення питомої ефективної витрати дизельного палива $\Delta g_e / g_{H_2}$, % від кількості добавок водню m_{H_2} при температурі повітря на вході $t_v = 20^\circ\text{C}$ та різних навантаженнях на двигун N_e^* :

x – $N_e^* = 0,25$; Δ – $0,50$; \square – $0,75$; o – $1,0$

З рисунка також видно, що кожен 1 грам добавки водню забезпечує скорочення питомої витрати дизельного палива на 3...5 грам.

Далі досліджувалась робота двигуна при різних навантаженнях і додаванні водню в паливо 1,0%; 2,0%; 3,0%; 5,0%; 7,5% і 10% від маси дизельного палива. Для кожного режиму роботи дизеля визначалися: питома ефективна витрата палива, витрата водню, витрата палива, ефективність ККД двигуна без присадок і з присадками водню, зміна ККД двигуна за рахунок добавок водню та економія дизельного палива за рахунок додавання водню.

Споживання водню г/(кВт·год) змінювалося від 1,0% до 10% від маси споживання дизельного палива і у відсотках визначалося за формулою:

$$m_{H_2} = \frac{g_h}{g_e} \cdot 100\% = g_h \frac{m_{H_2} \cdot g_e}{100}, \text{ г/(кВт·год)}.$$

Результати розрахунків за даною формулою наведені у табл. 5.

Таблиця 5

Витрати палива g_e від навантаження двигуна

		Водень H_2 -концентрація у паливі, %					
		1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10,0
Навантаження, %	0,25	2,6	5,2	7,8	13	19,5	26
	0,5	2,1	4,2	6,3	10,5	15,75	21
	0,75	2,01	4,02	6,03	10,05	15,075	20,1
	1,0	1,82	3,64	5,46	9,1	13,65	18,2

Питомі ефективні витрати палива в г/(кВт·год) розраховувались за залежністю:

$$b_e = g_e + 2,84 \cdot g_h,$$

де 2,84 – являє собою співвідношення значень найменших питомих теплот згоряння водню (121100 кДж/кг) і дизельного палива ($Q_{H_2} = 42700$ кДж/кг).

Результати розрахунків за даною формулою наведені у табл. 6.

Таблиця 6

Питомі ефективні витрати палива в залежності від навантаження двигуна

		Водень H_2 . концентрація у паливі, %					
		1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10,0
Навантаження, %	0,25	257,47	255,10	252,86	248,85	244,65	241,38
	0,5	207,96	206,04	204,24	200,99	197,60	194,96
	0,75	199,05	197,21	195,48	192,38	189,14	186,61
	1,0	180,23	178,57	177,01	174,19	171,26	168,97

При роботі двигуна з добавками водню ККД розраховувались за формулою:

$$\eta_e^H = 3600 \cdot \frac{10^5}{(b_e \cdot Q_h)}, \%$$

де $Q_h = 42700$ кДж / кг – найменша питома теплота згоряння дизельного палива. Результати розрахунків наведені у табл. 7 на рис. 4.

Таблиця 7

Ефективний ККД двигуна з добавками водню

		Водень H ₂ - концентрація у паливі, %						
Навантаження, %		1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10,0	
	0,25	32,75	33,05	33,34	33,88	34,46	34,93	
	0,5	40,54	40,92	41,28	41,95	42,67	43,24	
	0,75	42,36	42,75	43,13	43,82	44,57	45,18	
	1,0	46,78	47,21	47,21	48,40	49,23	49,90	

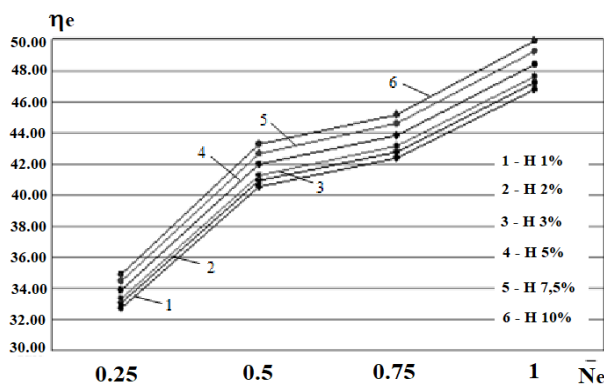


Рис. 4. Ефективний ККД двигуна

Відносна зміна ефективного ККД двигуна внаслідок додавання водню розраховувалась за формулою:

$$\Delta \eta_e^* = \left(\frac{\eta_e - \eta_e^H}{\eta_e} \right) \cdot 100\%$$

Результати розрахунків наведені у табл. 8.

Таблиця 8

Відносна зміна ефективного ККД двигуна

		Водень H ₂ -концентрація у паливі,%						
Навантаження, %		1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10,0	
	0,25	0,99	1,91	2,81	4,47	6,26	7,71	
	0,5	0,97	1,92	2,81	4,48	6,28	7,70	
	0,75	1	1,93	2,84	4,48	6,27	7,73	
	1,0	0,99	1,92	2,83	4,49	6,28	7,73	

Економія дизельного палива за рахунок добавок водню розраховувалась за формулою:

$$\Delta g_e^* = \left(\frac{g_e - b_e}{g_e} \right) \cdot 100\%$$

Результати розрахунків наведені у табл. 9 та на рис. 5.

Таблиця 9

Економія дизельного палива з добавками водню

		Водень H ₂ - концентрація у паливі,%					
Навантаження, %		1,0	2,0	3,0	5,0	7,5	10,0
	0,25	0,97	1,88	2,75	4,29	5,90	7,16
	0,5	0,97	1,89	2,74	4,29	5,90	7,16
	0,75	0,97	1,89	2,75	4,29	5,90	7,16
	1,0	0,97	1,88	2,74	4,29	5,90	7,16

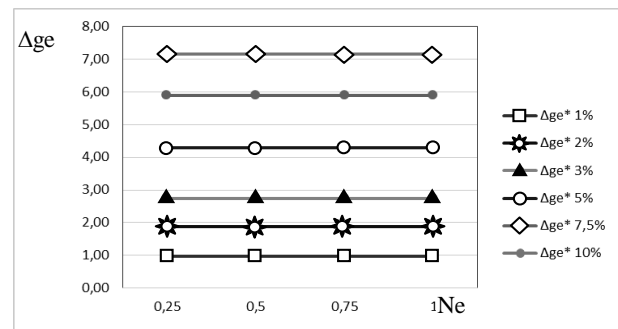


Рис. 5. Економія дизельного палива за рахунок добавок водню

Результати досліджень показали, що максимальна ефективність водневих добавок має місце при малих їх кількостях – масових 1..10 %, що їх застосування не створює будь-яких суттєвих проблем під час експлуатації,

Висновки

1. Аналіз характеристик альтернативних палив для застосування в авіаційних ГТД показує, що найбільш оптимальними для програми зеленої енергетики найближчим часом є біопаливо та водень з урахуванням удосконалення та здешевлення технологій їх виробництва, а також здешевлення в експлуатації. Рідкий водень і метан (основа СПГ) хімічно стабільні, їх тривале зберігання ускладнюється надзвичайно високою леткістю цих палив, що потребує підтримання дуже низької температури й надійної ізоляції

2. Замінником авіаційних гасів є близький до них за хімічним складом і властивостями синтетичний гас, який одержують за методом Фішера-Тропша

з вугілля, сланців, метану та інших видів природної сировини й відходів деяких виробництв. Етанол та метанол суттєво поступаються традиційним авіаційним гасам за енергетичними характеристиками і мають дуже високу корозійну активність.

3. Застосування невеликих добавок водню до палива збільшує ефективність роботи чотиритактного високо обертового двигуна до 2,3% абсолютних. Ефективним є використання водню як додаткового палива на режимах від холостого ходу до номінального, а також на перехідних режимах, так як водень має широкі концентраційні межі займистості та горіння, випромінює здатність полум'я, що забезпечує зниження радіаційного обміну зі стінками циліндрів, на порядок вищими швидкостями горіння та коефіцієнтом дифузії.

4. До позитивних ефектів, зумовлених застосуванням добавок водню, слід віднести також підвищення маневреності та стійкості режиму роботи двигуна на перехідних та часткових режимах.

5. Проведені розрахунки та огляд даних з експериментальних досліджень дають підстави вважати, що добавки водню до основного дизельного палива є ефективним засобом підвищення економічності роботи теплових двигунів.

6. Від застосування невеликих добавок водню покращуються екологічні параметри дизеля: зменшується концентрація оксидів азоту у газах, що відпрацювали, на 30-40%, вуглецю і на 35% знижується вміст сажі.

7. Тенденція розвитку теплових двигунів на транспорті з застосуванням альтернативних палив збережеться і буде прискорюватись, особливо з введенням штрафів та квот на використання карбонатних палив.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **О. Г. Андрієць, О. А. Шевченко**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **О. Г. Андрієць**; огляд використання альтернативних палив – **В. М. Хижняк**; обробка даних та представлення результатів – **В. М. Охмакевіч**; аналіз результатів та формулювання висновків – **О. Г. Андрієць, О. А. Шевченко, В. М. Хижняк**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. ДСТУ 4796:2007. Паливо авіаційне для газотурбінних двигунів Джет А-1. Технічні умови [Текст]. – Київ, Держспоживстандарт України, 2007. – 10с.

2. *Авиационное биотопливо Китая* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://capital.kz/world/14781/kitaj-razrabotal-aviacionnoe-biotoplivo.html/> (дата звернення: 11.02.2023).

3. *Синтетический авиакеросин из опилок, угля, метана* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iv-g.livejournal.com/805692.html> (дата звернення: 13.02.2023).

4. Jackson, K. R. *Mach 6-8 hydrocarbon-fueled scramjet flight experiment: the HIFIRE flight 2 project* [Text] / K. R. Jackson, M. R. Gruber, S. Buccellato // *J. Propulsion and Power*. – 2015. – Vol. 31, № 1. – P. 36-53.

5. Micka, D. J. *Stratified jet flames in a heated (1390K) air cross-flow with autoignition* [Text] / D. J. Micka, J. F. Drscoll // *Combustion Flame*. – 2012. – Vol. 159. – P. 1205-1214.

6. *Investigation of Influence of detailed chemical kinetics mechanisms for hydrogen on supersonic combustion using large eddy simulation* [Text] / B. Liu, G. O. He, F. Oin, J. An, S. Wang, I. Shi // *Intern. J/Hydrogen Energy* – 2019. – Vol. 44, No. 10. – P. 4870-4883.

7. Ladeinde, F. *Differential turbulent supersonic combustion of hydrogen, methane and ethylene, without assisted ignition* [Text] / F. Ladeinde, W. Li // *AIAA J.* – 2018. – Vol. 56, No. 12. – P. 4870-4883.

8. Андрієць, О. Г. *Застосування водню у якості присадки до палива* [Текст] / О. Г. Андрієць, Р. А. Прохоров // *Удосконалення проектування і експлуатації морських суден та споруд: матер. VI Всеукраїнськ. науково-техн. конф. мол. вчених, Севастополь, 6-9 грудня 2011 р. – 2011. – С. 124-126.*

References

1. DSTU 4796:2007. *Palyvo aviatsiyne dlya hazoturbinnnykh dyvuhuniv Dzheta A-1. Tekhnichni umovy* [State Standard of Ukraine 4796:2007. Aviation fuel for Jet A-1 gas turbine engines. Specifications]. Kyiv, State consumer standard of Ukraine, 2007. 10 p.

2. *Aviacionnoye biotoplivo Kitaya* [Aviation biofuels of China]. Available at: <http://capital.kz/world/14781/kitaj-razrabotal-aviacionnoe-biotoplivo.html/> (Accessed 11 February 2023).

3. *Sinteticheskiy aviakerosin iz opilok, uglya, metana* [Synthetic jet kerosene from sawdust, coal, methane]. Available at: <https://iv-g.livejournal.com/805692.html> (Accessed 13 February 2023).

4. Jackson, K. R., Gruber, M. R. & Buccellato, S. *Mach 6-8 hydrocarbon-fueled scramjet flight experiment: the HIFIRE flight 2 project*. *J. Propulsion and Power*, 2015, vol. 31, no. 1, pp. 36-53.

5. Micka, D. J. & Drscoll, J. F. *Stratified jet flames in a heated (1390K) air cross-flow with auto-ignition*. *Combustion Flame*, 2012, vol. 159, pp. 1205-1214.

6. Liu, B., He, G. O., Oin, F., An, J., Wang, S. & Shi, I. *Investigation of Influence of detailed chemical kinetics mechanisms for hydrogen on supersonic combustion using large eddy simulation*. *Intern. J/Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no 10, pp. 4870-4883.

7. Ladeinde, F. & Li, W. *Differential turbulent supersonic combustion of hydrogen, methane and ethylene*,

without assisted ignition. *AIAA J*, 2018, vol. 56, no. 12, pp. 4870-4883.

8. Andriets, O. G. & Prokhorov, R. A., Zastosuvannya vodnyu u yakosti prysadka do palyva [Use of hydrogen as a fuel additive]. *Udoskonaluyuvannya proektuvannya i ekspluatatsiyi mors'kykh suden ta*

sporud: mater. VI Vseukrayins'k. naukovo-tekh. konf. mol. vchenykh – Improvement of the design and operation of sea vessels and structures: Mater. VI All-Ukrainian. scientific and technical conf. minor scientists, 2011, pp. 124-126.

Надійшла до редакції 16.06.2023, розглянута на редколегії 08.08.2023

FEATURES OF THE APPLICATION OF ALTERNATIVE FUELS IN HEAT ENGINES

*Oleksandr Andriets, Oleh Shevchenko, Valery Ohmakevych,
Mykhailo Khyzhniak*

The subject of the study is the use of alternative fuels and hydrogen in heat engines in different concentrations at different operating modes. **The purpose of this study** is to decarbonize various types of transport, especially aviation, to increase the energy efficiency and environmental performance of heat engines. **Task:** to investigate the use of such alternative fuels as biofuels, synthetic fuels, hydrogen and hydrogen mixtures. The use of aviation fuels shows that they must satisfy the relevant requirements, so the choice of alternative fuels must satisfy these requirements with the improvement of their characteristics, first in terms of energy efficiency and environmental indicators. To do this, starting with the ground test of a modern aircraft engine, Rolls-Royce conducted tests on an early conceptual demonstrator using green hydrogen. Green hydrogen was created by wind and tidal energy to prove that hydrogen could be the zero carbon aviation fuel of the future with zero carbon emissions. After analyzing the early ground test concept, the developers are planning a series of further bench tests leading to a full-scale ground test of a green hydrogen jet engine with the goal of achieving zero net carbon emissions from the engine. **Research Methods.** According to the recommendations of the IPCC on the use of scarce fuel, the coefficients of harmful emissions (EI) are calculated for some types of aircraft for the Landing Take Off (LTO) cycle (landing / takeoff). Harmful emissions are calculated using the same method when alternative fuels are used in engines. Since jet fuel emissions play an important role in the greenhouse effect, new technologies are being introduced to reduce emissions, among which one of the most effective and environmentally friendly is the use of biofuels, as biofuels are produced using modern biological processes. In this study, an experimental study of the influence of hydrogen addition on a traditional internal combustion diesel engine was conducted. **The results.** It was determined that the supply of small additions of gaseous hydrogen to the diesel manifold increases the efficiency of the engine at nominal and, largely, at partial modes of operation. The environmental parameters of the diesel engine are improved: the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases decreases, the soot content decreases by 30-40% and by 35%. A calculation method for the quantitative assessment of harmful emissions when using alternative fuels in aircraft engines is defined. **Conclusions.** The practical significance of the obtained results is that the obtained dependencies can be used when choosing the type of fuel for heat engines and determining the optimal concentration of an alternative fuel such as hydrogen to increase energy efficiency and improve the environmental performance of heat engines.

Keywords: alternative fuel; heat engine; biofuel; green hydrogen; efficiency; harmful emissions.

Андрієць Олександр Григорович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Шевченко Олег Анатолійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Охмакевич Валерій Миколайович – старш. викл. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Хижняк Михайло Володимирович – асп. каф. авіаційних двигунів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Oleksandr Andriets – PhD, Associate Professor, Docent of the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: andriets1@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0930-3190.

Oleh Shevchenko – PhD, Associate Professor, Docent of the Department of Applied Mechanics and Engineering Materials, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: oashev@nau.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7559-0573.

Valery Ohmakevych – Senior Lecturer of the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: vnakuka@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4860-9080.

Mykhailo Khyzhniak – PhD Student of the Department of Aviation Engines, National Aviation University, Kyiv, Ukraine,
e-mail: nessmike3@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2919-370X.