

Перспективи застосування двигуна швидкого внутрішнього згорання у приводі мобільної техніки. Частина I: Ефективність енергоносіїв для теплового двигуна

П. М. Гашук¹ • С. В. Нікіпчук²

1 – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна;

2 – Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

Received: 03 February 2020 / Accepted: 24 February 2020

Анотація. Двигун внутрішнього згорання – високоінтелектуальний продукт цивілізації. Досягнувши надзвичайно високого рівня досконалості, він, проте, породив істотні екологічні проблеми. Тож все частіше й наполегливіше йому шукають альтернативу. Мета статті – з'ясувати, наскільки претензії до двигуна внутрішнього згорання є об'єктивними, і якими можуть бути перспективи його застосування в приводі мобільної техніки. До уваги беруться як властивості власне двигуна, так і властивості використовуваних ним енергоносіїв.

Екологічні проблеми пов'язують значною мірою з наявністю в традиційному пальному карбону. Але оперування одночасно поняттями масової і об'ємної, вищої і нижчої теплот згорання пального, а також поняттям теплотворної здатності пальної суміші засвідчило, що практично не існує беззастережних альтернатив звичному бензинові.

Істотною корисною ефекту існують підстави сподіватись від просування технології об'ємного запалювання стисненням ідеально гомогенізованої робочої суміші – технології Homogeneous Charge Compression Ignition. Ця технологія дозволяє гранично підвищити ефективність якраз процесу швидкого внутрішнього згорання, властивого саме Отто-двигуну. Тож цілком реальними є можливості істотного удосконалення саме двигуна Отто і широкі перспективи саме його застосування для приводу мобільних машин з великим ступенем автономності.

Ключові слова: двигун швидкого внутрішнього згорання, паливо, пальна суміш, теплотворна здатність, мобільна техніка, енергетична ефективність, екологічність

Вступ

Рівень досконалості мобільної техніки визначають перш за все ступінь її автономності, радіус і потужність функціональної активності, енергоощадність (енергоефективність), екологічність. Усе перелічене в значній мірі зумовлюється властивостями привідної системи. У приводах практично всіх машин з високим рівнем автономності й далекосяжності – електрогенераторів, мотопомп, дронів, гвинтокрилів, самохідних робочих і транспортних засобів, розміновувачів, пожежно-рятувальних мультифункційних машин, рятувального устаткування тощо – переважно застосовують двигуни швидкого внутрішнього згорання.

Двигун швидкого внутрішнього згорання – цивілізаційного рівня винахід, який приніс людству надзвичайно багато користі. Він досягнув доволі високого рівня технічної досконалості, але водночас спричинився до значних екологічних проблем, які у наш час стали дуже дошкульними. Було б цікаво оцінити перспективи подальшого удосконалення і застосування саме такого стибу двигуна на мобільних машинах високого ступеня автономності і далекого радіусу дії, у яких застосування електричного приводу є проблематичним.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Найприроднішим, найзагальнішим і найоб'єктивнішим мірилом ефективності й досконалості хоч-якої мобільної машини є її енерго(ексерго)ощадність за регламентованого рівня продуктивності. Енерго(ексерго)ощадність – це ще й запорука високого рівня екологічності машин. Такого типу мірило ефективності доречно прикладати також окремо і до пального, і до двигуна як такого.

Ефективність пальної суміші доречно оцінювати за нижчою теплотворною здатністю [1]. Та частіше оперують нижчою теплотворною здатністю не суміші, а суто пального [2]. Насправді цілком об'єктивну оцінку будь-якого пального можна отримати лише в тому разі, якщо брати до уваги теплотворність як одиниці маси, так і одиниці об'єму. Зокрема водень має найбільшу теплоту згорання, віднесена до одиниці маси, але наймен-

шу, віднесена до одиниці об'єму. Вуглецеві, навпаки, властива найбільша теплота згорання, віднесена до одиниці об'єму. Тож однозначність оцінки тут немислима.

Позитивну роль у процесі теплотворення відіграє високий ступінь гомогенності пальної суміші. Тому великі сподівання покладають на реалізацію так званого НССІ-двигуна (Homogeneous Charge Compression Ignition Engine) [3–5]. Процес згорання у разі організації об'ємного самозаймання гомогенної суміші є швидкоплинним і супроводжується високою швидкістю тепловиділення [6, 7]. В НССІ-двигуні легше поєднати високу ефективність і високу екологічність. Але не кожний різновид палива придатний для такого використання.

Мета та завдання дослідження

Мета статті – з'ясувати, наскільки сьогоденні претензії до традиційного двигуна внутрішнього згорання є об'єктивними з огляду на властивості застосовуваних різновидів носіїв енергії і які альтернативні різновиди енергоносіїв здатні сприяти подальшому підвищенню енергоефективності й екологічності теплових двигунів, застосовуваних в приводі мобільної техніки з високим рівнем автономності і далекого радіусу дії. Для досягнення мети були окреслені такі завдання:

- провести аналіз питомої (від одиниці маси) і об'ємної (від одиниці об'єму), вищої і нижчої теплотворної здатності різних видів пального;
- оцінити енергетичну ефективність сумішей різних палив з повітрям;
- формальними засобами порівняти палива і з'ясувати рівень придатності кожного з них для живлення двигуна швидкого внутрішнього згорання.

Методи й результати дослідження ефективності різних енергоносіїв для двигуна внутрішнього згорання

Пальним для двигунів внутрішнього згорання досі залишаються бензин, дизельне паливо, газ. Але тепер придатність пального оцінюють через призму екологічності у двох найголовніших аспектах: зважаючи на загрозу глобального потепління через викиди диоксида вуглецю CO_2 – парникового газу – та переймаючись помітним виснаженням світових запасів вуглеводневої сировини із супутньою руйнацією довкілля. Тож визріло критичне ставлення до вмісту вуглецю (карбону) у пальному.

Екологічними проблемами вчені й конструктори автомобілів, приміром, почали впритул займатися ще в 60–70 роках минулого століття. По-перше, удосконалювався сам двигун у напрямі зниження питомої витрати пального (підвищення коефіцієнта корисної дії), поліпшення процесів горіння-теплотворення, зменшення механічних втрат тощо. По-друге, впроваджувалися каталітичні нейтралізатори-допалювачі відпрацьованих газів двигуна, що супроводжувалось не завжди доцільним зростанням вартості автомобіля і само по собі не сприяло підвищенню його енергоощадності. І, по-третє, провадився активний пошук альтернативного пального, і звертали увагу навіть на екзотичні види пального.

Колись на одній з німецьких хімічних фабрик знезацька «закипів» дрібнодисперсний порошок кремнію (Si), що зберігався, як належало, в герметичній мідній тарі в середовищі азоту. У процесі ретельного дослідження цього явища з'ясувалось, що порошок кремнію може вступати в реакцію з азотом за присутності каталізатора – окису міді, сліди якого власне і виявили в тарі. Реакція активується за умови попереднього нагрівання компонентів до $500\text{ }^\circ\text{C}$. Тож кремній ненароком проявив себе як досконале пальне, горіння якого не супроводжується продукуванням парникового газу CO_2 . Кремній, на відміну від всіх інших видів палива, в певному сенсі безпечний: поки поруч немає каталізатора навіть блискавка чи зварювальний пальник його не підпалить. Але в пилоподібному стані він так само небезпечний, як водень. Цікаво, що сілани $\text{Si}_n\text{H}_{2n+2}$ окислюються значно краще за вуглеводні.

Чистий кремній можна одержати шляхом відновлення оксиду SiO_2 надлишком магнію Mg при нагріванні: $\text{SiO}_2 + 2\text{Mg} = \text{Si} + 2\text{MgO}$. Енергія, витрачена на нагрівання, згодом компенсується тією кількістю енергії, що вивільниться у реакції з азотом. Тож кремній потенційно міг би стати енергоносієм для теплових двигунів. Але краще, звісно, спалювати кремній у двигунах зовнішнього згорання. І якщо мова йде про “нітратний пісок” – продукт взаємодії кремнію з азотом, то є сенс зважати на те, що з нітриду кремнію можна одержати аміак, а з нього, далі, водень. Причому таке виробництво водню є істотно вигіднішим, аніж одержання його з води. Тож відпрацьований нітратний пісок також є цінним продуктом.

Уважають, що відновлювати кремній краще в пустелі, використовуючи електричну енергію від сонячних батарей. Але чи варто виготовляти кремнієве пальне в настільки далеких куточках Землі, а потім перевозити його на великі відстані в осередки транспортної активності? Транспортування вже готової електроенергії може виявитися вигіднішим за морське транспортування майбутньої енергії у вигляді блоків кремнію. Але в такому разі автомобільний транспорт приречений стати електричним?

Випробування доводять екологічні переваги водню як пального для двигунів внутрішнього згорання. Очевидною перевагою водню також є практична невичерпність його джерел-носіїв в природі та можливість одержання з поновлюваних сировинних джерел. Водень має надзвичайно високу енергоємність (майже втричі більшу, ніж у традиційних нафтових палив). Він є ідеальним екологічно чистим паливом, тому що в продуктах

його згоряння відсутні вуглекислий газ, окис вуглецю, незгорілі вуглеводні (хоча можливі залишки оксидів азоту). Щоправда, водень перед використанням було б добре перетворити на рідину, а для цього його слід охолоджувати до $-253,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, так що техніка живлення паливом такого штибу не є простою.

На сьогодні випробувані три способи зберігання водню: у стані стисненого газу в балонах високого тиску, у зрідженому стані в криогенних резервуарах й у зв'язаному стані в металогідридних акумуляторах. Але водень здатний проникати крізь більшість матеріалів, з яких виготовляють двигуни, а у разі його дифузії в метали останні стають крихкими, гублять міцність і перестають тримати навантаження.

Взагалі кажучи, водень, скраплений, стиснений чи зв'язаний в гідридах металів, має надто низьку густину. До того ж, суміш водню з киснем – вибуховий газ величезної сили, а отже обіг його пов'язаний із чималими труднощами. Ще слід наголосити на тому, що навіть зважаючи на вищу теплотворну здатність в об'ємному вимірі H_{pv} , водень як пальне вже не виглядає дуже привабливим, рис. 1, 2 (H_{pm} – вища теплотворна здатність одиниці маси пального).

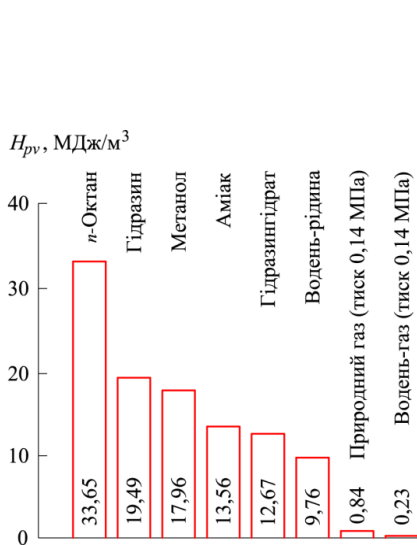


Рис. 1. Порівняння об'ємної вищої теплотворності незвичних палив

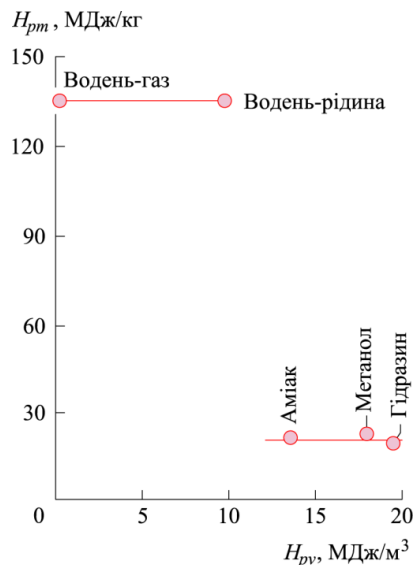


Рис. 2. Особливий прояв теплотворності незвичних палив

Розмістити на об'їмку автомобіля потрібну кількість водню є в певному сенсі проблематичним завданням. Тож поряд з вищою та нижчою теплотворними здатностями пального його густина – важливий оцінний параметр, табл. 1. Гідразин – це азотоводневе паливо ($\text{H}_2\text{N}-\text{NH}_2$), а n-октан тут править за аналог бензину (температура замерзання гідразину надто висока – $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, що істотно обмежує його використання).

Покладають надію також на можливість одержання водню з деяких рідких вуглеводневих палив безпосередньо на об'їмку автомобіля. Суть такої технології полягає в ініціюванні процесу хімічного перетворення первинного палива у енергетично збагачене конверсійне завдяки поглинанню теплоти від відпрацьованих газів двигуна. Отримане конвертоване паливо також бере участь в робочому циклі двигуна. За наочний приклад практичної реалізації такої технології можуть правити газогенераторні автомобілі, що порівняно широко застосовувалися в 30–40-і роки минулого сторіччя.

Таблиця 1

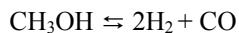
Порівняння основних параметрів окремих незвичних палив

Пальне	Вища теплота згоряння, МДж/кг	Нижча теплота згоряння, МДж/кг	Густина, кг/м ³ (за температури $25\text{ }^{\circ}\text{C}$)
n-Октан	47,903	44,407	0,6985
Метанол	22,685	19,934	0,7821
Етанол	29,636	26,767	0,7894
Рідкий аміак	21,404	17,527	0,6819
Гідразин	19,419	16,677	1,0037
Рідкий водень	137,978	116,130	0,0798 ($-253,3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

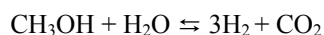
Для організації ендотермічного процесу конверсії пального в процесі роботи двигуна внутрішнього згоряння важливим є правильний вибір первинної вуглеводневої сполуки, здатної при заданому середньому тем-

пературно-енергетичному рівні теплоносія розкладатися на газоподібні продукти. Найдоцільнішим є продукування синтез-газу з вуглеводневих палив ненафтового походження – з метанолу, приміром.

Метанол сам по собі є альтернативним паливом, яке застосовують або замість бензину, або як добавку до бензину. До того ж, продукування метанолу є економічно вигідним, оскільки дозволяє утилізувати відходи промисловості й життєдіяльності. Метанол вдвічі поступається перед бензином своєю “енергогустиною”, але зберігання й транспортування його практично таке саме, як у бензині. Водневе паливо – синтез-газ, що містить від 2/3 до 3/4 водню за об’ємом, може бути отримане з метанолу шляхом каталітичного розкладання



(суха конверсія) або розкладання з участю води



(парова конверсія) за порівняно низьких температур – до +500 °С у присутності якого-небудь традиційного каталізатора на основі благородних металів. Другий компонент синтезу-газу, одержуваного сухою конверсією метанолу, – окис вуглецю – також є паливом. Натомість двоокис вуглецю, що утворюється у разі парової конверсії метанолу, може виявитися також корисним – як засіб розбавлення робочого заряду задля забезпечення сприятливіших умов для згоряння водню у двигуні. Необхідну теплоту для поглинання у процесі творення синтез-газу з метанолу на об’явку автомобіля можна відібрати від відпрацьованих газів (температура відпрацьованих газів двигуна з іскровим запалюванням – 300...800 °С) і від системи охолодження двигуна (температура охолодної рідини – близько 90 °С).

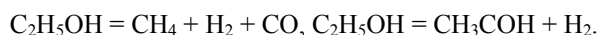
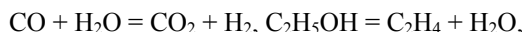
Серед альтернативних палив, придатних для живлення двигунів внутрішнього згоряння, увагу привертає також біоетанол, який виготовляють здебільшого з кукурудзи (США) і цукрової тростини (Бразилія). Але для виробництва біоетанолу придатні також інші сільськогосподарські культури з великим змістом крохмалю або цукру: маніок, картопля, цукровий буряк, батат, сорго, ячмінь... Але чи варто зазіхати на харчові продукти?

Недоліки біоетанолу – низька теплотворна здатність ($H_u = 26,77$ МДж/кг, див. табл. 1), висока теплота випаровування і низький тиск насиченої пари. Ефективним способом підвищення енерговидатності біоетанолу можна вважати термохімічну конверсію його в реакторі, що є складовою частиною двигуна. Під дією теплоти відпрацьованих газів, приміром, відбувається ендотермічна реакція хімічного перетворення біоетанолу на синтез-газ – суміш газів CO і H₂. Хімічна енергія отриманого синтез-газу перевищуватиме енергію використаного біоетанолу на величину, що дорівнює кількості утилізованої теплоти відпрацьованих газів. Теплотворна здатність продуктів конверсії 1 кг рідкого біоетанолу на понад 20 % вища – 34,87 МДж.

Основну реакцію процесу парової конверсії біоетанолу у синтез-газ відображає рівняння



Поряд з нею можуть перебігати й побічні реакції, основними серед яких є такі:



Та доводиться зважати на те, що повнота конверсії біоетанолу зазвичай є надто низькою (40...60 %), а наявність реактора істотно погіршує масогабаритні показники двигуна.

Хоча водень часто розглядають як замітник традиційного пального в двигунах внутрішнього згоряння, та є тверді підстави вважати його енергоносієм радше для паливних осередків (елементів чи комірок, Fuel Cells – англійською). Паливні комірки – це пристрої прямого перетворення хімічної енергії водню й кисню в електричну, пристрої “холодного горіння”. Робочий процес у них супроводжується утворенням чистої води і незначним виділенням тепла. Ефективнішого і екологічно чистішого пристрою генерування енергії ніхто поки що не знає.

Насправді енергоносієм для двигуна внутрішнього згоряння є суміш палива з окиснювачем, а не просто паливо. За нижчої теплотворної здатності палива H_u нижча теплотворна здатність пальної суміші на основі повітря визначатиметься за формулою [1]

$$H_{us} = \frac{H_u}{1 + \lambda l_0}, \quad (1)$$

де $\lambda \geq 1$ – коефіцієнт надлишку повітря, l_0 – кількість повітря, необхідного для створення стехіометричної суміші. Коли $\lambda < 1$, для цілковитої реалізації теплотворної здатності суміші не вистачатиме повітря, тож в такому разі із зростанням λ до одиниці зростатиме й теплотворна здатність суміші. Та й коли $\lambda > 1$, теплотворна здатність суміші знову зростатиме у разі $\lambda \rightarrow 1$.

Для різних палив значення величин H_{us} (властиво паливо) і $H_{us(\lambda=1)}$ (стехіометрична суміш палива з повітрям) наведено в табл. 2 у відносних відсотках (за 100 % правлять значення H_u і $H_{us(\lambda=1)}$ для бензину). Отже з огляду на теплоту (1) згоряння суміші як такої різні палива не такі вже й різні.

Таблиця 2

Оцінка теплотворності палив

Паливо	H_u , %	$H_{us(\lambda=1)}$, %	l_0 , кГ/кГ
Бензин	100	100	14,9
Бензол для двигунів	93	103,5	13,3
Спирт етиловий (безводний)	63	100	9,0
Спирт метиловий (безводний)	45	95	6,5
Дизельне паливо	91...101	99	14,5
Гас	96	98	14,7
Водень	234	104	34,8

На рис. 3 зіставлено теплоти згоряння різних палив, віднесені до одиниці маси H_{um} і до одиниці об'єму H_{uv} [2]. За одиницю вимірювання енергії (теплоти згоряння) прийнята енергія відповідно чи H_{um0} , чи H_{uv0} , одержувана від спалювання гасу (подібні параметри має й бензин). Тож водень, як зазначалося, має найбільшу теплоту згоряння, віднесена до одиниці маси, і найменшу, віднесена до одиниці об'єму. Вуглецеві, навпаки, властива найбільша теплота згоряння, віднесена до одиниці об'єму.

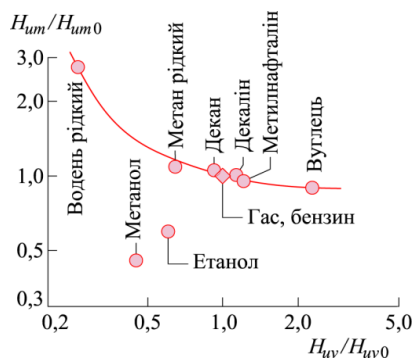


Рис. 3. Відносне порівняння теплотворності палив у логарифмічних координатах

Використовувані вуглеводні, можна казати, є своєрідними "компромісами" між воднем і вуглецем, а оптимальне відношення С/Н вуглецю до водню у складі палива визначає високу якість горіння і позначається на їх експлуатаційних властивостях. Оскільки масова теплота згоряння вуглеводнів змінюється мало, то доцільно прагнути до підвищення їх об'ємної теплоти згоряння.

Очевидно, що метиловий і етиловий спирти не належать до хороших палив. Високою об'ємною теплотою згоряння наділені бор ($131,5$ МДж/дм³), берилій ($116,2$ МДж/дм³), алюміній ($82,5$ МДж/дм³). Проте застосування їх навіть як авіаційне паливо пов'язане з надмірними витратами і значними труднощами (через наявність у продуктах згоряння рідких фаз V_2O_5 , BeO , Al_2O_3).

Палива для мобільних машин повинні мати три основні ознаки досконалості.

1. Енергетична якість – якомога вища ніжча теплота згоряння, як можна більша густина, а також якнайменша молярна маса продуктів згоряння.

2. Кінетична якість, що поєднує в собі всі параметри, що характеризують перебіг процесу теплотворення/тепловиділення. До них відносять, перш за все, умови впорскування (зумовлені густиною, в'язкістю і поверхневим натягом палива), що позначаються на випаровуванні крапель, утворенні твердих відкладень, виникненні димів, інтенсивності виділення теплоти, утворенні забруднюючих викидів...

3. Експлуатаційна якість, до якої віднесено можливість тривалого зберігання в резервуарах за незмінних таких властивостей, як легкість, точка замерзання, пружність випарів, та хімічної пасивності щодо резервуарних стінок. Важливе значення мають вміст ароматиків і металів, стабільність складу, відсутність підвищеної токсичності, обмежений зміст домішок азоту, сірки, металів... Для системи живлення і впорскування палива потрібна підвищена теплостійкість. Експлуатаційна якість також залежить від організації постачання (умови вантаження/вивантаження й транспортування, комірна збережуваність і вартість).

Звичайний двигун внутрішнього згоряння – це повітряно-паливна теплова машина, яка перетворює речовинну (потенційну хімічну) енергію в механічну за посередництва теплотворення. Носіями речовинної енергії є паливо й повітря (повітря править за окиснювач). Хімічна енергія вивільняється унаслідок згоряння палива в повітрі. Процес згоряння пальної суміші відповідає процесові підведення теплоти в типовому робочому циклі теплової машини-двигуна. Продукти згоряння (гази) стають робочим тілом. Після виконання корисної роботи ці гази мають полишити робочий простір двигуна, а натомість в робочий простір мають потрапити нові порції пального й повітря. Отож процеси виштовхування відпрацьованих газів у довкілля і наповнення робочого простору новими порціями палива й повітря відповідають процесові відведення теплоти в типовому робочому циклі теплової машини-двигуна. Такого стибу теплової машині властива низка принципівих недоліків.

По-перше, через необхідність високого (10...20-кратного) попереднього стискування свіжої пальної суміші (здебільшого повітря) витрачається значна (близько 50%) кількість енергії, що міститься в енергоносії. Це наслідок того, що окиснювач-повітря є газом.

По-друге, аби перевести свіжу палну суміш в робочий стан треба прикласти значні зусилля для ретельного дозування її складників і якісної “гомогенізації”. Гетерофазне змішування і спалювання субстанції “пальне-рідина – окиснювач-газ” – технічно складне завдання. Легше, звісно, готувати гомогенну суміш з пального газу і окиснювача-газу, але в такому разі посилюється прояв першого недоліку.

По-третє, споживання повітря, в якому міститься потрібний кисень (здебільшого одна молекула кисню O_2 серед чотирьох молекул азоту N_2 ; 23 % за вагою чи 21 % за об’ємом), і викидання в атмосферу відпрацьованих газів – це в будь-якому разі негативний вплив на довкілля (навіть, якщо брати до уваги лише тепловий аспект забруднення атмосфери, хоча відведення теплоти у довкілля є корисним процесом термодинамічного циклу теплової машини). Зрештою, і добування з земних надр та технологічне кондиціонування палива неможливе без негативних наслідків для довкілля.

По-четверте, високі температури в робочому просторі та обмежена жаростійкість матеріалів двигуна зумовлюють потребу в його охолодженні. Тож частина теплової енергії з примусу полишає двигун.

По-п’яте, потужність повітряно-паливного двигуна вимушено обмежена через те що навіть, так би мовити, на дні атмосфери густина повітря-окиснювача є відносно малою (проте це вигідно в ширших сенсах). Тому доводиться вдаватися до примусового нагнітання повітря в робочий простір двигуна – наддуву.

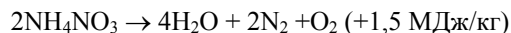
Деякі недоліки (не цілком, звісно, а лише в деяких аспектах) стають помітнішими на тлі можливих альтернатив. Приміром, порох, який можна трактувати як унітарне паливо, здатен без участі атмосфери за рахунок газового розпадання конденсованої речовини на порядок збільшити потужність процесу, хоча енергетична цінність порохів не є високою – 3,35...4,20 МДж/кг проти 44,0 МДж/кг (нижча теплота згоряння) у типового бензину.

У січні 1953 року в Червоному морі вибухнув і затонув гвинтовий пароплав “Тирренія” водотоннажністю чотири тисячі тонн. В історії морського судноплавства відомі і більш великі катастрофи – вибухи і пожежі на танкерах і суднах, що перевозили боєприпаси. Але “Тирренія” йшла, на перший погляд, з безпечним у вибухонебезпечному відношенні вантажем – аміачною селітрою. Якщо б це був одиночний факт, то причину вибуху можна було б шукати серед випадкових обставин. Проте в Реєстрі судноплавства Ллойда, що фіксує всі достатньо великі морські катастрофи, відзначено кілька десятків пожеж та вибухів, пов’язаних з аміачною селітрою. Почастішали вони в сорокові-п’ятдесяті роки, коли темпи промислового виробництва цієї речовини різко зросли. Рекордним виявився 1947 рік – у процесі завантаження суден у різноманітних портах відбулися три потужних вибухи, що призвели до великої кількості людських жертв.

Тим часом аміачна селітра (азотнокислий амоній, або нітрат амонію, NH_4NO_3) вже давно використовується у великих кількостях у техніці та сільському господарстві. Щорічне виробництво її складає десятки мільйонів тон.

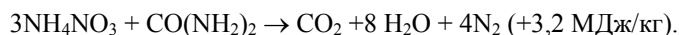
Нітрат амонію містить багато азоту, причому пов’язаного у два найкраще засвоюваних рослинами йони – аміачний і нітратний. Тому аміачна селітра – одне з найцінніших мінеральних добрив. А наявність великої кількості кисню обумовлює друге, не завжди мирне застосування нітрату амонію в якості окиснювача при виробництві порохів і вибухових речовин. Без домішок органіки, металів, нітрат амонію не вибухає. Він часто використовується в демонстраційних хімічних дослідах. Суміш же NH_4NO_3 із тротилом або алюмінієм – сильна вибухова речовина.

Звісно, було б добре на противагу порохів синтезувати рідке унітарне паливо. Відтак виникла, приміром, пропозиція звернути увагу на аміачну селітру NH_4NO_3 . Ціна гарячих 90 %-х розчинів аміачної селітри після синтезу-нейтралізації на виробництві добрив близька до ціни газованої води. В складі аміачної селітри наявні водень-пальне (5 %), кисень-окиснювач (понад 60 %), а кінцеві продукти екзотермічного розпаду



містять 45 % водяної пари (H_2O), 35 % азоту (N_2) і 20 % активного кисню (O_2) – майже як у повітрі. Тож аміачна селітра як окиснювач – це ніби те ж повітря, але з густиною монокристалу – 1,725 кг/дм³, ніби те ж повітря, але стиснуте за рахунок атомно-молекулярних в’язей десь у 1700 разів. Якщо б розчинити ще додатково водневовмісні пальні сполуки (5...20 %-і спирти, аміак, карбамід...), то екзотермічність газового розпадання розчинів можна б підняти до рівня 3,1...4,0 МДж/кг з вивільненням десь 1000 дм³/кг пари та газів (до рівня ефективності нітрогліцеринового бездимного пороху).

Карбамід (сечовина) $CO(NH_2)_2$, приміром, – похідне від аміаку і вуглекислоти (шкода, що присутній вуглець) – реагує з аміачною селітрою таким чином:



Натомість аміак NH_3 можна трактувати як приклад безвуглицевого палива. Зрідненість аміаку до аміачної селітри дуже висока. З цієї причини розчин 80/20 аміачної селітри в аміаку закипить у відкритій посудині за температури $+30\text{ }^\circ\text{C}$, хоча чистий аміак-розчинник кипить за температури $-3\text{ }^\circ\text{C}$. У разі стехіометричної пропорції 80/12 в системі “аміачна селітра – аміак” у відпрацьованих газах слід очікувати 66 % води і 34 % азоту. Стверджують, що малий надлишок NH_3 в робочому просторі здатен знищити усі можливі оксидноазотні домішки NO_x у продуктах розпаду аміачної селітри. Найбагатшим на водень є метиловий спирт CH_3OH (метанол). Енергетичну ефективність пального у разі стехіометричного залучення спирту-етанолу можна довести до 3,8 МДж/кг, а вміст вуглецю при цьому становитиме 5,3 %. Тож загалом вміст вуглецю в унітарному паливі-розчині може становити 0...5,5 %, а от його вміст в бензині – 85...90 %.

У двигуні внутрішнього згоряння з іскровою системою запалювання (spark ignition engine, SI-двигун) характер перебігу процесу горіння в циліндрі істотно залежить від однорідності змішування пального з повітрям. І важливу роль тут відіграють не тільки спеціальні пристрої, що за задумом мають забезпечувати однорідність пальної суміші, але й такі властивості самого пального, як температура кипіння й дифузійна схильність. Чим нижча температура кипіння пального, тим легше й швидше воно випаровуватиметься. Висока дифузійна схильність також сприяє гомогенізації (зоднорідненню) пальної суміші. Приміром, водень й оксид вуглецю (основні складові так званого синтез-газу) зазначеними властивостями значно кращі за бензин.

Зауважмо, саме згадуваний уже водень наділений властивостями, які сприяють забезпеченню гомогенності пальної суміші, і це позитивно позначається на робочих процесах, що перебігають у циліндрі двигуна. В істотно меншій мірі однорідність пальної суміші притаманна двигунам внутрішнього згоряння із (само)запаленням пальної суміші унаслідок стискання (compression ignition engine, CI-двигун). Часом усталенню неоднорідності намірено сприяють – приклад пошарового сумішоутворення.

Та насправді гомогенність пальної суміші бажана практично за будь-яких обставин. Якщо б, приміром, існувало ефективне унітарне пальне-газ, навряд чи виникла б потреба його якось трохи «дегомогенізувати». Відтак природно визріла ідея так званого HCCI-двигуна (Homogeneous Charge Compression Ignition Engine) [3–5], яку навряд чи можна вважати за змістом новою. Гомогенізований (ніби як у звичному SI-двигуні) дуже збіднений робочий заряд в HCCI-двигуні об'ємно самоzapalюється від стискання його до відповідного рівня – ніби як у CI-двигуні, але розосереджено, без явного прояву фронту полум'я. Тож HCCI-двигун – це ніби гібрид, що поєднує властивості у SI-двигуна та CI-двигуна. В ньому легше поєднати високу ефективність і високу екологічність. А от звичний фронт полум'я – це зона високих температур і осередок виникнення оксидів азоту у бензиновому і дизельному двигунах та сажі у дизельному двигуні.

Якщо SI-двигун – машина швидкого внутрішнього згоряння з локально високими температурами, а CI-двигун – машина повільного внутрішнього згоряння з відносно нижчими температурами, то HCCI-двигун – це машина швидкого внутрішнього згоряння з відносно низькою температурою горіння у всьому робочому просторі без турбулентного поширення полум'я. Якщо SI-двигун – машина з чи зовнішнім, чи внутрішнім, чи змішаним сумішоутворенням, а CI-двигун – машина із суто внутрішнім сумішоутворенням, то HCCI-двигун – машина із суто зовнішнім сумішоутворенням.

Організація HCCI-процесу можлива із ступенем стиснення пальної суміші, більшим за той рівень, який властивий звичним двигунам з іскровим запаленням такого самого типорозміру. Через відсутність локальних зон високої температури низькою стає середня температура робочого циклу, запобігаючи тим самим утворенню оксидів азоту. Оскільки тепловиділення в HCCI-процесі відбувається в умовах стиснення як у дизеля і за майже сталого об'єму, термічний ККД циклу з HCCI-процесом вищий, аніж в двигуні з примусовим запаленням. Процес згоряння у разі організації об'ємного самозаймання гомогенної суміші є доволі швидкоплинним (триває 7...20 градусів повороту колінчастого валу двигуна) і супроводжується високою швидкістю тепловиділення [6, 7]. А от відсутність (за задумом) запальних свічок (як у SI-двигуна) та паливних форсунок (як у CI-двигуна) усуває можливості активно керувати робочим процесом, а тому робочий цикл HCCI-двигуна доволі нестійкий. Через це реально доводиться все-таки користуватись послугами запальних свічок та форсунок навіть у разі намагання втілити HCCI-процес (радше псевдооб'ємне запалювання).

Обговорення результатів дослідження ефективності пального

Теорія ж не завжди здатна облікувати і точно співвіднести всі наслідки модифікації/варіації робочих циклів теплових машин, оскільки ці наслідки для неї часто є сутнісно дріб'язковими. Перш за все це стосується оцінювання якості пального через призму властивостей двигуна.

В класичному двигуні швидкого внутрішнього згоряння геометричний ступінь стиснення робочої суміші – незмінний зазвичай параметр, зумовлений розмірними параметрами хитневого (кривошипно-шатунного) механізму та будовою поршня й головки циліндра. Реальний (робочий) цикл двигуна швидкого внутрішнього згоряння Отто ідеалізують так званим термодинамічним циклом Отто, відображаючи в ньому той факт, що теплота (унаслідок згоряння пального) підводиться до робочого тіла (продукту процесу згоряння) здебільшого в околі верхнього мертвого положення хитневого механізму (миттєво за ходом поршня і нескінченно довго за часом). Ефективність термодинамічного циклу Отто оцінюють термічним коефіцієнтом корисної дії (ККД)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}, \quad (2)$$

де ε – ступінь стиснення робочої суміші, який є конструктивним параметром двигуна; k – показник адіабати, який характеризує робоче тіло. Формула (2) “натякає” на доцільність в реальному двигуні Отто будь-що збільшувати ступінь стиснення. А про температури, так би мовити, “гарячого” і “холодного” тіл тут взагалі не йдеться (на противагу циклові Карно, скажімо).

На доказ істинності цього примітивного орієнтира потужність і паливна ощадність поршневого двигуна реально таки справді зростають зі збільшенням ступеня стиснення. Але позитивний ефект спостерігається доти, поки цей параметр не досягне значення 13–14, а далі надмірно помітними стають механічні втрати. До того ж, вираз (2) загалом ігнорує властивості енергоносія як такого, оскільки показник адіабати править у більшій мірі за параметр повітря, яке власне й виконує функції робочого тіла в тепловій машині. А от ступінь стиснення є своєрідним мірилом, що дозволяє в першому наближенні ніби формально вирізнити легкі палива.

У двигунах Отто (в двигунах на легкому паливі), скажімо, ступінь стиснення є меншим від задекларованого значення через детонаційні обмеження. В двигунах Дизеля, навпаки, він більший за цей рівень, оскільки потрібно забезпечити надійне самозаймання пальної суміші під час пуску холодного двигуна. Істотного покращення властивостей двигуна можна досягнути засобами керованої зміни (поточного регулювання) ступеня стиснення. У дизелі регулюванням ступеня стиснення робочої суміші можна значно збільшити й утримувати на оптимальному рівні тиск наддуву, підвищуючи тим самим потужність двигуна. А можна, зберігаючи недоторканий рівень потужності, зменшити цим способом робочий об’єм (навіть кількість циліндрів) двигуна, ще й підвищуючи його паливну ощадність та зменшуючи його габарити й масу. У бензиновому двигуні, натомість, зниженням ступеня стиснення можна збільшити тиск наддуву без прояву явища детонації, підвищуючи завдяки цьому літрову потужність двигуна, а також його паливну ощадність на режимах великих навантажень. А з підвищенням ступеня стиснення паливна ощадність двигуна підвищуватиметься на режимах малих навантажень.

Технічно та сутнісно проблема регулювання ступеня стиснення (об’єму комори згоряння) близька до проблеми регулювання об’єму робочого простору двигуна. Але створення можливості регулювати об’єм робочого простору є значно продуктивнішим напрямом удосконалення двигуна. Тож регулювання ступеня стиснення доречно хоча б поєднувати з одночасним регулюванням об’єму робочого простору. Але фактичний ступінь стиснення робочого тіла істотно залежить також від властивостей (перш за все, продуктивності) системи наддуву. Тож в цьому випадку існує доволі широка й глибока системна проблема удосконалення двигуна внутрішнього згоряння, яку не варто ділити на окремі безвідносні одна до одної задачі.

На різних режимах роботи двигуна внутрішнього згоряння ступінь стиснення пальної суміші мав би бути якомога вищим – граничним для того чи іншого різновиду пального у тій чи іншій суміші з повітрям. Але при цьому з екологічних міркувань повинна б використовуватись винятково стехіометрична пальна суміш. Але оскільки у разі незмінного об’єму $\lambda = 1$ робочого простору двигуна цього водночас досягнути неможливо, то доводиться годитися на збіднення суміші або втілення робочого циклу Міллера [8–10] на часткових режимах роботи двигуна.

Якщо керуватись теплотворною здатністю одиниці маси стехіометричної суміші, то всі різновиди пального – майже рівноцінні (див. табл. 2). Але у разі збіднення суміші їх фактична відмінність стає дещо помітнішою. Приміром, якщо за орієнтир брати теплотворну здатність стехіометричної суміші бензину з повітрям, то теплотворна здатність збідненої суміші становитиме деяку частку h_{usb} (табл.3)

Таблиця 3

	$h_{usb}(\lambda = 1, 0)$	$h_{usb}(\lambda = 1, 1)$	$h_{usb}(\lambda = 1, 2)$
Бензин	1,00	0,91	0,84
Етиловий спирт (безводний)	1,00	0,92	0,85
Метиловий спирт (безводний)	0,95	0,88	0,81
Водень	1,04	0,95	0,87

Метиловий і етиловий спирти, як зазначалось, не належать до хороших енергоносіїв для двигуна швидкого внутрішнього згоряння. Ці спирти помітно випадають з загальної типової тенденції «теплотворення одиниці маси пального – теплотворення одиниці об’єму пального», якій зокрема підпорядкований бензин.

Технічно проблемним є використання об’ємно енергоємних різновидів палива (таких екзотичних, скажімо, як бор, берилій, алюміній, кремній...), у продуктах згоряння яких з’являються рідкі чи тверді фази. Тут навіть не йдеться про трюдощі сумішоутворення чи вартість цих палив. Значної користі є підстави сподіватись від застосування технології об’ємного запалювання ретельно гомогенізованої робочої суміші від стиснення – технології, відомої як Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI). Але вона висуває дуже жорсткі вимоги до палив щодо схильності до однорідного сумішоутворення з повітрям. І вона є своєрідним тестувальним засо-

бом, що дозволяє об'єктивно оцінювати перспективність того чи іншого різновиду пального. Зрештою, сумішоутворення є енерговитратним процесом.

Теплотворність одиниці маси водню у 2,3 разу (!) вища за теплотворну здатність такої самої кількості бензину. У стільки ж разів у порівнянні з бензином потрібно більше повітря для стехіометричного спалювання водню. Але водень-газ (див. рис. 2) практично не прийнятне для мобільних машин пальне з огляду на низьку теплотворну здатність одиниці його об'єму за нормальних і близьких до них умов у докільці. Водень-рідина, натомість, надмірно дороге пальне, не кажучи вже про технічні клопоти, що супроводжуватимуть його можливе споживання.

Вальтер Герман Нернст свого часу виснував теоретичну (!) формулу, що визначає електрорушійну силу хімічного елементу. Це дало змогу обчислити кількість електричної енергії, що могла б потенційно вивільнитися у разі електрохімічного сполучання вугілля з киснем. Виявилось, що якби вдалося перетворити хімічну енергію вугілля і повітря на електричну електрохімічним шляхом (в ідеальних паливних осередках), то максимальний теоретичний ККД такого процесу склав би 99,75 % (ледь не 100 %!). Щоправда, жива природа розв'язала енергетичну проблему по-своєму: вона поклалась на процеси холодного горіння водню (джерелом якого є жири, вуглеводи, білки) у кисні (який надходить з повітрям через трахеї й легені, всмоктується в кров, з'єднується з гемоглобіном і розноситься повсюдно в організмі). Тож було б цілком природним погодитись саме з природою і окиснювати водень тільки у процесі холодного горіння. Примітно, що недосконале для теплового двигуна пальне «водень» в екологічному сенсі бездоганно підходить для холодного горіння в паливному осередку (паливному елементі), якому, до того ж, властивий надзвичайно високий ККД. Але насправді водень є проблемним у транспортуванні, зберіганні, доведенні до кондицій, потрібних на машинах великого радіусу дії. Долання такої проблемності потребує затрат, зокрема й енергетичних.

Зараз навіть нема жодних науково переконливих аргументів сподіватись на конкурентне просування технології водневого паливного осередку в майбутньому. Обнадійливішими можна вважати домагання подолати технічні труднощі і розробити паливний осередок радше на іншому різновиді палива (хоча б на бензині). Для позитивних прогнозів явно не вистачає підстав. В одній своїй промові 1894 року засновник і перший президент Німецького електрохімічного товариства В. Оствальд категорично протиставив паровій машині паливний осередок як надзвичайно досконале джерело енергії майбутнього. Тоді це був час вугілля й пари. А тепер – час нафти, але паливний осередок – знову джерело енергії майбутнього. Так триватиме, скоріш за все, і далі.

Особливого ставлення потребує технологія гібридного автомобіля, яка робить ставку на раціональніше, ніж зазвичай, використання потенцій двигуна швидкого внутрішнього згорання. Можна твердити, що гібрид – це конструктивний компроміс між чисто автомобілем і чисто електромобілем. Але загалом – це не альтернатива, а лише ще одна з можливостей. Коли двигуни гібридів ніби переносяться в окремий осередок генерування електричної енергії і там ніби гуртуються в (звичайну теплову чи атомну) електростанцію, то самі гібриди вимушені трансформуватись в електромобілі. Проблема ж пального насправді нікуди не зникає, але для об'єктивного судження з цього приводу потрібна дещо ширша понятійна й термінологічна база.

Висновки

1. Замінити звичні нафту, газ, вугілля, атомну енергію без великих збитків поки що нічим. Звісно, привабливим виглядає використання суто електричної енергії як для приводу автономних робочих машин, так і для побутових потреб. Але «прихильники електрифікації» не завжди пам'ятають якою ціною дістається електроенергія і якими втратами супроводжується її пересилання від місця продукування до місця споживання. Навіть гідроелектростанції не можуть працювати без наслідків для екології. А що вже казати про звичайні теплові чи атомні теплові? А чому б в такому разі взагалі не відмовитися від побутових газогонів, а перетворювати природний газ на електроенергію і вже власне її пересилати споживачам? При цьому не виникатимуть загрози від неправильної чи недбалой експлуатації побутового приладдя (зокрема, як це не дивно в наш час, зникнуть випадки «чадних» отруень), послабляться можливості політичних маніпуляцій з боку країн-монополістів у постачанні газу (навіть, якщо ці монополісти спеціалізуватимуться далі на продукуванні електричної енергії з наявного у них газу).

2. Отто-двигун виявився переможцем у технічному протистоянні з дизель-двигуном. Але при цьому він перебрав на себе частково чи у повній мірі деякі риси, притаманні раніше суто дизельній альтернативі. По-перше, система карбюрації практично цілком поступилася системі впорскування пального (з проявом більше внутрішнього сумішоутворення). По-друге, істотно підвищився ступінь стискування (стиск) робочої суміші. І по-третє, тенденція до гомогенізації пальної суміші розкриває можливості застосування об'ємного самозапалювання.

3. Технологія об'ємного запалювання гомогенізованої робочої суміші від стиснення полягає в організації керованого багатоосередкового (в ідеалі – цілком розосередженого) самозаймання й одночасного горіння заряду в усьому просторі комори згорання, а не у фронті полум'я гомогенного чи гетерогенного середовища. Ця технологія може покладатись власне на легкі палива, найпривабливішим представником яких є бензин чи конкурентне газове пальне.

4. Вуглеводневі палива – це, часом, вигідні, а, часом, вимушені компроміси між воднем і вуглецем. І на це доводиться зважати як на непереборну реальність. Будь-яке відхилення у бік “водневості” чи у бік “вуглецевості” спричиняється до втрати ефективності двигуном внутрішнього згоряння. Та й екологічні клопоти при цьому також загострюються.

5. Можна (не без сумнівів в окремих аспектах) визнати правомірною відмову користати з послуг дизельного двигуна, тобто відмову від споживання важкого (і ширшого фракційного складу) дизельного пального та від використання технології повільного внутрішнього згоряння. Але неможливо революційно відмовитись від традиційного бензину чи конкурентного газу (легкого пального з вужчим фракційним складом) на користь хоч якого відомого зараз альтернативного пального. Тільки еволюційний розвиток ситуації допоможе визначитись з перспективами: традиційне пальне доцільно використовувати доти, поки на тлі його нестачі не виявить себе справжня альтернатива. Але водночас слід працювати над перспективною технологією продукування синтетичного палива, орієнтуючись на якість бензину – енергетичну, кінетичну, експлуатаційну. Тож поки що доведеться визнати: бензинові (і конкурентним газам) нема альтернативи і досі невідомі технології, які б дозволили синтезувати повноцінну альтернативу.

References

1. Гашук П. М. Енергія та упорядкований рух / Петро Миколайович Гашук. – Львів: Українські технології, 2004. – 608 с.
2. Barrere M. Les futurs combustibles pour l'aviation / M. Barrere // *Aeronaut et astronaut.* – 1977. – №5 (66). – P. 21–30.
3. HCCI in a CRF Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling / D. Flowers, S. Aceves, R. Smith et al. // *SAE Technical Paper Series.* – 2000. – № 2000-01-0328. – P. 1–13.
4. Effect of EGR on HCCI Combustion Fuelled with Dimethyl Ether (DME) and Methanol Dual-Fuels / M. Yao, Z. Chen, Z. Zheng et al. // *SAE Technical Paper Series.* – 2005. – № 2005-01-3730. – P. 1–8.
5. Experimental Study on HCCI Dimethyl Ether (DME). Methanol Dual-Fuel / Z. Zheng, M. Yao, Z. Chen et al. // *SAE Technical Paper Series.* – 2004. – № 2004-01-2993. – P. 1–9.
6. Kong C. A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics / C. Kong. // *Fuel.* – 2007. – № 86. – P. 1483–1489.
7. Experimental study of CI natural-gas/DME homogeneous charge engine / Z. Chen, M. Konno, M. Oguma, T. Yanai. // *SAE Technical Paper Series.* – 2000. – № 2000-01-0329. – P. 1–10.
8. Ebrahimi R. Thermodynamic modeling of performance of a Miller cycle with engine speed and variable specific heat ratio of working fluid. *Computers and Mathematics with Applications*, – 2011. – № 62, P. 2169–2176. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.07.002>
9. Gonca G., Hocaoglu M. F. Performance Analysis and Simulation of a Diesel-Miller Cycle (DiMC) Engine // *Arabian Journal for Science and Engineering.* – 2019. – № 44– P. 5811–5824. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03747-4>
10. Gonca G., Sahin B., Ust Y. Investigation of heat transfer influences on performance of air-standard irreversible dual-Miller cycle // *J. Thermophys. Heat Trans.* – 2015. – № 29 (4). – P. 678–683. <https://doi.org/10.2514/1.T4512>

Perspectives of Application of Rapid Internal Combustion Engine in Drive of Mobile Technique. Part I: The Efficiency of Energy Sources for a Heat-Engine

P. Hashchuk, S. Nikipchuk

Abstract. *The internal combustion engine is a highly intellectual product of civilization. Having reached the highest level of its perfection it, however, caused considerable ecological problems. Thus, its alternative has been the subject of active researches. The aim of this article is to define the objectivity and plausibility of these claims concerning the internal combustion engines and the perspectives of its employment in the gear of mobile machinery. The attention is focused both on the characteristics of the engine itself and on the characteristics of exploited energy sources.*

Ecological problems are usually related to the existence of carbon in the traditional fuel. But simultaneous operating of the notions of mass and capacity or higher and lower heat of fuel combustion as well as the notions of heat producing capacity of the fuel proved that there is no unconditional alternative to the common petrol.

It is strongly believed that the substantial effectiveness can be expected from advancing the technology of volumetric ignition by compression of ideal homogenized working mixture, the technology known as Homogeneous Charge Compression Ignition. This technology enables the extreme increase in effectiveness of the internal combustion process distinctive of the Otto-engine. Thus, the objectives of Otto-engine improvement are considered to be absolutely achievable, which opens vast perspectives of its exploitation in the gear of machinery with the high level of autonomy.

Keywords: *rapid internal combustion engine, fuel, fuel mixture, heat creating capacity, mobile machinery, energy effectiveness, environmental friendliness*

Перспективы применения двигателя быстрого внутреннего сгорания в приводе мобильной техники. Часть 1: Эффективность энергоносителей для теплового двигателя

П. М. Гашук, С. В. Никипчук

Аннотация. Двигатель внутреннего сгорания – высокоинтеллектуальный продукт цивилизации. Достигнув чрезвычайно высокого уровня совершенства, он, однако, создал существенные экологические проблемы. Поэтому все чаще и настойчивее ему ищут альтернативу. Цель статьи – выяснить, насколько претензии к двигателю внутреннего сгорания являются объективными, и какими могут быть перспективы его применения в приводе мобильной техники. Учитываются как свойства собственно двигателя, так и свойства используемых им энергоносителей.

Экологические проблемы связывают во многом с наличием в традиционном топливе карбона. Но оперирование одновременно понятиями массовой и объемной, высшей и низшей теплоты сгорания топлива, а также понятием теплотворной способности горючей смеси показало, что практически не существует безоговорочных альтернатив привычному бензину, например.

Есть основания ожидать значительной пользы от продвижения технологии объемного зажигания гомогенизированной рабочей смеси сжатием – технологии, известной как *Homogeneous Charge Compression Ignition*. Эта технология позволяет предельно повысить эффективность именно процесса быстрого внутреннего сгорания, присущего именно Отто-двигателю. Поэтому вполне реальны возможности существенного усовершенствования именно двигателя Отто и широкие перспективы после его применения для привода мобильных машин с большой степенью автономности.

Ключевые слова: двигатель быстрого внутреннего сгорания, топливо, топливная смесь, теплотворная способность, мобильная техника, энергетическая эффективность, экологичность.

References

1. Hashchuk, P. M. (2004), *Energhija ta uporjadkovanyj rukh* [Energy and orderly movement], Ukrajinsjki tekhnologhiji, Lviv, Ukraine. doi: <http://hdl.handle.net/123456789/3790>
2. Barrere, M., (1977), “Les futurs combustibles pour l'aviation”, *Aeronaut et astronaut*, no.66, vol. 5, pp. 21–30.
3. Flowers, D., Aceves, S., Smith, R., Torres, J., Girard, J., and Dibble, R., (2000), “HCCI in a CRF Engine: Experiments and Detailed Kinetic Modeling”, *SAE Technical Paper Series*, №2000-01-0328, pp. 1–13. doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0328>
4. Yao, M., Chen, Z., Zheng, Z., Zhang, B., and Xing, Y., (2005), “Effect of EGR on HCCI Combustion Fuelled with Dimethyl Ether (DME) and Methanol Dual-Fuels”, *SAE Technical Paper Series*, №2005-01-3730, pp. 1–8. doi: <https://doi.org/10.4271/2005-01-3730>
5. Zheng, Z., Yao, M., Chen, Z., and Zhang, B., (2004), “Experimental Study on HCCI Combustion of Dimethyl Ether (DME). Methanol Dual-Fuel”, *SAE Technical Paper Series*, №2004-01-2993, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.4271/2004-01-2993>
6. Kong, S. C., (2007), “A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics”, *Fuel*, vol. 86, no. 10, pp. 1483–1489. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.015>
7. Chen, Z., Konno, M., Oguma, M., and Yanai, T., (2000), “Experimental study of CI natural-gas/DME homogeneous charge engine”, *SAE Technical Paper Series*, №2000-01-0329, pp. 1–10. doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0329>
8. Ebrahimi, R. (2011), “Thermodynamic modeling of performance of a Miller cycle with engine speed and variable specific heat ratio of working fluid”, *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 62, pp. 2169–2176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.07.002>
9. Gonca, G. and Hocaoglu, M.F. (2019), “Performance Analysis and Simulation of a Diesel-Miller Cycle (DiMC) Engine”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, pp. 5811–5824. doi: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03747-4>
10. Gonca, G., Sahin, B. and Ust, Y. (2015), “Investigation of heat transfer influences on performance of air-standard irreversible dual-Miller cycle”, *J. Thermophys. Heat Trans*, vol. 29, no. 4, pp. 678–683. doi: <https://doi.org/10.2514/1.T4512>