

**Список литературы:** 1. *Касимов А.М.* Управление промышленными отходами. В 2-х томах, т.2. Технологии обезвреживания и утилизации промышленных отходов. Учебное пособие [Текст] / А.М. Касимов .-Х.: РИП «Оригинал»,2000. – 308 с. 2. *Касимов А.М., Александров А.Н.* Скоростное и глубокое выделение ванадия с использованием высокотемпературных газожидкостных струй [Текст] / А.М. Касимов, А.Н. Александров // Редкие металлы – взгляд в будущее. Научное издание. Сб. научных тр. ИГН НАНУ, -К.: 2001. – с. 57 – 58. 3. *Чепелевецкий М.Л.* Скрытые периоды кристаллизации и уравнение образования зародышей кристаллов [Текст] / М.Л. Чепелевецкий //ЖФХ, 1939 т.13 вып. 5 С.561. 4. *Фольмер М., Горбунов К. М.* Кинетика образования новой фазы [Текст] / М Фольмер., К. М. Горбунов – М Наука, 1986. – 204с. 5. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я.И. Френкель – М.: АН СССР. 1975. -592 с. 6. *Малин Дж.У.* Кристаллизация. [Текст] Пер. с англ. под ред. Вигдоровича В.Н. – М.: Металлургия. 1965. -342 с. 7. *Хавский Е.В.* Кристаллические вещества и продукты. Методы оценки и совершенствования свойств [Текст] / Е.В. Хавский – М.: Химия. 1986. – 223 с. 8. *Дьюлаи З.* Образование зародышей кристаллов в водных растворах. Рост кристаллов. Т.3. [Текст] / З. Дьюлаи– М.: АН СССР. 1981. – С.98-104. 9. *Франк-Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплоотдача в химической кинетике. [Текст] / Д.А. Франк-Каменецкий – М.: Наука. 1967. – 338 с. 10. *Тимофеева В. А.* Рост кристаллов из растворов-расплавов [Текст] / В. А. Тимофеева – М.: Наука. 1978. – 267 с. 11. *Кафаров В.В.* Системный анализ процессов химической технологии. Процессы массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы. [Текст] // Дорохов И.Н., Кольцова Э.М.; под общ. ред. В.В. Кафарова – М.: Наука. 1983. - 367 с. 12. *Виля. В.* Теория вихрей. [Текст] / В. Виля. –М.-Л.: ОНТИ.1935. – 182 с. 13. *Касимов А.М.* Технология утилизации ванадийсодержащих отходов ЗТМК [Текст] //Тез. докл. конференции с международным участием «Сотрудничество для решения проблемы отходов» – Х.: ИнжЭК. 2005 . – С. 195-199. 14. *Касимов А.М.* Кристаллизация соединений ванадия в дисперсной струе Экспресс-информация. [Текст] / А.М. Касимов - М.: Черметинформация, 1986. – 12 с. 15. *Касимов А.М.* Малоотходные и энергосберегающие технологии в производстве редких и тяжелых цветных металлов [Текст] / А.М. Касимов -М.: Металлургия. 1990. – 112 с.

*Поступила в редколлегию 27.07.2011*

**УДК 662.769.2 : 621.43**

***Н.В. ВНУКОВА***, канд.геогр.наук, , доц., заст. зав. каф., ХНАДУ, Харків  
***О.М. КОВАЛЬОВА***, канд.техн.наук, доц., ХНАДУ, Харків  
***Г.М. ЖЕЛНОВАЧ***, асп., ХНАДУ, Харків

## **ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ЯК ПАЛИВА ДЛЯ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ І ЕФЕКТИВНІСТЬ ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ**

Надана характеристика водню як палива для двигунів внутрішнього згорання та порівняльна характеристика горіння водню і бензину в суміші з повітрям. Розроблені науково-технічні рішення конвертування двигуна автотранспортних засобів на живлення воднем при зовнішньому сумішоутворенні.

Ключові слова: водень, палива, двигуни внутрішнього згорання, ефективність.

Дана характеристика водорода как топлива для двигателей внутреннего сгорания и сравнительная характеристика сгорания водорода и бензина в смеси с воздухом. Разработаны научно-технические решения конвертирования двигателя автотранспортного средства на использование водорода при внешнем смесеобразовании.

Ключевые слова: водород, топлива, двигатели внутреннего сгорания, эффективность.

It's presented characteristics of hydrogen as a fuel for combustion engines and comparative characteristics of hydrogen and gasoline burning in a mixture with air. Scientific and technical solutions of motor vehicle engine converting for usage hydrogen in an external mixing were developed.

Keywords: hydrogen, fuels, combustion engines, efficiency.

## **Вступ**

Викиди в атмосферне повітря від сотні мільйонів автомобілів у світі стали серйозною загрозою для здоров'я та життя людей. Неможливість вирішити екологічні проблеми, пов'язана з експлуатацією автомобільних двигунів, механічними способами змушує шукати інший шлях – хімічний, тобто пошук заміників традиційних палив нафтового походження або добавок і присадок до них, хоча при використанні традиційних палив коефіцієнт корисної дії від їх спалення не перевищує 15-17 %. Слід зазначити, що першим поштовхом до такого пошуку в західних країнах світу стали не екологічні, а економічні проблеми – обмеження в постачаннях нафти і різкий стрибок ціни на неї в середині минулого десятиліття змусили деякі країни проводити пошуки альтернативних палив.

## **Постановка завдання**

На фоні зростання попиту на енергію, паливо та загострення проблеми охорони навколишнього природного середовища світова спільнота змушена звернути увагу на пошук нових енергетичних та паливних технологій, які б не уповільнювали б економічного зростання і в той же час забезпечували прийнятний рівень забруднення навколишнього природного середовища. Одним з способів вирішення цього питання і є можливість застосування водню як палива для двигунів внутрішнього згорання.

## **Аналіз останніх досліджень**

Останніми роками багато уваги приділяється розробці і використанню в автомобільному транспорті водню як палива для двигунів. На думку багатьох фахівців в розв'язанні зазначеної проблеми провідне місце займе воднева енергетика, а саме виробництво водню та його використання на основі в промисловості, енергетиці, будівництві та насамперед на транспорті [1-3].

## **Формування цілей та викладення основного матеріалу**

Якийсь симбіоз механічного і хімічного впливу на токсичність ВГ являють собою нині активно використовувані на Заході системи каталітичної нейтралізації ВГ автомобільних двигунів. Ці системи дозволяють практично цілком позбутися від CO, значно (на 70 %) скоротити викиди  $C_nH_m$  і на 20 % викиди  $NO_x$ . Але їхня установка призводить до збільшення витрати палива на 3-5 %.

Крім того, каталізатори в системах нейтралізації виготовляються на основі платини і паладію, що призводить до великої їхньої витрати на ці цілі. Наприклад, у США тільки платини для виробництва каталітичних нейтралізаторів ВГ щорічно витрачається близько 40 т [4].

Через величезну кількість експлуатованих автомобілів, неможливості корінної зміни конструкцій двигуна й автомобіля, розвинутої інфраструктури автомобільного транспорту (систем збереження, автозаправних станцій)

замінники традиційних палив повинні мати фізико-хімічні властивості, що не потребують корінної зміни конструкції двигуна паливної апаратури і системи збереження палива на борті. У зв'язку з цим і з метою економії дефіцитних і дорогих видів палива і для зниження викиду токсичних речовин одним з ефективних способів є застосування палива з добавками.

Водень – одна з таких перспективних добавок. Перевагою водню перед іншими можливими добавками є те, що він робить двояку дію: не тільки знижує викиди практично всіх токсичних компонентів ВГ, але і підвищує паливну економічність.

Вплив, що робить вміст водню в паливі, у тому числі і водню, що вводиться додатково в зону горіння, на утворення КУ і ТЧ, зв'язано з реакціями окислювання радикалами ОН попередників їхнього утворення.

Тому збільшення в бензині вуглеводнів з підвищеним вмістом водню забезпечує м'який режим горіння, повноту вигорання палива, відсутність закоксування і руйнування полімерних ущільнювачів, запобігання утворення конденсованої канцерогенної ароматики в камері згорання і викиду її з ВГ двигунів в атмосферу. Тому поява на ринку бензинів марки Premium з їхнім високим вмістом ізо-парафінових вуглеводнів і обмеженим вмістом ароматики (до 30 %) навіть без добавок оксигенатів складає серйозну конкуренцію традиційним вітчизняним бензинам.

Слід особливо зазначити, що в звичайному неетилованому бензині міститься до 10 видів ПАУ, а в дизельних паливах – до 20 ПАУ. У США (Каліфорнія) введені обмеження на якість дизельних палив, у тому числі встановлена норма на вміст не більш 10 % ароматики. Сучасні стандарти «Євро» у числі інших обмежують вміст бензолу й ароматичних вуглеводнів у ВГ автомобільних ДВЗ [5].

Значно важливим на найближче майбутнє є також те, що в синтетичних бензинах, одержуваних з вугіль, міститься велика кількість ПАУ, що структурно відрізняються від ПАУ, які зустрічаються в нафтових бензинах. Їхня присутність здатна викликати такі проблеми як: підвищена канцерогенність ВГ двигунів, утворення відкладень ТЧ у камері згорання і випускному тракті, підвищення вимог до октанового числа з часом.

Елементний склад нафтових палив: С, Н, S, О, N і волога (W). Пальними елементами палив є: С, Н, S. Основним пальним елементом у традиційних нафтових паливах є вуглець з теплотою згорання 34,1МДж/кг. Саме вміст вуглецю в паливі визначає питомі рівні викидів парникового газу – діоксида вуглецю (CO<sub>2</sub>). Найбільшу теплоту згорання на одиницю маси має водень (120,5МДж/кг), але його в складі нафтових палив небагато. У світлих нафтопродуктах – 13-15 %, у метані – 25 %. Підвищений вміст водню в паливі або пальній суміші (наприклад, з використанням добавок водню) сприяє істотному зниженню рівнів утворення ТЧ і канцерогенних інгредієнтів при спалюванні палив. Сірка є шкідливою домішкою, тому що вона при згоранні виділяє мало теплоти (9,3МДж/кг), а при експлуатації двигунів продукти згорання сірки викликають великі труднощі: діоксид сірки, що утворюється, є екологічно гранично шкідливим сполученням і негативно впливає на надійність і

ресурс двигуна. Крім того, сірка сприяє збільшенню рівнів утворення і дисперсності ТЧ, а також – канцерогенних речовин. Тому зниження вмісту сірки в моторних паливах, у першу чергу дизельних, представляється одним з важливих напрямків у зниженні екологічної небезпеки МЕНУ і підвищення їхньої параметричної надійності і ресурсу. У Європі обмежений вміст сірки в дизельних паливах на рівні 0,02 %.

Основні теплотехнічні показники ряду моторних палив, у тому числі альтернативних, приведені в табл. 1.

Таблиця 1. Фізико-хімічні властивості вуглеводних моторних палив і водню

Моторні палива	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$H_T$ , МДж/кг	$L_0$	$T_{max}$ , К	$\alpha_{гран}$	ОЧД	Состав, %				
							С	Н	S	N	О
Бензин А-92	710-760	44,0	15	2350	0,7-1,1	93	85	15	–	–	–
Дизельне	820-870	42,4	14,2	2370	0,9-5	–	86	13	1	0,01	–
Метанол	795	19,7	6,5	2175	0,7-1,4	106	37	13	–	–	50
Пропан-бутан	542	45,7	15,2	2149	0,7-1,2	102-110	84	16	–	–	–
Метан	0,8 (416)	49,8	17	2065	0,8-1,5	120	75	25	–	–	–
Водень	0,09 (71)	120,2	34,5	2470	0,2-5	130	–	100	–	–	–

Примітки:

1).  $\rho$  – щільність;  $H_T$  – енергоємність;  $T_{max}$  – максимальна температура при горінні палива в повітрі;  $\alpha_{гран}$  – границі сталої роботи за коефіцієнтом надлишку повітря; ОЧД – октанове число, обумовлене дослідницьким методом; 2). У дужках дані щільності метану і водню в рідкій фазі.

Вибір водню як палива для двигунів внутрішнього згорання, що є основними джерелами забруднення навколишнього середовища міст і промислових центрів, був зроблений на основі аналізу і порівняння його фізичних і хімічних властивостей з такими ж показниками інших найбільш важливих видів палива. При цьому були враховані такі фактори, як доступність його запасів, вартість сировини для його одержання, безпека виробництва, економічність транспортування до місць споживання, мінімальні переробки в конструкціях устаткування, мінімальні забруднення навколишнього середовища при виробництві і споживанні. Крім того, при рішенні цього питання приймалися до уваги стабільність при збереженні по відношенню до кисню і вологості повітря, токсичність самого палива і продуктів його згорання, інертність по відношенню до конструкційних матеріалів і, нарешті, можливість спалювання палива з досить високим ступенем використання отриманого тепла. За цими показниками водень виявився конкурентоздатним з кожним із вуглеводних палив, перевершуючи їх за екологічною сумісністю з навколишнім середовищем (табл. 2).

Таблиця 2. Характеристика горіння водню і бензину в суміші з повітрям

Показник	Водень	Бензин	Показник	Водень	Бензин
Енергія запалювання, мДж	0,02	0,25	Швидкість поширення полум'я, см/с	270	30
Відстань гасіння, см	0,06	>0,25	Теплота згорання:		
Температура запалювання, К	903	724	Нижня, кДж/кг	$120 \cdot 10^3$	$44 \cdot 10^3$
Границі запалювання по об'ємному вмісту, %	4,7-74,2	0,59-6,00	Суміші при стехіометричній витраті повітря, кДж/м <sup>3</sup>	3180	3710
Коефіцієнт дифузії, см <sup>2</sup> /с	0,63	0,08	Стехіометрична витрата повітря, кг/кг	34,20	14,95

Дані експлуатації свідчать про те, що застосування водню як палива в ДВЗ забезпечує безумовну перевагу по основних техніко-економічних показниках. Більш того, навіть невелика його добавка до традиційного палива (5–10 %) дозволяє в міських умовах експлуатації автомобіля скоротити витрату бензину на 20–30 % і приблизно вдвічі зменшити емісію вуглеводнів. Крім того, це приводить до зменшення викидів CO у 10 разів, а NO<sub>x</sub> – у 5 разів.

Перспективність застосування водню для автомобільних двигунів визначається насамперед екологічною чистотою та унікальними моторними властивостями, що відкриває можливість його широкого застосування в сучасних двигунах без корінної перебудови. Однак деякі фізичні властивості водню, що визначають його моторні якості, висувують ряд серйозних науково-технічних проблем, що вимагають рішення при переводі ДВЗ на живлення воднем. У процесі досліджень встановлено, що однією з основних проблем є виникнення у водневому двигуні зворотного спалаху і калильного запалювання. Усунення цього явлення зажадало розробки способів, що забезпечують повне придушення зворотного спалаху в конвертованому двигуні. Крім того, низька щільність водню, використовуваного як паливо, приводить до необхідності оптимізації робочого циклу водневого ДВЗ за ступенем стиску і коефіцієнту надлишку повітря.

### Висновки

При проведенні досліджень робочих процесів у ДВЗ була встановлена фізична природа виникнення зворотного спалаху, що базується на кінетичному механізмі самозапалювання водньоповітряної суміші в результаті розігріву її залишковими газами. Встановлено, що ефективним способом придушення зворотного спалаху є подача водню із запізнюванням за кутом повороту колінчатого вала відносно відкриття впускного клапана.

На підставі отриманої інформації був розроблений і реалізований спосіб роботи ДВЗ, при якому водень під тиском, що регулюється у залежності від режиму роботи двигуна, подається за допомогою спеціального пристрою в

коллектор у зону впускного клапана. У цьому випадку забезпечується утворення в місці розташування впускного клапана зони, у якій вміст водню перевищує верхню межу (більш 74 % за об'ємом) запалення водньоповітряної суміші. Запропоноване рішення практично не погіршує техніко-економічні показники водневого двигуна в порівнянні з прототипом, а його конструктивне втілення відрізняється простотою технічного виконання і надійністю експлуатації.

Отримані на моторному стенді навантажувальні і швидкісні характеристики водневих двигунів з якісним регулюванням потужності і результати дорожніх іспитів автомобілів послужили вихідними даними для створення системи автоматичного регулювання витрати водню і кута випередження запалювання, що забезпечує його найбільш ефективну і надійну роботу (табл. 3).

Проведені іспити показали, що двигуни ВА3-2101, УМЗ-451 МП і ЗМЗ-402 їхні модифікації, що оснащені спеціальною конструкцією впускного колектора, працюють на водні стійко у всьому діапазоні зміни частоти обертання колінчатого вала і коефіцієнта надлишку повітря, характерних для режимів експлуатації автомобіля як в умовах міської їзди, так і на трасі.

Таблиця 3. Дані іспитів на токсичність і паливну економічність

Живлення	Концентрація СО, %		Викид шкідливих речовин, г/км			Витрати палива, л на 100 км
	$N_{xx, \min}$	$0,6 n_{\text{ном}}$	СО	СН	NO <sub>x</sub>	
Бензин + водень	0,04	0,01	5	4,6	2,0	6,8 л бензину +1,56H <sub>2</sub>
Бензин (карбюратор К-126Г)	1,5	2,3	44	9,9	14,0	15,9

Розроблені науково-технічні рішення конвертування двигуна автотранспортних засобів на живлення воднем при зовнішнім сумішоутворенні реалізовані також у двигуні УМЗ-451МП ( $\epsilon=6,7$ ), встановленому на автонавантажувачі моделі 4092.

Як систему збереження водню на борті автонавантажувача використаний гідридний акумулятор масою 498 кг і місткістю 2,7 кг водню, що встановлений на місце верхньої частини противаги. При цьому загальна маса автонавантажувача і розподіл навантаження по осях не змінилися. Іспиту експериментального зразка водневого автонавантажувача показали гарну працездатність конвертованої машини і її екологічні переваги в порівнянні з бензиновим прототипом.

У процесі промислових іспитів автонавантажувача в закритих складських приміщеннях і трюмах морських судів в Одеському порту встановлено, що використання водню як палива знижує кількість оксидів азоту в 1,5 рази, а наявність оксиду вуглецю, незгорілих вуглеводнів і інших токсичних речовин зводить до нуля. Створений зразок водневого автонавантажувача експонувався на виставці VII Міжнародної конференції по водневій енергетиці й одержав високу оцінку вітчизняних і іноземних фахівців.

Досвід, накопичений при конвертації двох варіантів автотранспорту, дозволили створити експериментальний зразок водневого транспортного засобу на базі вантажно-пасажирського автомобіля «Газель» моделі ГАЗ-2705 із двигуном ЗМЗ-4026.

Дорожні іспити створеного експериментального зразка водневого автомобіля, що проведені в умовах міської експлуатації, підтвердили ефективність прийнятої концепції використання водню як палива.

При іспитах по замкнутому кільцевому маршруту довжиною 41,6 км була визначена контрольна витрата водню, що склала 0,0384 кг/км, яка забезпечує пробіг автомобіля без дозаправлення близько 140 км. При цьому емісія єдиного токсичного компонента (оксидів азоту) приблизно вдвічі нижче, ніж у бензинового прототипу (табл. 4, 5).

Таблиця 4. Показники токсичності ВГ бензинового ДВЗ (г/кг спаленого палива)

Живлення	Запуск із холодного стану		
	CO	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	NO <sub>x</sub>
Бензин	52	21	37
Бензин+водень	15	13	6
Зменшення у викиді	37	8	31
Те ж у перерахунку на 1 т H <sub>2</sub> , т	0,37	0,08	0,31

Таблиця 5. Показники токсичності викидів дизельного двигуна (г/кг спаленого палива)

Компонент ВГ	Потужність 100 %		Потужність 80 %	
	Чисте паливо (Н/С=2,125)	Добавка H <sub>2</sub> 3,3 % (Н/О~2,7)	Чисте паливо (Н/С=2,125)	Добавка H <sub>2</sub> 5% (Н/С~3)
Сажа	5,9	3,6	2,7	1,1
C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	3,7	4,5	3,1	4,2
NO <sub>x</sub>	15,9	19,4	13	16,6

**Список літератури:** 1. *Месяц Г.А.* На пути к водороду : [круглый стол по проблемам водородной энергетики] [Текст] / Г. А. Месяц, Б. Н. Кузык // Экономические стратегии. - 2005. - N 4. - С. 6-13. 2. Водородная энергетика и топливные элементы. Взгляд в будущее [Текст] / Европейская комиссия, - 2003. 3. *Г.С.Асланин.* Проблематичность водорода в плане замещения нефти [Текст] / Энергетическая политика. – Вып.2. – 2006. – С. 42-51. 4. *Казаков Н., Масленникова И.* Экологическая безопасность транспорта [Текст] / Н. Казаков, И. Масленникова. СПб. – «Автобизнесмаркет». – 2004. – №14.- С.5-9. 6. Директива 98/69/ЕС Европейского парламента и совета от 13 октября 1998 г. о мерах против загрязнения воздуха выбросами автомобилей и во изменение Директивы 70/220/ОЕЭС Совета. Официальный бюллетень Европейского сообщества L 350. – 73 с.

Поступила в редколлегию 27.05.2011