

HYDROGEN AS AN ALTERNATIVE TO GASOLINE⁸

Assoc. Prof. Atanas Iliev, PhD

Department of ICE and AT, "Angel Kanchev" University of Ruse

Phone: 082-888-272

E-mail: ailiev@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Kiril Hadjiev, PhD

Department of ICE and AT, "Angel Kanchev" University of Ruse

Phone: 082-888 433

E-mail: khadjiev@uni-ruse.bg

Abstract: *Transport vehicles have a significant role in the use of natural energy sources. They use about a third of the total amount of oil. Hydrocarbon fuels cause major air pollution. Road transport accounts for 39 to 63% of environmental pollution.*

Recently, a large number of prototypes of electric vehicles have been created. The energy of electric vehicles is obtained from fuel cells that convert electricity directly from the fuel without intermediate stages. Hydrogen is used as the main source of energy. The main problem with its use is its storage in the car. Of practical interest is the use of fuel cells with acid electrolyte, which use a mixture of gases as a working medium: hydrogen, methane, carbon monoxide and others.

Keywords: *Hydrogen, Internal Combustion Engines, Fuel Cells, Applications, System, Exhaust Gases.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Транспортните средства имат съществена роля в използването на естествените енергийни източници. Те консумират около една трета от цялото производство на нефт. Използването на въглеводородните горива в автомобилите е придружено от изпускането на огромно количество вредни вещества в атмосферата. В резултат на това автомобилният транспорт генерира 39÷63% от замърсяването на околната среда (Boer, P. C., et al, 1976) (Илиев, С., 2020).

Традиционният подход за решаване на енергийните и екологични проблеми на транспорта е да се подобри конструкцията на двигателите с вътрешно горене и да се създадат по-модерни силови агрегати от нов тип, използващи повече или по-малко въглеводородни горива. Основно внимание се обръща на повишаване на ефективността и намаляване на токсичността на двигателите чрез сложно управление на работния процес, за да се осигури максимална пълнота на изгаряне на горивото на всички работни режими. Новите транспортни двигатели, разработени до момента, включват електрически задвижващи системи и топлинни двигатели с вътрешно и външно горене с нетрадиционни работни процеси - бутални двигатели с разслоено разпределение на заряда, газови турбини и двигатели на Стирлинг. Двигателите на Стирлинг могат да осигурят ниски стойности на токсичните вещества, използвайки обикновени горива, отговарящи на строгите разпоредби (Karim, G. A., Klat, S. R. 1966).

Голям интерес представляват електрическите задвижвания, използващи електрохимични енергийни източници - акумулаторни батерии и горивни клетки.

Съществуват голям брой прототипи на електрически превозни средства, които използват горивни клетки, получаващи електрическа енергия директно от горивото. Основният проблем при използването на този тип горивни клетки е съхраняването на водорода в автомобила. Обемно-масовите параметри на най-приемливия вариант на съхранение на водорода под формата на хидриди все още са незадоволителни.

⁸ Докладът е представен на пленарната сесия на 22 октомври 2020 с оригинално заглавие на български език: ВОДОРОДЪТ КАТО АЛТЕРНАТИВА НА БЕНЗИНА

ИЗЛОЖЕНИЕ

Нефтът рано или късно ще бъде изчерпен. Дали след 50, 70 или 100 години, но ще свърши. Това се налага да се търсят алтернативи на нефтените горива. Един от най-примамливите заместители е водородът (H_2). Водородната енергия е изключително екологична - резултатът от изгарянето му е само вода (H_2O). Съществуващите технологии (както за производството на самия водород, така и за производството на електричество от него) не са много рентабилни, засега!

Днес в световен мащаб се получават около $500 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ водород годишно. Почти половината се използва за амонячни торове, останалото - за производство на стомана, стъкло etc. Водородът се получава главно чрез парен реформинг на природен газ: метанът при високи температури (900°C) реагира с пара в присъствието на никелов катализатор. Засега такъв водород е най-евтиният (цената му е около три пъти по-ниска от тази на получен чрез електролиза). Чрез плазмохимичен метод за производство на водород от природен газ, цената може да се намали още около 2 пъти. Ако след 10 години светът започне постепенно да преминава към водородни горивни клетки, ще трябва да се произвежда много повече водород. Ако съществуващото производство се увеличи 25 пъти, то до 2050 г. това ще покрие само 20% от енергийните нужди за гориво.

Съществуват и други технологии за производство на водород - електролиза, крекинг или от биомаса. За получаване от биомаса (дърво, слама) е необходимо тя да се нагрее до $500 \div 600^\circ \text{C}$; получават се алкохоли - етанол, метанол, които от своя страна се превръщат във водород. Загриването на биомасата до 1000°C я превръща директно в газ - смес от H_2 и CO . Основният проблем за такъв процес е необходимостта от много суровини. *Ако цялата плодородна земя на Франция се използва за отглеждане на биомаса, полученият водород ще е недостатъчен за задвижване на съществуващи автомобили.*

Най-простият начин за получаване на водород е чрез електролиза на водата. Резултатът е водород и кислород. Ефективността на този процес не е много висока: енергията, отдадена за електролизата е около 2 пъти по-голяма от получената в горивната клетка. Независимо от това, електролизата на водата е доста обещаваща и ще намери приложение. Възможно е да се използва енергията на атомните електроцентрали по време на часове с ниско натоварване; от възобновяеми енергийни източници (слънчеви панели, вятърна енергия, приливи и други). *Електролизата става е по-ефективна при повишено налягане или температура на разтвора!*

Друго направление е използването на някои видове бактерии и водорасли да разграждат водата и отделят водород по време на фотосинтезата. Проблемът е, че това става за кратко време и в неголеми количества.

Заедно с техническите проблеми на производството на водород е необходимо да се решат и други: да се създаде специална инфраструктура, която да осигури неговото съхранение и транспортиране. Това също е много трудна и скъпа задача, тъй като водородът гори и експлодира. Когато водородният автомобил се появи в масово производство, това ще се превърне в ограничаващ етап от неговото внедряване.

Въпреки трудностите, изглежда, че водородните горивни клетки скоро ще навлязат в ежедневието. Приоритетните области на изследване и създаване са горивни клетки с ниска мощност (от 500W до 5kW) за преносими компютри, малки коли, къщи, както и средни мощности (200kW) за обществен транспорт. Засега те далеч не са перфектни и не са евтини: за автомобил - 20 пъти по-скъпи от стандартния двигател, а за отопление на къща - $10 \div 12$ пъти по-скъпи.

Водородът като енергиен носител решава енергийните проблеми в тясна връзка с екологичните. Създават се благоприятни възможности за намаляване на образуването на твърди частици, вредни емисии на газове и премахване на парниковия ефект. Кислородът, който се получава от водата едновременно с водорода, може да се използва за биохимично пречистване на отпадъчни води и като окислител при изгарянето на твърди отпадъци.

При нормални температури водородът е безцветен газ без мирис.

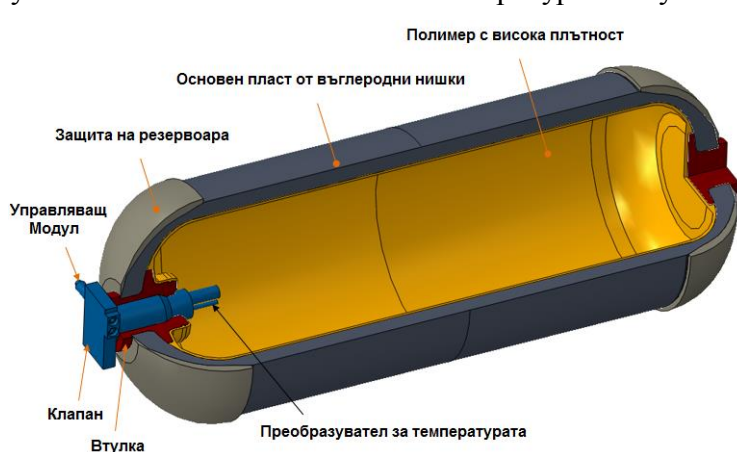
Основните физически свойства на водорода са:

1	Точка на кипене	20,24К (-252,76°С)
2	Точка на топене	13,8К (-259,5°С)
3	Критична температура	32,9К (-239,97°С)
4	Критично налягане	1,27 МПа
5	Плътност при нормални условия	0,08987 kg/m ³
6	Плътност на течния водород	70,97 kg/m ³
7	Плътност на твърдия водород	89,6 kg/m ³
8	Калоричност	120,9 MJ/kg

Течният водород е безцветна течност. Втечнява се при 20К, а при 14К той преминава в твърдо състояние, т.е. в течна фаза е в много тесен температурен диапазон - около 6К. В тази област е възможно образуването на междинна форма на водорода - подобна на утайка форма, която представлява смес от течен с твърд водород под формата на лед, плаващ в течност.

Водородът е силно дифузен. Коефициентът му на дифузия във въздуха е повече от 3 пъти по-висок от този на метана, кислорода и въглеродния окис.

Водородът има способността да прониква през материала на съда, по-специално металите. Това явление, влошаващо свойствата на материала, се нарича хидрогениране. С увеличаване на налягането и температурата се увеличава дифузията на водорода в металите.



Фиг. 1. Композитен резервоар за водород

Дълбочина на абсорбция на водорода, т.е. проникването на молекули на водород в кристалната решетка на метала, в повечето случаи, не надвишава 4÷6 mm, а когато металът е уякчен чрез наклеп, той може да бъде намален до 2÷1,5 mm. За алуминия хидрогенирането достига 15÷30 mm, а при наклеп, намалява до 4÷6 mm. За стоманите дифузията на водорода се елиминирала чрез сплавяне с хром, молибден, волфрам и други елементи. За да се съхрани за дълго

време в резервоара, той се прави от специални композитни материали (фиг. 1). Цената на такъв резервоар достига до няколко хиляди долара.

Водородно-въздушните смеси се имат широк обхват на запалване (4÷75% обемни) и експлозивност (18,3÷74% обемни), което увеличава опасността от пожар и експлозия. В същото време водородът има висока температура на запалване (590°С) и способността да се разсейва бързо във въздуха, поради което по отношение на общите показатели за безопасност той е приблизително еквивалентен на природния газ. При замърсяване с технологични примеси експлозивността на водорода се увеличава. Следователно основното условие за безопасна работа с водород в затворени помещения е контрол върху съдържанието му във въздуха и възможни течове.

Нека разгледаме работата на двигателя на водородно гориво.

1. Характеристики на работния процес.

Физикохимични свойства на водорода са много по-различни от свойствата на използваните в момента горива, което е причина за изменение в организацията и хода на работния процес на ДВГ.

Границите на възпламеняване на водорода с въздуха са от 0,2÷6. В тази връзка мощността на водородния двигател може да бъде променена чрез качествено регулиране, при което ефективността му при частични натоварвания се увеличава с 25-50% (Escher William, J. D., Ecklund, E. E., 1976).

Максималната стойност на ефективния КПД (η_e) на двигателя при работа с водород е по-голяма, отколкото при работа с бензин, но ефективната мощност (N_e) пада значително [4].

Това се дължи на много малката плътност на водорода, водеща до намаляване на количеството на горивото, постъпващо в цилиндъра на двигателя. При стехиометричен състав на сместа, водородът, постъпващ заедно с въздуха, заема почти 30% от обема на цилиндъра, докато изпареният бензин - само 2÷4%. Като резултат, преминаването към водород води до намаляване на мощността на двигателя средно с 20÷25%. Заедно с това използването на водород води до значително увеличаване на емисиите на азотни окиси (NO_x) в отработените газове, причина за което е повишаване на температурата и скоростта на горене (Escher William J. D., 1975).

Температурата на запалване на водородните смеси е по-висока от тази на въгледородните смеси, но поради по-ниските енергии на активиране е необходимо по-малко енергия за запалване на водорода.

Водородно-въздушните смеси имат голяма скорост на изгаряне в двигателя (табл. 2); в стехиометричната област периодите на задържане на възпламеняване са много малки и горенето протича при почти постоянен обем, което води до рязко повишаване на налягането.

Таблица 2. Скорост на разпространение на пламъка и ъгъл пкв за изгаряне

Двигател	Честота на въртене, min^{-1}	Степен на сгъстяване ϵ	Скорост на разпространение на пламъка, m/s	Време на горене, $^{\circ}\text{пкв}$
Водороден	1500	12	48,3	15,7
	1500	14	51,6	14,4
Бензинов	1500	12	16,45	41,0
	1500	14	16,0	42,2

Скоростта на повишаване на налягането в цилиндъра на *водороден* двигател за стехиометрични смеси е почти 3 пъти по-висока от тази на бензинов ДВГ. Когато сместа се обеднява, скоростта намалява и при $\alpha=1,9$ достига стойностите при работа със стехиометрични смеси (Mishchenko A.I., Belogub A.V., etc, 1988).

Високата реактивност на водорода в някои случаи води до връщане на пламъка във всмукателния колектор, преждевременно запалване и взривно изгаряне на горивните смеси. Тези недостатъци могат да бъдат отстранени чрез подходяща модификация на системите за подаване на гориво. Използват се следните методи за подаване на водород към двигателите с вътрешно горене:

- впръскване във всмукателния колектор;
- използване на модифициран карбуратор, прилаган в системи за LPG и метан;
- отделна доза водород в областта на всмукателния клапан на всеки цилиндър;
- директно впръскване под високо налягане в горивната камера;

Когато ДВГ работи с бензино-водородна смес, отделянето на твърди частици намалява около 100 пъти в сравнение с работа на бензин. Благодарение на това, както и отсъствието на органични киселини, образувани по време на изгарянето на въгледородите, се увеличава експлоатационният живот на двигателя и се намаляват разходите за ремонта му.

2. Работа на двигателя с вътрешно горене с чист водород

Според резултатите, получени по време на индицирането на едноцилиндров двигател, работещ на водород, при обедняване на горивната смес, динамиката на нарастване на налягането рязко намалява и при стойности на $\alpha > 3,5$ тя е практически постоянна. Задържането на запалването се увеличава, поради увеличаване на времето за самоускорение на реакциите на горене с намаляване на концентрацията на водорода в горивната смес. В тази връзка при $\alpha > 1,8$ се появяват колебания на максималното налягане в цикъла, които при $\alpha > 4,5$ водят до нестабилна работа на двигателя. Нестабилност също се появява и при обогатяване на гориво-въздушната смес; причина са прекалено високите темпове на повишаване на налягането по време на горенето. Това нестабилно горене обикновено се свързва със звукови „удари“ и моментни колебания в честотата на въртене на двигателя.

Подаването на водород във всмукателния колектор, изгарянето на горивната смес в близост до стехиометричния състав става при много високи скорости и практически без задържане на възпламеняването. Освен това в тази област има тенденция към преждевременно запалване. *Като резултат водородният двигател спира, когато горивната смес се обогати.* Характерно е, че при честоти на въртене $\leq 0,7$ от номиналната, двигателят спира без появата на допълнителни възпламенявания. Причината за спиране на двигателя в този случай е ранното прекратяване на процеса на горене, в резултат на което работата на газа в хода на съгъстяването е по-голяма, отколкото в хода на разширението. От друга страна, при обороти на двигателя, близки до номиналните, горивната смес може да се обогати до $\alpha = 1$. По-нататъшното обогатяване на гориво-въздушната смес при тези условия води до самовъзпламенявания преди ГМТ и спиране на двигателя.

За да се получат задоволителни стойности на мощността на водородния двигател и следователно да се осигури стабилната му работа в областта с $\alpha \leq 1$, е необходимо да се намали температурната натовареност на работния цикъл. Препоръчително е да се увеличи работният обем на цилиндрите на двигателя, което дава възможност за предотвратяване на самозапалването поради намаляване на температурата на стените на цилиндъра. Охлаждането на зоната на изпускателния клапан и използването на „студена“ свещ за намаляване на склонността на водородните двигатели да детонират при работа на стехиометрични смеси дават добри резултати. Най-добрата ефективност на двигателя обаче се постига, когато се използва контролирано подаване (впръскване) на водород директно в горивната камера. В допълнение към пълното елиминиране на самовъзпламеняването на сместа се осигуряват по-приемливи скорости на повишаване на налягането в цикъла, дори в стехиометричния диапазон.

При обедняване на сместа, когато водородът се подава в пълнителния тръбопровод при малко натоварване и режими на празен ход, също се появяват самовъзпламенявания, но те не водят до спиране на двигателя и се проявяват само като колебания на честота му на въртене. Честотата на самовъзпламеняванията в тези режими не зависи от вида на свещта, тъй като основната причина за появата на този тип нестабилност е относително голямото количество кислород в остатъчните газове, с което водородът активно реагира в момента, в който попадне в горивната камера (Escher William, J. D., Ecklund, E. E., 1976).

Максималната стойност на индикаторният КПД (η_i) на водородния двигател е при $\alpha = 2,5 \div 2,7$ и при по-нататъшно обедняване на сместа той намалява. В този случай оптималното време за запалване варира в доста широк диапазон, например с увеличение на α от 1,0 до 3,1, съответно, от $1,5^0 \div 25^0$ пкв при 1500 min^{-1} . Поради високата скорост на горене на водорода, оптималният ъгъл на изпреварване на запалването θ дори за много бедни водородно-въздушни смеси ($\alpha = 3,0 \div 3,5$) не надвишава θ за бензино-въздушни смеси с $\alpha = 1, 1$. Съставът на отработените газове на двигател, работещ с водород, се различава значително от състава на отработените газове на бензинов двигател. Независимо от това, малко количество СО и СН присъства в отработените газове на водородния двигател с вътрешно горене, чието присъствие се дължи на изгарянето на въглеводородни смазочни материали, влизащи в горивната камера. Максималните стойности на NO_x поради по-високите температури на горене на водорода са около два пъти повече от тези, при бензиновите двигатели.

3 Работа на двигателя с вътрешно горене с бензино-водородни смеси.

В този случай, поради увеличаване на реактивността на горивовъздушната смес, е възможна работата на двигателя с преобеднени смеси, главно в областта на частични натоварвания и празен ход. Зависимостта на ефективната граница на обедняване на сместа от количеството добавки на водород е нелинейна (Boer, P. C., et al, 1976) (Piev, S., 2020).

Най-целесъобразно е да се използват горивни смеси с добавяне на водород до 20% по маса, съответстващи на състав на сместа $\alpha = 2,5$. Този състав се определя при условие на работа на двигателя без прекъсвания на процеса на горене. Прекъсванията могат да бъдат точно определени от момента на рязко повишаване на концентрацията на СН в отработилите газове (ОГ), както и значителните колебания на налягането в цилиндъра и с намаляване на температурата в изпускателния колектор.

Количеството NO_x в този случай практически съответства на количеството NO_x при работа с чист водород: при $\alpha > 1,8$, концентрацията на NO_x е незначителна. Количеството на CH достига минимум при $\alpha = 1,25$; при последващо обедняване на сместа отново се увеличава поради увеличаване на недоизгорялото въглеродородно гориво. В същото време работата на двигателя в зоната на много бедните смеси практически не се отразява на количеството на CO . Стойността на η_i на двигателя по време на работа с много бедни смеси се увеличава от 33% за $\alpha = 1$ до 37% за $\alpha = 2,8$, а N_i намалява с 30% поради намаляване на количеството подадена топлина.

Използват се следните методи за дозиране на водорода:

- подаване на постоянно количество водород, независимо от режима на работа на двигателя;
- поддържане на определено съотношение в горивната смес.

Основен проблем при използване на водорода е съхранението му на автомобила. Затова в последните години се разработват „горивни клетки“, преобразуващи енергията от изгарянето на водорода директно в електричество. Основен недостатък е масата на такива агрегати, понякога превишаващи до 10 пъти масата на бензинов резервоар с еквивалентни енергийни запаси!

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От казаното до тук може да се каже, че водородът:

- е екологично гориво; по време на изгарянето му се образува само вода;
- дава възможност да се работи с бедни смеси, което води до значително намаляване на съдържанието на NO_x в $ОГ$;
- е най-разпространеният елемент и запасите му са практически неограничени;
- може да се използва практически навсякъде с помощта на горивните елементи.

Освен предимства, водородът има някои недостатъци:

- не съществува в „чист“ вид; за получаването му е необходима по-голяма енергия от енергията, получена при изгарянето му;
 - съхраняването му в резервоари поставя специални изисквания към тях;
 - за масово навлизане е необходимо изграждане на съответната инфраструктура;
- Зареждането му на автомобила не е тривиален процес! Изискват се съответните познания!
- с въздуха при определени условия създава гърмящи смеси;
 - поради по-високата температура на горене, частите на ДВГ са значително по-натоварени и съответно ресурсът им е значително по-малък.

REFERENCES

Boer, P. C., Mclean, W. J., Homan, H. S. (1976). Performance and emission of hydrogen fueled internal combustion engines. Intern. J. of Hydrogen Energy, N 2, pp. 153 – 172.

Karim, G. A., Klat, S. R. (1966). The knock and autoignition characteristics of some gaseous fuels and their mixtures. J. Institute of Fuel, 39, N 302, pp. 109 – 119.

Escher William J. D., Ecklund E. E. (1976). Recent progress in the hydrogen engine. SAE Prepr., N 760571, 11 p.

Escher William J. D., (1975). Survey and assesment of contemporary U. S. hydrogen – fueled ICE projects., Record 10th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf., Newark, Del., 5 p.

Mishchenko A.I., Belogub A.V., etc, (1988). Application of hydrogen for motor vehicles. Atom-hydrogen energy and technology: collection of articles. Art. Issue 8.M: Energoatomizdat.

Iliev S., (2020). Investigation of the of gasoline direct injection engine performance and emissions working on Ethanol-Gasoline blends, 12th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), Varna, Bulgaria, pp. 1-3.

Iliev S., (2020). A Study of the influence of HHO Gas on the Performance and Emissions of a Diesel Engine, 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, pp. 1-4.