

Анализ за влиянието на добавки от водород или ННО газ върху показателите на дизелов двигател

Емилиян Станков, Кирил Хаджиев

Analysis of the influence of additives as hydrogen or HHO gas on the operation of the diesel engine: Analysis of the theoretical investigate and some received the experimental results of the effects of additives as hydrogen or HHO gas on the combustion process, efficiency, fuel consumption and diesel engine performance.

Key words: supplements, hydrogen, HHO gas, efficiency, combustion process, environmental performance.

ВЪВЕДЕНИЕ

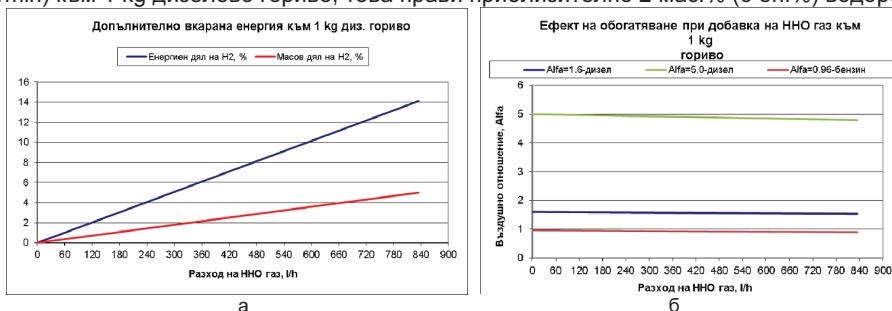
Съгласно общоприетата теория за верижните окислителни реакции основно влияние за тяхното развитие оказват активни центрове, лесно влизачи в съединения с изходните или междинните продукти при минимална активираща енергия. При изгаряне на въглеродородни горива такива центрове са атомите на водорода, кислорода и ОН радикалите. Установено е, че изходната структура на горивото не оказва съществено влияние за образуването на активни центрове и най-вече на атомен водород – най-леката частица с почти четири пъти по-голяма скорост на дифузия в сравнение с всеки друг радикал. Най-важен фактор, определящ скоростта на реакциите е отношението С/Н в горивото. С намаляване на това отношение, т.е. с нарастване делът на водорода, се разширяват концентрационните граници на горене и нараства скоростта на реакциите. Допълнителното обогатяване на гориво-въздушната смес с водород може да се разглежда като метод за намаляване на отношението С/Н в основното гориво и следователно като средство за целенасочено разширяване на концентрационните граници на горене. Установено е, че наличието на свободен водород оказва влияние върху хода на протичането на верижните предпламени реакции на окисление на горивото като измества равновесието на реакциите на дехидрогенизация по посока на образуването на нискомолекулни въглеродороди. По този начин се подобряват условията за по-пълно изгаряне и се потиска образуването на ацетилен, който благоприятства образуването на саждени частици. Високата скорост на горене на водорода, води също така и до намаляване продължителността на периода на дифузионно горене и намаляване на димността.

Логично е да се очаква, че при предварително подаване на пропорционално еднакви на литровият обем количества водород в пълнителните системи на двата вида двигатели (според начина на възпламеняване), след неговото смесване с въздуха, въздействието му върху горивния процес ще има различен механизъм и съответно различен краен ефект. За двигателите с принудително възпламеняване това бе изяснено в предни публикации. Предмет на сега направения анализ е връзката между делът на водородната добавка и характера на протичане на горивните процеси при двигателите със самовъзпламеняване.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Теоретичен анализ. При бензиновите двигатели имаме т.н. високотемпературно възпламеняване от енергията на ел. искра и горене на хомогенна гориво-въздушна смес, а за дизеловите е характерно нискотемпературно възпламеняване и изгаряне на нехомогенна (хетерогенна) смес или т.н. дифузионно горене при различни състави на гориво-въздушната смес. Сравнявайки въглеродородния състав на бензина и дизеловото гориво, по-малкия дял на водорода в дизеловото гориво, води и до по-малък начален енергиен принос (при

еднакво въздушно отношение). При такова начално условие добавката на относително еднакво масово количество водород с постъпващия въздух трябва да повлияе по-съществено в енергийния баланс на внесената енергия при дизеловия двигател. Но, имайки предвид различните експлоатационни въздушни отношения при двата типа двигатели, добавката на относително еднакво масово количество водород с постъпващия въздух трябва да повлияе по-съществено в баланса на внесената енергия при бензиновия двигател. Или, на дизеловия двигател за режимите на работа с бедни смеси (празен ход и малки натоварвания) ще му е необходимо много по-голямо количество водород. От показаните на фиг.1а графични зависимости е видно, че при добавка на ННО газ от порядъка на 360l/h (6 l/min) към 1 kg дизелово гориво, това прави приблизително 2 мас.% (6 ен.%) водород



Фиг.1 Влияние на добавката от ННО газ върху енергийния и масов дял на водорода (а) и въздушното отношение (б)

Оценката върху обогатяването на горивовъздушната смес, показана на фиг.1б показва, че при същия разход на ННО газ относителното намаление на въздушното отношение при бензиновия двигател е 3,1%, при дизел на номинален режим – 1,9%, а при работа на празен ход-1,6%.

Според [1] сумарната скорост на протичане на сложните предпламенни процеси не се влияе еднозначно от изменението на температурата. С повишаване на температурата има температурни диапазони, в които скоростта намалява и след това отново расте. Тези аномални явления се обясняват с особеностите на многостадийното възпламеняване. В буталните двигатели преди появата на видим пламък възниква т.н. студен пламък, който е на лице и при хомогенни и при хетерогенни системи. Този факт потвърждава, че в кинетиката на възпламеняване на хомогенни и хетерогенни смеси няма принципни разлики. Основното различие е в скоростта на разпространение на студения пламък: в хомогенните смеси разпространението му е сравнително равномерно, а в хетерогенните (при пряко впръскване на гориво) е крайно неравномерно в различни посоки на горивната камера.

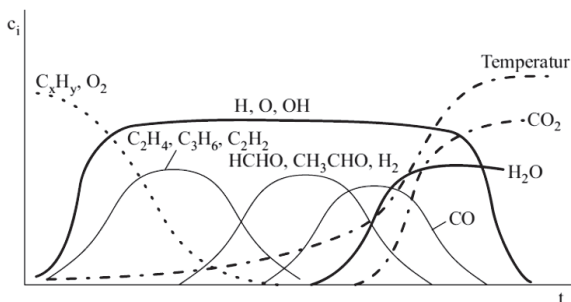
Средната скорост на горене на хомогенна бензино-въздушна смес е около 30-50 m/s и при нормално горене рядко надхвърля 80 m/s., а при дизеловите двигатели скоростта на разпространение на фронта на пламъка при възникване на първоначалните огнища е около 1000 m/s, а след това през периода на бързото горене намалява до 100-300 m/s според състава, налягането, температурата, степента на турбулизация и пр.[4].

Логически, относителното увеличаване на скоростта на горене следствие на еднаква добавка на водород би трябвало да е по-голямо при бензиновите двигатели, понеже те работят със състав на сместа близък до стехиометричния, като при въздушно отношение $\alpha=1$ скоростта на горене на водородо-въздушната смес е 115-120 m/s, а при $\alpha=1,6$ (характерна за дизеловите) спада до 50-60 m/s. Т.е. при съставите, с които работи дизеловият двигател не може да се очаква водородната

добавка да предизвика същото ускоряване на горивния процес, както при бензиновия.

Важно е още да се има предвид, че по време на загряването на впръснатото дизелово гориво по-лесно се изпаряват леките фракции, но те имат по-висока температура на възпламеняване 350-500 °С. Началните огнища на горене се зараждат в по-тежките фракции, които се изпаряват по-късно но са с температура на възпламеняване под 300 °С. Това може да означава, че наличния допълнително внесен водород в горивната камера, поради малката необходима енергия за възпламеняване, може да се включи в горивните реакции веднага след появата на началните огнища на горене, но не може да породи началото на горенето поради по-високата му температура на самовъзпламеняване -600 °С.

При работа с конвенционалните горива водородът се внася в горивния процес като техен химически свързан компонент. При възникването на горене, съгласно теорията за верижните реакции и в съответствие с проведени анализи е установено (фиг.2), че във фронта на горене почти от самото начало, при сравнително ниски температури има откъсване на водородни атоми от въглеводородните вериги. По-късно те формират водородни молекули и в заключителната фаза се окисляват до вода. Т.е. водородната компонента в атомна и молекулярна форма е елемент от горивния процес.



Фиг.2 Времени промени на концентрациите при изгарянето на въглеводороди [2]

Първоначалното наличие на атомни форми на водород в постъпващата с въздуха ННО смес е малко вероятно поради това, че атомният водород има трайност на съществуване около 0,5 секунди. Но ако все пак има някакви количества, то те вероятно биха съкратили продължителността на химичните окислителни реакции, за сметка на периода на зараждане на активни центрове. При окислението на водорода схемата е сравнително проста, но при въглеводородите, от които се състои дизеловото гориво процесите са много по-сложни и са изключително трудни за описание.

При температури 250-350 °С окислителните реакции на въглеводородите от горивото протичат за секунди или десети от секундата до нива на алдехиди и прекиси, а над 500 °С реакциите протичат до ниво на пълно саморазпадане за милисекунди. В присъствие на кислород процесът значително се ускорява. За ефективно изгаряне на въглеводородите е необходима температура над 1500 °С, а за възпламеняване и изгаряне на водорода е достатъчна и по-ниска температура.

При постоянна добавка на ННО, с увеличаване на натоварването и честотата на въртене ще се увеличават температурите и ще се ускорява процеса. Увеличаването на добавката ННО също ще ускорява процеса и ще подобрява ефективността. Т.е. от гледна точка на температурите режимът празен ход с минимално устойчива честота на въртене е най-неблагоприятен. Към това можем да добавим и много бедната горивовъздушна смес на празен ход, в която водородните

атоми от ННО добавката са много раздалечени и ускоряващото им влияние върху горенето не е сигурно.

Потвърждение на това предположение може да бъде резултата от изследване на високочестотните компоненти на налягането, които се появяват при наличие на водород в горивната камера [3]. Чрез анализ с програмен продукт Chemkin, а и експериментално е потвърдено, че степен на съгъстяване 16 е достатъчна за предизвикване самовъзпламеняване на водородо-въздушна смес при подгрят двигател, при което пропорционално с увеличаване делът на водорода високочестотните колебания се появяват по-рано от тези, предизвикани от работата само с дизелово гориво. По тази информация разсъжденията могат да се продължат и с това, че при дизеловите двигатели с разделени горивни камери поради високата степен на съгъстяване в сравнение с тези с неразделени горивни камери, възпламеняването на водородната добавка вероятно става по-лесно, но ще бъде съпроводено и с по-интензивни високочестотни колебания и повишен шум.

От друга страна долната граница на възпламеняване на водорода е 4 об.% при 20 °С и 101 kPa, което съответства на въздушно отношение $\alpha=9,8$. Това означава, че за да се създаде такава концентрация в цилиндриците на дизелов двигател с литров обем 2,0 литра при 2000 min⁻¹, който изразходва 1,8 m³/min въздух трябва да постъпват над 72 l/min водород. При подаване на водорода от бордови електролизери това е практически невъзможно поради ограниченията на потребяваната ел. енергия, така че влиянието на водородната добавка може да бъде констатирано едва след възникване на самовъзпламеняването на впръснатото дизелово гориво.

Поради стехиометричното отношение между водорода и кислорода в ННО добавката, формално приемаме, че при тяхното взаимодействие не се консумира кислород от постъпилния въздух. Увеличението на добавката ННО при запазена циклова порция дизелово гориво води до намаляване на коефициента на пълнене и обогатяване на гориво-въздушната смес за сметка на намаленото количество въздух, изместено от постъпващата добавка.

Увеличението на добавката ННО при запазен ъгъл на изпреварване на впръскването води до увеличаване на налягането в цилиндъра, температурата и количеството отделена топлина по линията на разширението поради намаляване скоростта на горене.

Реалният принос на енергията, получена от изгарянето на ННО добавката е над 3 пъти по малък от необходимото за компенсиране загубата на енергия за производство на газовата добавка.

Изложените до тук теоретични положения поставят следните въпроси от практическа гледна точка:

-какъв ще бъде реалния ефект на водородната (или ННО) добавка върху горивния процес на дизеловия двигател, мощностните и икономическите показатели на двигателя при бедни и богати смеси, т.е. при различни натоварвания и честоти на въртене;

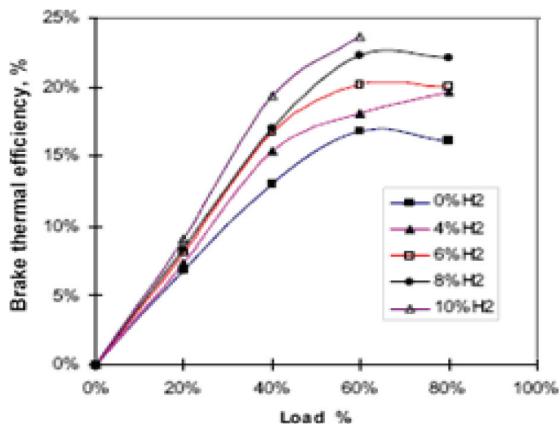
-какви количества водород (или ННО) са необходими при различните натоварвания за да се регистрира видимо подобрене;

-как се променя ефекта върху екологичните показатели с нарастване количеството на водорода.

Експериментален анализ. Анализирано е подробно експериментално изследване на дизелов двигател Mack MP7 355 E, 6 цилиндъра, 10.8L, 265 KW, с турбокомпресор с променлива геометрия и с EGR [5]. Установено е, че добавката на водород заедно с постъпващия въздух дава увеличение на специфичния термичен к.п.д., но предимно при голямо натоварване. При малки натоварвания термичният к.п.д. намалява поради по-непълното изгаряне на водорода. При натоварвания под 20%, с увеличаване обемния дял на добавения водород се констатира увеличаване концентрацията на неизгорелия водород. При 10% натоварване е установено, че

коэффициентът на изгаряне на водорода при добавка от 0-6 об.% не надхвърля 80%. Това на практика означава, че добавката на водород за дизелов двигател при натоварване под 20 % не е оправдано. Непълнотата на изгаряне на водорода допълнително намалява общата ефективност на използване, като се отчете и необходимата енергия за получаването му.

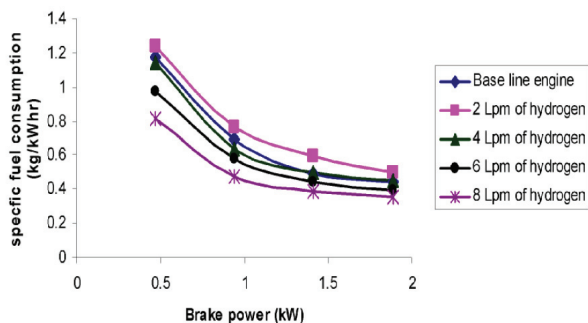
Резултати от проведен експеримент на дизелов двигател с подаване на водород в пълнителния колектор [6], представени на фиг.3 показват изменението на термичния к.п.д. по товарна характеристика. Термичния к.п.д. се увеличава с увеличаване на водородната добавка при постоянна скорост и натоварване. Това се дължи на подобряване на процеса на горене, причинено от присъствието на водород, свързано с намаляване продължителността на горене. Топлинната ефективност достига своя максимум при около 60-80% натоварване за всички изследвани добавки на водород. При по-високи натоварвания ефективността спада поради непълното изгаряне на богати смеси.



Фиг.3 Влияние на добавката на водород върху термичния к.п.д. по товарна характеристика [6]

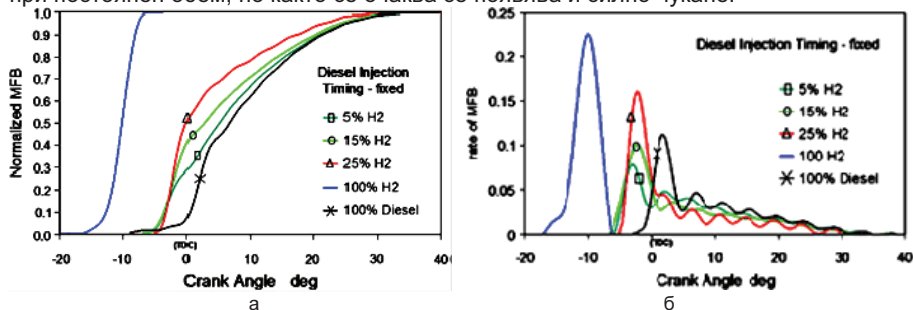
Според друго изследване [7], добавка на водород под 4 l/min за натоварване до 30% на едноцилиндров дизелов двигател с неуточнен литров обем, но с номинална мощност 5,9 kW/1800 min⁻¹ влошава горивния процес и увеличава специфичния ефективен разход спрямо базовия вариант без добавка. Съгласно резултатите (фиг.4) следващо увеличаване на водорода от 4 до 8 l/min се отразява положително.

От изследване на работния процес с добавка на водород без промяна на цикловото количество дизелово гориво [8] е установено, че малки количества от водород (например около 5% енергиен еквивалент), когато се добавят към постъпващия въздух в дизелов двигател намаляват подготвителния период на запалване, а в същото време водят до намаляване на скоростта на повишаване на налягането. Тази добавка осигурява по-добри условия за мека работа на двигателя и може да увеличи издръжливостта на двигателя. Фигури 5а и 5б показват интегралния и диференциалния закон на горене чрез масовата скорост на горене-MFB. Както е показано, когато се добавят малки количества (5% -15%) водород, горенето започва по-рано в сравнение с дизеловото гориво, но максимумите на началните пикове на скоростта MFB са по-ниски от този на дизеловото гориво. По-бавно горене (по-ниска пикова скорост на MFB), наблюдавано през основната фаза на горене е причинено главно от по-малкото задържане на възпламенявянето, което



Фиг.4 Влияние на добавката на водород върху специфичния ефективен разход на едноцилиндров дизелов двигател по товарна характеристика [8]

допринася за по-ранно запалване, но след започване на горенето скоростта на горене е по-ниска поради сумарно бедната смес. Въпреки, че общата продължителност на горене не се променя значително с водороден дял от 5% -25%, при добавка на водород около 25% (или повече), максималната начална скорост на горене (MFB) е по-висока. Това прави горенето по-бързо и по-близко до условията при постоянен обем, но както се очаква се появява и силно чукане.



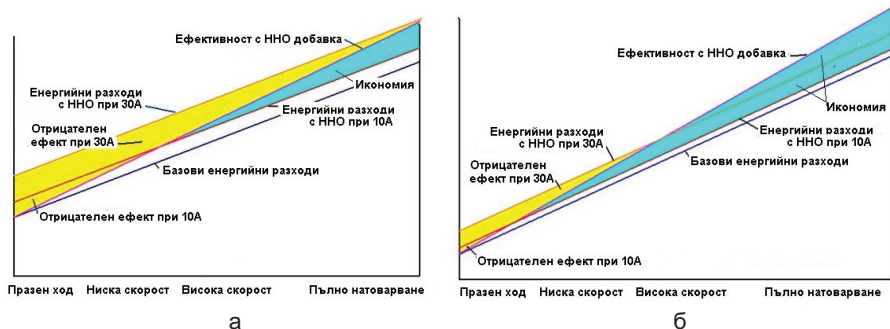
Фиг.5 Интегрален (а) и диференциален (б) закони на горене при различни съотношения на дизелово гориво и водород [8]

Можем ли да говорим за намаляване разхода на дизелово гориво при добавка на водород и как да го определим?

Резултатите от проведени експериментални изследвания на дизелов двигател с мощност 240 к.с. с добавка на водород [9] показват, че при добавка до 4тегл.% водород, същият изпълнява заместваща роля в енергийния баланс на внесената енергия, като намаляването делът на дизеловото гориво е до 9% при 1% увеличение на внесената енергия. Относно влиянието на водородната добавка върху ефективният к.п.д. на двигателя се констатира тенденция при натоварване под 40% за влошаване на икономичността с до 30%, а над това натоварване за подобряване на икономичността средно около 10%. Основен фактор в тези процеси се оказва въздушното отношение. Същите автори в друго свое изследване доказват, че при водородни добавки и работа с въздушно отношение $\alpha > 2$ допълнително подобряване на ефективността на горене (както при бензиновите двигатели) не се получава, а ефекта е проста замяна на дизеловото гориво с водород.

И други изследователи твърдят, че забележима ефективност се постига при натоварвания и честоти на въртене над средните. Признава се, че при работа на празен ход и малки натоварвания ефектът може да бъде отрицателен. При добавка

на ННО газ в пълнителната система на дизелов двигател е констатирано [10], че при работа на празен ход, при малки натоварвания и ниски обороти се получава отрицателен ефект, изразяващ се в увеличаване разхода на гориво. Тези особености зависят също и от мощността на двигателя. Както е илюстрирано на фиг.5 при маломощните дизелови двигатели ползата от добавката е предимно в



Фиг.5 Анализ на енергийната ефективност от използването на ННО добавка при дизелови двигатели с малка мощност (а) и голяма мощност (б) [10]

областта над средните натоварвания, а при големите двигатели се постига ефект и при малки натоварвания. Това се припокрива с констатираното вече, че добавката на водород по принцип не се оползотворява рационално от двигателя при работа на празен ход и малко натоварване.

При използване на ННО добавката на автомобила се намесва и баланса на енергията за получаване и изгаряне на тази газова смес в двигателя. Получава се така, че поради невъзможността на двигателя да оползотвори водородната добавка, на определени режими тя или не трябва да се произвежда, или може да се произвежда, но да не се изразходва, а да се натрупва за използване при натоварвания над средните.

Относно влиянието на добавката на водород върху димността на изпусканите газове всички разполагаеми изследвания сочат, че добавката на водород води до намаляване на димността на изпусканите газове. Водородът оказва благоприятно въздействие както върху потискането на процеса на саждо-образуване, така и върху процеса на окисление на образуваните вече сажди.

Емисиите на неизгорели въглеродороди и на въглероден окис намаляват с увеличаване делът на водородната добавка, както при работа на празен ход, така и при увеличаване на натоварването.

При малки разходи на водород (до 4 ен.%) при работа на празен ход с увеличаване на водородната добавка се наблюдава съизмеримо намаление и на азотните окиси поради относителното обогатяване на сместа(намаляване на свободния кислород) и запазване температурите на горене[9]. С увеличаване на натоварването при постоянна добавка относителния дял на водорода намалява, ефекта на обогатяване е несъществен и тенденцията за леко увеличаване на азотните окиси се дължи на слабото влияние върху температурите на горене [11]. При постоянно натоварване с увеличаване на водородната добавка азотните окиси нарастват. С увеличаване на натоварването при постоянна добавка има тенденция за намаляване на азотните окиси поради обогатяването на сместа.

От направеният теоретичен и експериментален анализ за влиянието на добавки от водород или ННО газ в пълнителния колектор на дизелов двигател следва:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поради вътрешното смесобразуване и големия диапазон на изменението на качеството на горивовъздушната смес при дизеловите двигатели, ефективността от използване на водородна или ННО добавка има специфичен характер на изменение.

2. Констатирано е единодушно мнение, че при малки натоварвания добавката на водород е нецелесъобразна, но за областта на максималните натоварвания констатациите за ефективността са противоречиви.

3. За постигане на оптимални резултати по отношение на мощностно-икономическите показатели е необходимо регулиране на количеството добавян газ (водород или ННО) при промяна натоварването на дизеловия двигател.

4. Влиянието на добавките от водород или ННО газ върху екологичните показатели на дизеловите двигатели се изразява в тенденция за намаляване на CO, CH и димност и увеличаване на NO_x при увеличаване на натоварването и пропорционално на делът на добавката.

5. За задълбочаване на познанията в областта на механизма на въздействие на малките добавки от водород и ННО газ върху протичането на работните процеси и подобряване ефективността на топлоизползване е необходимо да се увеличат изследванията с анализ на процеса горене за добавки с енергиен дял под 5% при корекция и без корекция на основното горивоподаване.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кавтарадзе Р.З., Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебник для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 720 с., ISBN 978-5-7038-3086-4.

[2] Günter P. Merker et al., Grundlagen Verbrennungsmotoren, PRAXIS, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012.

[3] Stanislaw Szwaja, Karol Grab-Rogalinski, Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine, International journal of hydrogen energy 34(2009), 4413–4421.

[4] Воинов А.Н., Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. – М.: Машиностроение, 1977. – 277 с.

[5] T. Gatts, H.Li et al., An Experimental Investigation of Hydrogen emissions of a 2004 heavy duty diesel engine supplemented with hydrogen, 2010, International Journal of Hydrogen Energy, doi:10.1016/j.ijhydene.2010.06.056

[6] B.Rajendra Prasath et al., Hydrogen Operated Internal Combustion Engines – A New Generation Fuel, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 2, Issue 4, April 2012.

[7] Premkarti Kumar et al, USING HYDROGEN AS A FUEL IN AUTOMOTIVE ENGINES – AN INVESTIGATION, INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND RESEARCH, Vol. No. 1, Issue No. 1, Dec.-Jan. 2013, 090-093.

[8] Szwaja S., Karol Grab-Rogalinski, Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine, International journal of hydrogen energy 3 4 (2009) 4413 – 4421

[9] Павлов Д.А., Л.Н. Бортников, Исследование влияния добавок водорода на показатели ДВС при гетерогенном способе формирования ТВС, Вектор науки ТГУ. № 4 (22), 2012.

[10] <http://www.hydrogen-boost.com/September%202007.html>

[11] Lyn McWilliam, COMBINED HYDROGEN DIESEL COMBUSTION, A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, School of Engineering and Design, Brunel University, United Kingdom, September 2008.

За контакти:

Доц. д-р Емилиян Станков, Катедра "Двигатели и транспортна техника", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082-888 332, e-mail: estankov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.