

HHO (H₂/O₂) DUJŲ PANAUDOJIMO VIDAUS DEGIMO VARIKLYJE EFEKTYVUMO VERTINIMAS

Alfredas Rimkus

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

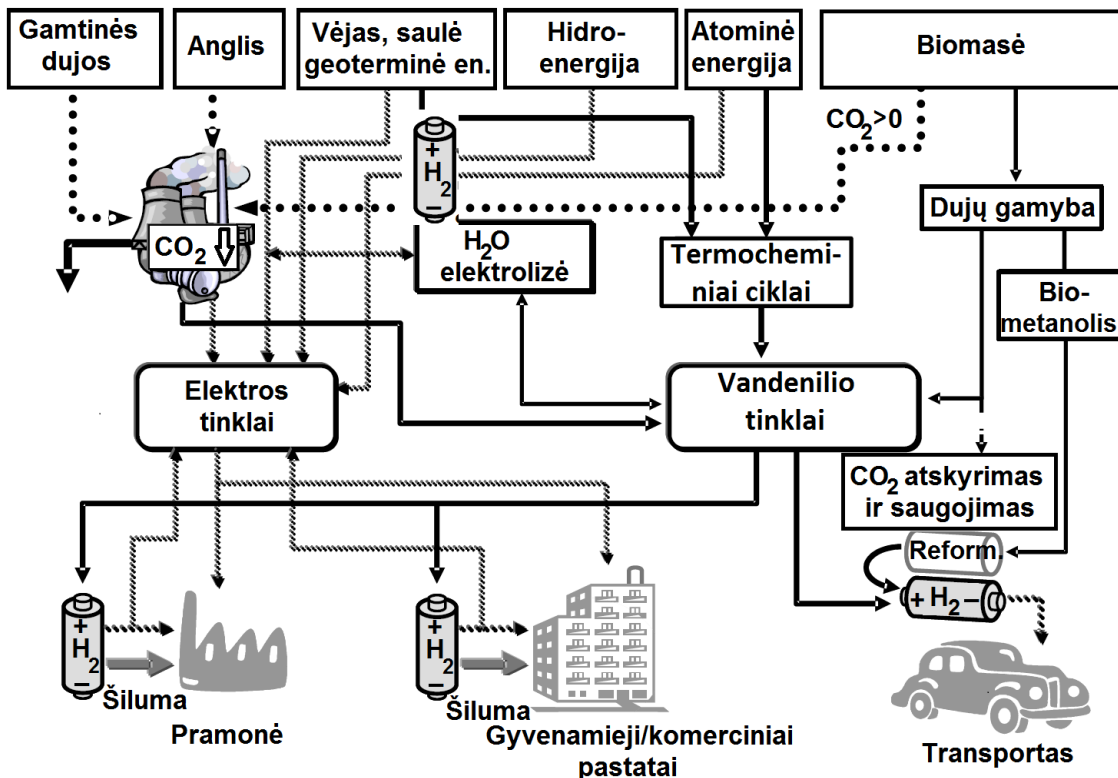
Anotacija. Straipsnyje apžvelgtos vandenilio, kaip vidaus degimo variklio (VDV) degalų, naudojimo galimybės ir perspektyvos. Apibendrinti įvairių tyrėjų gauti rezultatai tiriant VDV energetinius ir ekologinius rodiklius, į variklį papildomai tiekiant HHO dujas. Pateiktos eksperimentiniu būdu nustatytos energijos sąnaudos reikalingos HHO dujų gamybai elektrolizės būdu ir apskaičiuotas šių dujų panaudojimo vidaus degimo variklyje būvio ciklo energetinis efektyvumas. Įvertinus HHO dujose esančio vandenilio fizikines–chemines savybes ir šių dujų gamybos efektyvumą paaiškinta teigiama ir neigiama HHO dujų įtaka slėginio ir kibirkštinio uždegimo variklių rodikliams.

Reikšminiai žodžiai: HHO dujos, vidaus degimo variklis, energetinis efektyvumas, ekologinis efektyvumas.

Įvadas

Vandenilio energetika atitinka ES Baltosios knygos nuostatas „Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas“. Vandenilio energijos šaltinių naudojimo didinimas yra skatinamas „Europa 2020“ programoje, kurioje pateiktos alternatyvių degalų naudojimo gairės (Europos komisija, 2011). Investicijos į vandenilio panaudojimą transporto, pramonės ir energetikos srityse numatytos ES mokslinių tyrimų ir inovacijų programoje „Horizontas 2020“. Vystant minėtas programas, būtina pasitelkti visus žinomus vandenilio energijos resursus, pritaikant juos transporto sektoriui. Kitas svarbus vandenilio dujų naudojimo aspektas yra ekologinis. ES nuolat diegiami įvairūs oficialūs standartai reglamentuojantys automobilių išmetamųjų dujų emisijas. Nuo 2014 metų įsigaliojo Euro 6 standartas. Dyzeliniais varikliais griežtinamos NO_x, CH, PM emisijų normos. Benzininiams varikliais su tiesioginiu benzino įpurškimu įvestos kietųjų dalelių emisijos normos.

Vandenilis yra vienas perspektyviausių energijos akumuliatorių, kuris gali patenkinti poreikius, susijusius su energetika ir užtikrinti aplinkos sauga ir ekologišką jos vystymosi raidą. H₂ gamybai galima panaudoti tradicinius ir alternatyvius energijos šaltinius, atskiriant CO₂ (1 pav.). Vandenilis efektyviai kaupia ir perneša energiją, o jo degimo produktas yra netaršūs vandens garai. Vandenilis yra aktyvus cheminis elementas ir vidaus degimo variklyje (VDV), degdamas su kitais degalais, gerina jų degimą, taip pagerindamas ekologinius ir energetinius variklio rodiklius (Whiete et al., 2006; Karagoz at al., 2015).



1 pav. 2050 metais pasaulyje prognozuojama pirminė energija

Šaltinis: (Marban and Valdes-Solis 2007)

Vandenilio kaupimui ir transportavimui automobilyje reikia sudėtingos, brangios, daug sveriančios įrangos. Tai padidina automobilio kainą, svorį, išauga eksploatacijos išlaidos. Vandenilį racionalu gaminti važiuojančiame automobilyje, saugoti tik minimalius jo kiekius ir šias dujas tiekti į variklio cilindrus kartu su kitais degalais. Paprasčiausias vandenilio gamybos būdas yra vandens elektrolizė, kuriai reikalinga nuolatinė elektros srovė gali būti išgaunama panaudojant VDV arba alternatyvią energiją. Vandenilio generatoriai būna dviejų tipų: vieni elektros srove iš vandens išskiria vandenilį H_2 ir deguonį O_2 , atskirdami šias dujas, o kiti vandenilio ir deguonies dujų mišinį – Brauno dujas (Surygala, 2008).

Vandens elektrolitinio skaidymo į vandenilį ir deguonį tyrimai prasidėjo XIX amžiuje (Eisenberg and Kauzmann, 1969), o apie jo elektrolitinį skaidymą aprašė Plambeck (1982). Pastaraisiais dešimtmečiais buvo atliekami stambaus masto tyrimai, susiję su vandens skaidymu į vandenilio ir deguonies dujas. Šie tyrimai buvo inicijuoti Yull Brown 1977 metais ir buvo atliekami įrenginiais, bendrai vadintais elektrolizeriais, o jų rezultate gautos HHO dujos yra žinomos kaip Brauno dujos (Brown, 1977). Yull Brown patentuose ir vėliau atsiradusiuose gausiuose šios srities literatūros šaltiniuose yra teigiama, kad Brauno dujos yra degios dujos, sudarytos iš įprastų vandenilio ir deguonies dujų tikslu stochiometrinio santykiu: 2/3 (arba 66,66% tūrio) vandenilio ir 1/3 (arba 33,33% tūrio) deguonies, šios dujos taip pat vadinamos HHO dujomis.

Naudojant HHO dujas, kaip degalų priedą transporto priemonėse gerinama degalų degimo kokybė, mažinamas variklių išmetamų dujų toksiškumas – mažėja nesudegusių angliavandenilių, anglies viendeginio koncentracija, o dyzeliniuose varikliuose dar ir dūmingumas (Bari and Esmaeil, 2010; Wang et al., 2012). HHO dujų degimo produktas yra vandens garai.

Šio straipsnio tikslas – apibendrinti HHO dujų gamybos ir panaudojimo vidaus degimo varikliuose efektyvumo tyrimų rezultatus.

HHO dujų panaudojimas vidaus degimo varikliuose energetinis ir ekologinis efektyvumas

Musmar ir Al-Rousan (2011) atliktuose tyrimuose HHO dujų generavimo schema buvo sukurta ir integruota į Honda G 200. Rezultatai rodo, kad HHO, oro ir benzino mišinys sąlygoja taršos koncentracijos emisijoje sumažėjimą ir variklio naudingumo koeficiento padidėjimą. Emisijos testai buvo atliekami keičiant variklio greitį. Rezultatai rodo, kad anglies monoksido koncentracija buvo sumažinta apie 20 %. Taip pat buvo pastebėtas degalų sąnaudų sumažėjimas.

Al-Rousan (2010) atliko eksperimentus vieno cilindro kibirkštinio uždegimo varikliu (Honda G 200), į įsiurbimo kolektorių papildomai tiekiant HHO dujas, kurių gamybai buvo naudojamas papildomas 15 V energijos šaltinis. Rezultatai rodo, kad optimalus elektrolizės įrenginio elektrodų paviršiaus plotas, reikalingas pakankamam HHO dujų kiekiui pagaminti, yra dvidešimt kartų didesnis už variklio stūmoklio paviršiaus plotą. Be to, elektrolizės įrenginiui reikalingo vandens tūris yra pusantro karto didesnis už variklio talpą. Bandymai parodė, kad, į variklį papildomai tiekiant HHO dujas, degalų sąnaudos sumažėja, sumažėja ir išmetamųjų dujų temperatūra bei tarša išmetamųjų dujų emisijoje.

Wang ir kt. (2011) tyrė vandenilio – deguonies mišinių priedo įtaka benzininių variklių su kibirkštinio uždegimu eksploatacinėms savybėms. Bandymams buvo naudotas modifikuotas Oto variklis su vandenilio ir deguonies įpurškimo sistema. Elektroninis reguliavimo įtaisas buvo pritaikytas vandenilio, deguonies ir benzino purkštuvų atidarymui ir uždarymui valdyti. Buvo pritaikytos trys standartinės vandenilio ir deguonies mišinio tūrio frakcijos visų įleidžiamų dujų tūryje – 0 %, 2 % ir 4 %. Šiam vandenilio ir deguonies mišiniui benzino įpurškimo trukmė buvo sureguliuota taip, kad oro pertekliaus mišinyje koeficientas būtų padidintas nuo 1,00 iki paliesinto mišinio, būdingo variklio darbui ekonomiškumu režimu. Bandymų rezultatai parodė, kad ekonomiškumo sąlygomis benzininis variklis, į kurį buvo įpurkšta vandenilio ir deguonies mišinio, turi didesnę efektyvųjį naudingumo koeficientą ir vidutinį indikatorinį efektyvų slėgį. Vandenilio ir deguonies mišinys prisidėjo ir prie CH ir CO koncentracijos sumažėjimo. NO_x emisija padidėjo.

Bari ir Esmaeil (2010) atliko atmosferinio dyzelinio variklio eksploatacinių savybių gerinimo, į variklio įsiurbiamą orą papildomai tiekiant H_2/O_2 dujų mišinį, pagamintą vandens elektrolizės procese, tyrimą. Eksperimentiniai darbai buvo atliekami, esant pastoviam greičiui ir keičiant apkrovą bei H_2/O_2 mišinio kiekį. Rezultatai rodo, kad papildomai tiekiant H_2/O_2 mišinį kuris atitinka 4,84 %, 6,06 %, ir 6,12% dyzelino šiluminį ekvivalentą, variklio efektyvusis naudingumo koeficientas padidėja nuo 32,0 % iki 34,6 %, nuo 32,9 % iki 35,8 % ir nuo 34,7 % iki 36,3 %, esant 19 kW, 22 kW ir 28 kW apkrovai, atitinkamai. HC, CO_2 ir CO koncentracija deginiuose sumažėjo, o NO_x – padidėjo.

Yilmaz ir kiti (2010) tyrinėjo HHO dujų papildomo tiekimo poveikį slėginio uždegimo varikliams. HHO dujos yra monoatominės sandaros (vieno atomo molekulės). Dėl monoatominės vandenilio ir deguonies mišinio struktūros, jo savaiminio užsidegimo temperatūra buvo žemesnė, nei vandenilio (kurio struktūra yra dviatominė). Todėl HHO dujų mišiniui nereikėjo išorinio uždegimo šaltinio, pavyzdžiui, uždegimo žvakės ar elektros kibirkšties. Užsidegant HHO mišiniui, vyksta eksplozija (plėtimasis) ir implozija (traukimasis), kurių

išdavoje vėl susidaro vanduo, o reakcijos energija išsiskiria šiluminės energijos forma. Esant vieno atomo molekulėms nėra jokių atominių ryšių, kuriuos reikėtų ardyti prieš pakartotinį vandens susidarymą. Vadinasi, HHO dujos turi daugiau energijos, nes šie ryšiai niekuomet nesusiformuoja ir gaunama daugiau energijos palyginus su H₂ ir O₂ degimu. HHO degimo metu susidaro vanduo, kuris susiduria su degalais ir jie susijungia. Vanduo tampa šerdimi, o degalai tampa jo apvalkalu (dėl tankių skirtumo). Suspaudimo takto metu slėgis ir temperatūra auga, vanduo virsta garais, o degalai skaidomi. Įdiegus HHO sistemos elektroninį valdymą, variklio sukimo momento išsaugo iki 19 %, CO emisija sumažėjo iki 13 %, CH koncentracija sumažėjo iki 5 % o lyginamosios degalų sąnaudos sumažėjo iki 14 %. Tyrimai parodė, kad HHO srauto greitis turėjo būti sumažintas, kai variklio greičiai mažesni. Esant mažiems greičiams, dėl ilgesnės įsiurbimo trukmės HHO dujos cilindruose užima didesnę tūrį ir pablogėja cilindrų pripildymo koeficientas. Tai blogina efektyvųjį naudingumo koeficientą ir sąlygoja neigiamą poveikį variklio sukimo momentui, išmetamųjų dujų emisijai.

Rimkaus (2013) tyrimai rodo, kad naudojant mažą HHO dujų kiekį (~ 0,15 % įsiurbiamo oro tūrio), dujų gamybai naudojant VDV energiją, kibirkštinio uždegimo variklio, indikatorinis naudingumo koeficientas auga iki 5 %, varikliui veikiant paliesintu mišiniu, o slėginio uždegimo variklio energetiniai variklio rodikliai nežymiai blogėja. CH koncentracija deginiuose kibirkštinio uždegimo varikliui veikiant paliesintu mišiniu sumažėja iki 14 %, slėginio uždegimo variklio CH koncentracija sumažėja iki 15 %. Kibirkštinio uždegimo variklio CO koncentracija sumažėja iki 10 %, slėginio uždegimo variklio CO koncentracija sumažėja iki 15 %. CO₂ ir NO_x koncentracija kibirkštinio ir slėginio uždegimo variklių deginiuose išauga iki 6 %, nes tikėtina, kad dėl didelio reakcingumo HHO dujose esantis vandenilis dega suslėgimo pabaigoje, atlikdamas neigiamą darbą. Slėginio uždegimo variklio deginių dūmingumas sumažėja iki 25 %.

HHO dujų gamybos efektyvumas

Vandenilį kaupti ir saugoti yra sudėtinga, reikia brangios, didelį slėgį išlaikančios įrangos, o vandens elektrolizės įrenginiu vandenilį galima gaminti pačiame automobilyje ir iš karto jį sunaudoti. Vandenilio elektrolizės generatoriai būna dviejų tipų:

1. Vandenį išskaidantys į vandenilio H₂ ir deguonies O₂ dujas atskirai. Elektrolizės elemente ties anodu išsiskiria deguonis, ties katodu – vandenilis. Dujos, išsiskyrusios prie teigiamo ir prie neigiamo elektrodo surenkamos atskirai.

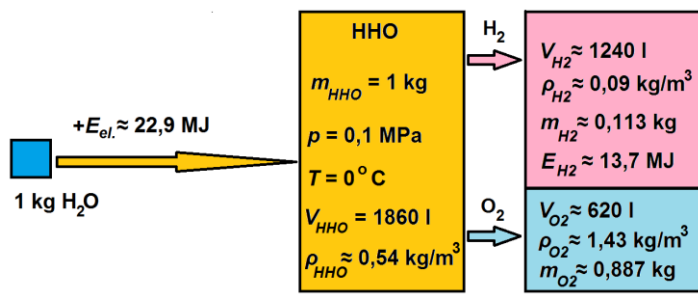
2. Gamina HHO dujas – degų vandenilio ir deguonies dujų mišinį.

Normaliomis sąlygomis (0,1 MPa slėgis ir 25°C temperatūra) elektrolizės procesui tarp anodo ir katodo reikalingas 1,23 V potencialų skirtumas (Gupta, 2009). Naudojant kalio hidroksido (KOH) elektrolito tirpalą įtampa tarp elektrodų gali siekti 2,0–2,5 V, esant srovės tankiui 2000 A/m² prie 80 °C elektrolito temperatūros (Srinivasan and Salzano, 1977). Vandenilio ir deguonies dujos yra atskiriamos tarp elektrodų sumontavus jonams laidžią membraną, kuri neleidžia dujoms susimaišyti, tačiau praleidžia OH⁻ jonus.

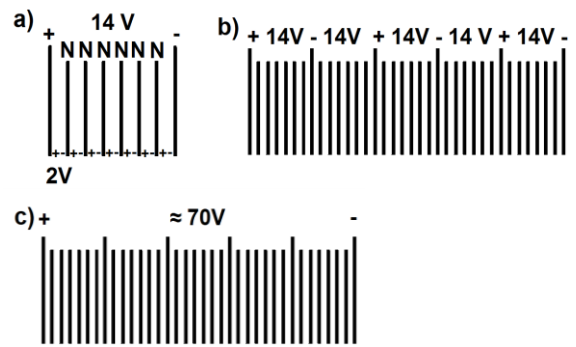
Tarp anodo ir katodo nesant sumontuotai membranai vandenilio deguonies jonai maišosi ir susidaro HHO dujos. HHO dujose vandenilio ir deguonies dujų tūrio santykis 2 : 1 (2 pav.). Iš 1 kg vandens pagaminama ≈ 1240 l vandenilio ir ≈ 620 l deguonies dujų mišinio, kurių bendras tūris ≈ 1860 l. Prie $p = 0,1$ MPa slėgio ir $T = 0$ °C temperatūros deguonies dujų tankis $\rho_{O_2} = 1,43$ kg/m³, vandenilio tankis $\rho_{H_2} = 0,09$ kg/m³, HHO dujų tankis $\rho_{HHO} = 0,54$ kg/m³. Viename litre HHO dujų yra 0,67 l H₂ dujų, kurių masė $m_{H_2/l} = 0,06$ g ir O₂ dujų, kurių masė $m_{O_2/l} = 0,48$ g.

Lengvojo automobilio elektros tinklo įtampa yra ≈ 14 V ir šios įtampos pakanka maitinti sekciją sudarytą iš septynių nuosekliai išdėstytų elektrolizės elementų, kurių kiekvienam tenka ≈ 2 V įtampa (3 a pav.). Prie kraštinių sekcijos plokštelių prijungiama maitinimo įtampa, o tarp jų yra šešios neutralios elektrodų plokštelės. Visos elektrodų plokštelės yra 0,8 mm storio ir pagamintos iš nerūdijančio plieno 316 L. Vienos plokštelės aktyvus plotas yra 0,0144 m², suminis sekcijos aktyvus plokštelių plotas 0,1 m². Plokšteles skiria 1,5 mm storio tarpinės pagamintos iš šarmams ir rūgštims atsparios gumos. Bandytu metu KOH koncentracija elektrolite 4 %.

Siekiant padidinti HHO dujų generatoriaus našumą viename elektrolizės įrenginyje nuosekliai sujungtos penkios sekcijos, kurių kiekviena turi po septynis elementus ir yra maitinama 14 V įtampa (3 b pav.). Toks penkių nuosekliai sujungtų sekcijų (trisdešimt penkių elementų) elektrolizės įrenginys gali būti maitinamas ir $14 \cdot 5 = 70$ V įtampa, papildomą srovės šaltinį (ne automobilio akumuliatorių) prijungiant prie kraštinių įrenginio elektrodų (3 c pav.). Atitinkamai prijungus maitinimą įrenginys gali būti maitinamas 28 V, 42 V ir 56 V įtampa.

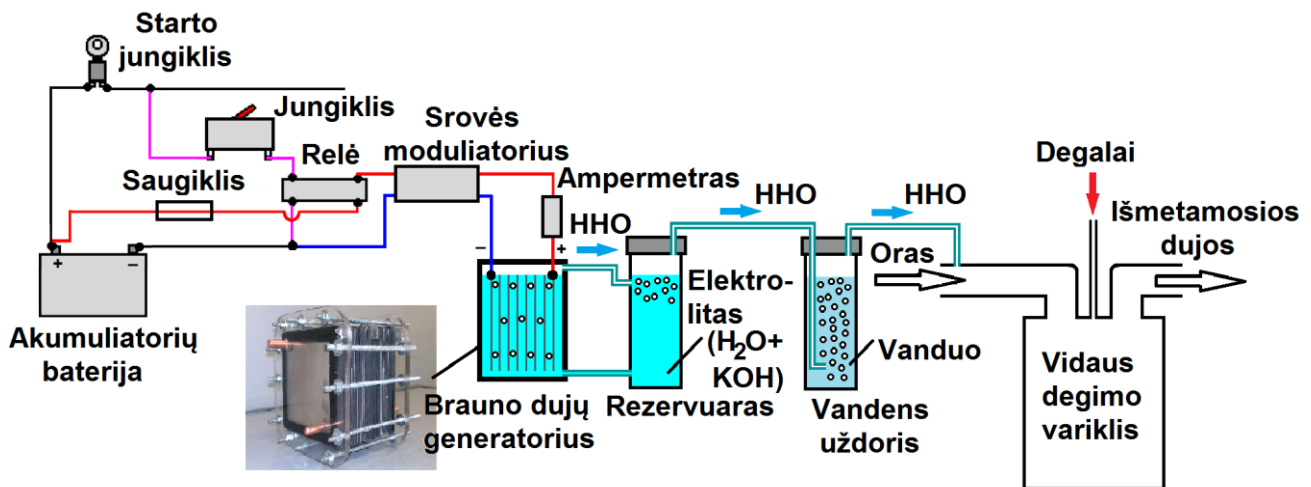


2 pav. HHO dujų sudėtis ir savybės
Šaltinis: Sudaryta autoriaus



3 pav. Elektrolizės elementų jungimo schemas: a – viena septynių elementų sekcija maitinama 14 V įtampa; b – penkios nuosekliai sujungtos sekcijos kurių kiekviena lygiagrečiai maitinama 14 V įtampa; c – penkios nuosekliai sujungtos sekcijos maitinamos 70 V įtampa
Šaltinis: Sudaryta autoriaus

Elektros energija elektrolizei imama iš automobilio akumuliatoriaus (4 pav.), kurį, veikiant varikliui, krauna automobilio generatorius. Elektros grandinė, kuria į HHO dujų generatorių tiekiami srovė, įjungiami rele. Ši relė, išjungus vidus degimo variklį, atjungia srovės tiekimą į dujų generatorių. Grandinėje sumontuotas ampermetras rodo srovės stiprį. HHO dujos iš elektrolizės įrenginio žarnele pirmiausia patenka į elektrolito indą kur lieka kartu su HHO dujomis tekantys elektrolito pūslai. Toliau HHO dujos žarnele teka į vandens uždorį, kuris įrenginį apsaugo nuo galimo atbulinio liepsnos pliūpsnio. Iš liepsnos uždorio HHO dujos teka į variklio įsiurbimo kolektorių.



4 pav. HHO dujų gamybos sistema automobilyje
Šaltinis: Sudaryta autoriaus

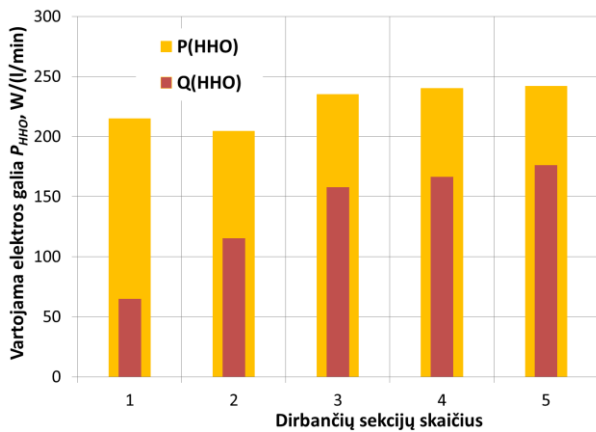
Elektrolizės įrenginyje dalis elektros energijos virsta į šilumą ir apsaugai nuo perkaitimo tarp elektrolito rezervuaro ir HHO dujų generatoriaus gali būti įrengtas aušintuvas bei elektrolito cirkuliaciją užtikrinantis siurblys.

Elektrolizei naudojamos srovės galios ir gaminamų HHO dujų kiekio reguliavimas ir gali būti atliekamas:

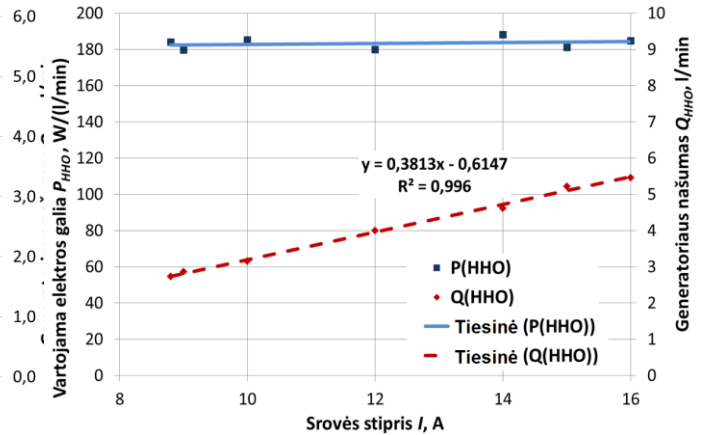
1. Moduluojant elektros srovę.
2. Keičiant elektros srove maitinamų HHO dujų generatoriaus sekcijų kiekį.

Naudojant automobilio elektros tinklo įtampą ir keičiant naudojamų dujų generatoriaus sekcijų kiekį kinta generatoriaus vartojamos energijos kiekis ir gaminamų dujų kiekis. 5 paveiksle matome, kad galios poreikis 1 l dujų pagaminti nėra pastovus. Mažiausios lyginamosios galios sąnaudos (204 W/(l/min))

užfiksuotos veikiančiomis dviem generatoriaus sekcijoms ir gaminant $Q_{HHO} = 2,3$ l/min HHO dujų. Šiame režime dujų generatoriui tiekama $U = 12,75$ V įtampa ir $I = 37$ A stiprio elektros srovė.



5 pav. HHO generatoriaus energijos suvartojimo ir našumo priklausomybė nuo sekcijų skaičiaus
Šaltinis: Sudaryta autoriaus



6 pav. HHO generatoriaus energijos suvartojimo P_{HHO} ir našumo Q_{HHO} priklausomybė nuo srovės stiprio I
Šaltinis: Sudaryta autoriaus

HHO dujų generatoriaus penkias sekcijas prijungtus prie 70 V papildomo įtampos šaltinio (3 c pav.) nustatyta, kad lyginamosios galios sąnaudos sumažėja iki 183 W/(l/min). Generuojamų dujų kiekį galima nustatyti pagal tiesinę priklausomybę (6 pav.):

$$Q_{HHO} = 0,3813 \cdot I - 0,6147. \quad (1)$$

HHO dujų gamybai gali būti panaudojama elektros energija išgaunama rekuperuojant stabdymo energiją į elektros srovę, panaudojant ant automobilio išdėstytus saulės elementus ir kitus alternatyviuosius energijos generavimo būdus. Šią energiją galima kaupti nustatytos įtampos akumuliatorių baterijoje ir reikiamą kiekį tiekti į HHO dujų generatorių.

HHO dujų generatoriaus naudingumo koeficientas:

$$\eta_{HHO} = \frac{E_{H_2}}{E_{el.}}, \quad (2)$$

čia $E_{el.}$ – litrai HHO dujų pagaminti sunaudotas elektros energijos kiekis, J:

$$E_{el.} = \frac{U \cdot I \cdot t}{Q_{HHO}} = \frac{12,75 \cdot 37 \cdot 60}{2,3} = 12306 \text{ J}, \quad (3)$$

čia U – elektros įtampa kurią naudoja elektrolizės įrenginys, V; I – vartojamas elektros srovės stipris, A; t – elektrolizės įrenginio veikimo laikas, s; Q_{HHO} – per laiką t pagamintas HHO dujų kiekis, l. E_{H_2} – šiluminės energijos kiekis, kurį degdamas gali išskirti 1 litre HHO dujų esantis vandenilis, J:

$$E_{H_2} = H_{z,H_2} \cdot m_{H_2/l} = 120000000 \cdot 0,00006 = 7200 \text{ J}, \quad (4)$$

čia H_{z,H_2} – vandenilio žemutinis šilumingumas, J/kg; $m_{H_2/l}$ – vandenilio masė 1 l HHO dujų. $\eta_{HHO} \approx 0,6$. Likusi elektros energijos dalis HHO dujų generatoriuje pavirsta į šilumą.

Vidaus degimo variklio efektyvusis naudingumo koeficientas $\eta_e \approx 0,3$ ir tai reiškia, kad, variklyje sudegus vandeniliui, apie 30 % H_2 šiluminės energijos pavirsta į variklio efektyviają energiją. Bendras teoriškai nustatytas HHO dujų gamybos ir panaudojimo (būvio ciklo) efektyvusis naudingumo koeficientas

siekia $\eta_{e_HHO} = \eta_{HHO} \cdot \eta_e \approx 0,18$. Realus HHO dujų panaudojimo efektyvumas gali būti nustatomas eksperimentiškai ir teoriškai įvertinus vandenilio įtaką darbinio mišinio degimo procesui variklyje.

Išvados

1. Panaudojant pagamintą HHO dujų generatorių nustatyta, kad lyginamosios energijos sąnaudos dujų gamybai vandens elektrolizės būdu, naudojant apie 13 V įtampą vienai sekcijai ir keičiant generatoriaus sekcijų skaičių, svyruoja nuo 204 W/(l/min) iki 240 W/(l/min). Naudojant 5 generatoriaus sekcijas į kurias tiekama 70 V įtampa, energijos sąnaudos HHO dujų gamybai sumažėjo iki ≈ 183 W/(l/min).

2. Įvertinus vandenilio ir deguonies dujų mišinio gamybos ir panaudojimo VDV efektyvumą apskaičiuota, kad HHO dujų būvio ciklo energetinis efektyvumas vidaus degimo variklyje gali siekti tik ≈ 18 %.

3. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad naudojant HHO dujas kibirkštinio uždegimo varikliuose, esant paliesintam mišiniui, sumažina CO, CH bei CO₂ koncentraciją išmetamosiose dujose, tačiau padidina NO_x emisiją. Tai lemia didesnis degimo efektyvumas ir aukštesnė temperatūra bei nežymiai sumažėjusios degalų sąnaudos.

4. Slėginio uždegimo varikliuose, papildomai tiekiant HHO dujas, tikėtina, kad, dėl didelio reakcingumo, HHO dujose esantis vandenilis dega suslėgimo pabaigoje. Išankstinis HHO dujose esančių aktyvių vandenilio radikalų užsiliepsnojimas mažina variklio energetinį efektyvumą ir daro įtaką variklio ekologiniams rodikliams: mažina nepilno degimo produktų (CH, CO) emisijas bei dūmingumą tačiau didina CO₂ ir NO_x emisijas.

Literatūra

1. Al-Rousan, A.A. 2010. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 12930–12935.
2. Bari, S.; Esmaeil, M.M. 2010. Effect of H₂/O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine, *Fuel* 89: 378–383.
3. Brown, Y. 1978. US patent number 4,014,777 issued on March 29, 1977, and US patent number 4,081,656 issued on March 28, 1978.
4. Eisenberg, D.; Kauzmann, W. 1969. *The structure and properties of water*. Oxford: Oxford University Press.
5. Europos Komisija. *Baltoji knyga*. 2011. Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas. Briuselis: 28–31.
6. Gupta R.B. 2009. *Hydrogen fuel: production, transport, and storage*. Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4200-4575-8. 601 p.
7. Yilmaz, A.C.; Uludamar, E.; Aydin, K. 2010. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 11366–11372.
8. Karagoz, Y.; Yuca, N.; Sandalci, T.; Dalkilic, C.A. 2015. Effect of hydrogen and oxygen addition as a mixture on emissions and performance characteristics of a gasoline engine, *International Journal of Hydrogen Energy* 40: 8750–8760.
9. Kuware, R. S.; Kolhe, A.V. 2016. Effect of Hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in spark ignition (SI) engine – a review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 5 (10): 17913–17920.
10. Marban, G.; Valdes-Solis, T. 2007. Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 1625–1637.
11. Musmar, S.A.; Al-Rousan, A.A. 2011. Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines, *Fuel* 90: 3066–3070.
12. Plambeck, J.A. 1982. *Electro analytical chemistry, principles and applications*. 2nd ed., New York: Wiley. 404 p.
13. Rimkus, A. 2013. *Vidaus degimo variklio darbo efektyvumo didinimas panaudojant Brauno dujas*. Vilnius: Technika, 2013 156 p.
14. Srinivasan, S.; Salzano, F.J. 1977. Prospects for hydrogen production by water electrolysis to be competitive with conventional methods, *International Journal of Hydrogen Energy* 2: 53–59.
15. Surygala, J. 2008. *Wodorod joko paliwo*. [Hydrogen as a fuel]. Warszawa: Wydawnictwa naukowo-techniczne. 177 p.
16. Wang, H.K.; Cheng, C.Y.; Chen, K.S.; Lin, Y.C.; Chen C.B. 2012. Effect of regulated harmful matters from a heavy-duty diesel engine by H₂/O₂ addition to the combustion chamber, *Fuel* 93: 524–527.
17. Wang, S.; Ji, C.; Zhang, J.; Zhang, B. 2011. Improving the performance of a gasoline engine with the addition of hydrogen-oxygen mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 11164–11173.
18. Whiete, C.M.; Steeper, R.R.; Lutz, A.E. 2006. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review, *International Journal of Hydrogen Energy* 31:1292–1305.

THE EVALUATION OF THE HHO (H₂/O₂) GAS UTILIZATION'S EFFECTIVENESS IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Summary

This article reviews the possibilities and perspectives of using hydrogen as a fuel for the internal combustion engine (ICE). The results of various researchers who investigated ICE energy and ecological indicators by adding HHO gas to the engine were summarised. The energy consumption which is required for the production of HHO gas via the process of electrolysis was determined through experiment, and the energy efficiency for the use of these gas in the internal combustion engine was calculated. The physico-chemical properties of the hydrogen contained in HHO gas and the efficiency of these gas production were evaluated and the positive and negative effects of HHO gas on the indicators of compression and spark ignition engines were explained.

Key words. HHO gas, internal combustion engine, energy efficiency, ecological efficiency.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Alfredas Rimkus

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, docentas

Darbo vietą ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Automobilių inžinerijos katedros docentas

Autoriaus mokslinių interesų sritys: Vidaus degimo varikliai, transporto ekologija, alternatyvioji energetika

Telefonas ir el. pašto adresas: alfredas.rimkus@vgtu.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Alfredas Rimkus

Science degree and name: doctor, associated professor

Workplace and position: Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering faculty Automobile Engineering department associated professor

Author's research interests: nternal combustion engines, transport ecology, alternative energy

Telephone and e-mail address: alfredas.rimkus@vgtu.lt