

HCCI DEGIMO PROCESO, NAUDOJANT BIOETANOLĮ, EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HCCI COMBUSTION PROCESS WHEN USING BIOETHANOL

Kastytis Laurinaitis, Stasys Slavinskas

Aleksandro Stulginskio Universitetas, Studentų g. 11,
LT-53361 Akademija, Kauno r.

El. paštas: kastytis.laurinaitis@asu.lt; stasys.slavinskas@asu.lt

Gauta 2013-03-21, pateikta spaudai 2013-09-02

Degiojo mišinio paruošimo būdas ir pats degimo procesas stipriai įtakoja vidaus degimo variklių deginių emisijos rodiklius. Geresnis energijos panaudojimas ir mažesnės azoto oksidų bei kietųjų dalelių emisijos, gaunamos varikliuose, kuriose degusis mišinys užsidega nuo suspaudimo takto metu kylančios temperatūros. Tačiau šis degimo procesas skiriasi nuo dyzelinio variklio darbo, nes degusis mišinys ruošiamas už cilindro ribų. HCCI procesas sunkiai valdomas keičiantis variklio sūkiams ir apkrovai. Straipsnyje pateikiami homogeninių bioetanolio ir oro mišinių degimo proceso eksperimentinių tyrimų rezultatai. Tyrimai atlikti, keičiant įsiurbiamo oro temperatūrą, degiojo mišinio sudėtį ir recirkuliuojančių deginių kieki.

Atliekant tyrimus nustatyta, kad į variklį tiekiant 100 °C bioetanolio – oro mišinį, užsiliepsnojimas greičiausia prasidėdavo, kai buvo tiekiamas $\lambda = 1,9$ riebumo mišinys. O riebesni ir liesesni mišiniai užsiliepsnodavo vėliau. Įsiurbiamo oro temperatūrą padidinus iki 120 °C, stabilaus užsidegimo ribos išsiplėtė iki $\lambda = 2,18 - 4,28$ ribos.

Tiekiamo mišinio temperatūra įtakoja šilumos išsiskyrimo greitį bei maksimalų slėgį cilindre. Kai tiekiamo mišinio temperatūra buvo 100 ir 120 °C, maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis siekė 107,3 ir 201 kJ/(m³·laips), o maksimalus slėgis cilindre buvo lygus atitinkamai 53,3 ir 60,9 bar.

Dėl žemų HCCI proceso temperatūrų gaunama nedidelė azoto oksidų emisija. NO_x emisija, daugelyje matavimo taškų buvo ne didesnė nei 10 ppm. Tačiau riebiausių mišinių zonoje siekė 74 ppm. Žemos degimo temperatūros CO ir CH koncentracijas padidina. Mažiausios CO ir CH emisijos reikšmės siekė 512 ir 660 ppm. Optinis deginių skaidrumas neviršijo 3,5 %.

HCCI, bioetanolis, homogeninis degalų – oro mišinys, emisija, įsiurbiamo oro temperatūra, oro pertekliaus koeficientas.

Įvadas

Aplinkos tarša vidaus degimo variklių deginiais kontroliuojama aplinkos apsaugos institucijų. Įvedamos deginių emisijos normos, kurios tam tikrais laiko

etapais tampa vis griežtesnės. O konstruoti ir gaminti tradicinius vidaus degimo variklius, kurie atitiktų šių normų reikalavimams, darosi vis sudėtingiau. Žinomi deginių emisijos mažinimo būdai ir metodai su filtrais, deginių recirkuliacija, katalizatoriais ir kitomis sistemomis jau pasiekė savo galimybių ribas. Todėl šiandien mokslininkai daug dėmesio skiria seniai žinomo homogeninio degalų ir oro mišinio degimo proceso - homogeninio degalų ir oro degiojo mišinio uždegimo suslėgimu (HCCI angl. Homogenous Charge Compression Ignition) – tyrimams. Šio cheminės oksidacijos proceso metu išsiskirianti šiluma panaudojama kaip ir tradiciniame VDV. Tačiau cheminės reakcijos vyksta žemoje iki 2000 K temperatūroje. Dėl žemos reakcijos temperatūros padidėja energijos panaudojimo efektyvumas, sumažėja azoto oksidų (NO_x) ir kietųjų dalelių emisija. Kaip degalai šiuose varikliuose gali būti naudojami benzinai, dyzelinai, gamtinės dujos, propanas, butanas, etanolis, metanolis ir kita. HCCI procesas labai jautrus tiekiamo oro temperatūrai ir degalų savybėms. Praktinis šio proceso taikymas sudėtingas dėl sunkiai valdomo užsiliepsnojimo momento, ypač kintant variklio sūkių dažniui ir apkrovai. To pasėkoje, padidėja CO ir CH emisijos. Sunku paleisti šaltą variklį.

Etanolis turi aukštą oktaninį skaičių ir pasižymi geromis antidetonacinėmis savybėmis bei aukšta išgarinimo šiluma (reikalingas didelis energijos kiekis, kad išgarinti). Gaunamos geros lieso etanolio ir oro mišinio degimo savybės. Tačiau etanolis turi mažą žemutinį šilumingumą bei mažą cetaninį skaičių. Dėl to netinkamas tradiciniame dyzeliniame variklyje [1].

Naudojant etanolį kaip degalus sumažėja CO_2 emisijos rodikliai. Tyrimais nustatyta, kad stabilus HCCI degimas su etanoliumi, buvo gautas, kai $\lambda = 2,0 - 5,0$ ir tiekiamo oro temperatūra ribose nuo 120 iki 150 °C. Kai oro temperatūra 120 °C ir oro pertekliaus koeficientas buvo $\lambda < 2$, degimas vyko su detonacija. Maksimalus indikatorinis naudingumo koeficientas 44,78 % buvo gautas esant oro temperatūrai 120 °C ir $\lambda = 2,5$ [1].

Atliekant bandymus, pastebima, kad šilumos išsiskyrimo greitis su metanoliumi ir etanoliumi yra didesnis nei su benzinu. Tai susiję su degalų savybėmis. Benzinai yra angliavandenilių mišinys, kurio virimo temperatūra išsisklaidžiusi plačiame diapazone. Todėl maksimalus šilumos išsiskyrimas vyksta anksčiau pagal alkūninio veleno posūkio kampą nei metanolio ir etanolio. Metanolis ir etanolis turi vieną virimo temperatūrą ir anglies molekulių yra mažiau nei benzine. Šioms etanolio ir metanolio anglies molekulėms yra paprasčiau jungtis į aldehidus, todėl maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis yra didesnis nei benzino [2].

Dar 1983 metais Najt ir Foster pademonstravo, kad galima pagal HCCI principą priversti dirbti keturtaktį variklį. Tam jie naudojo kintamo suspaudimo laipsnio variklį maitindami jį su izooktano ir n-heptano degalų oro mišiniu [3]. 1992 m. Stockinger paleido pagal HCCI principą dirbti serijinės gamybos 1,6 darbinio tūrio variklį naudodamas tiekiamo oro šildymą. Dar bandymai buvo atliekami su dvitaktiais ir keturtaktiais varikliais, naudojant tiek skystus tiek dujinius degalus [4].

Manoma, kad cheminių reakcijų kinetika labiausiai priklauso nuo vandenilio peroksido (H_2O_2) skaidymosi. Vandenilio peroksidas skaidosi į du OH radikalus, kurie labai aktyviai reaguoja su degalais ir išskiria energiją. Vandenilio peroksido

skaidymasis prasideda 1050–1100 K temperatūros ribose. Ši pagrindinė HCCI variklio degalų užsiliepsnojimo ir degimo reakcija yra identiška kibirkštinio variklio detonaciniam darbui. Naudojant aukšto oktaninio skaičiaus degalus, dalis šilumos išsiskiria prieš pagrindinį užsiliepsnojimo momentą prie 1050–1100 K. O su žemo oktaninio skaičiaus degalais (dyzelinu) šilumos išsiskyrimo pradžia jau pastebima ir esant 800 K. Šios pirminės išsiskyrusios šilumos neužtenka, kad prasidėtų degimas, tačiau jos pakanka, kad degalų ir oro mišinys greitai pasiektų 1050–1100 K temperatūrą, kurioje vyksta H_2O_2 skaidymasis ir pagrindinis degimas. Tai ir yra pagrindinė priežastis, kodėl HCCI procesas jautrus degalų tipui. Aktyvieji radikalai bei jų junginiai (H , OH , HO_2) deginiuose bei įsiurbimo kolektoriuje atlieka ne tokį jau svarbų vaidmenį HCCI degimo pradžiai [4].

Naudojant degalus, kurie turi aukštą oktaninį skaičių, proceso valdymas vykdomas įvedant priedus, kurie didina temperatūrą ar/ir gamina radikalus suspaudimo takto metu. Naudojant degalus su aukštu cetaniniu skaičiumi, įvedami slopinimo priedai, kurie mažina temperatūrą ar naikina radikalus suspaudimo takto metu. Atlikta nemažai bandymų, kai procesas, naudojant aukšto cetaninio skaičiaus degalus, kontroliuojamas įvedant kaip priedą lengvai užsiliepsnojančius degalus [5].

Vidutinė maksimalaus slėgio cilindre didėjimo greičio kitimo reikšmė, nepriklausomai nuo tiekiamo oro temperatūros, būna didžiausia esant riebiems mišiniams. Teigiama, kad detonacinis degimas prasideda, kai slėgio kitimo greitis siekia 5 MPa/ms. Tai atitinka 5,5 bar/alkūninio veleno posūkio kampo, kai variklis veikia 1500 min^{-1} greičiu. Tokiu atveju, išsibarstymas neviršija 6%, kai vidutinė maksimalaus slėgio kitimo reikšmė visuose režimuose lygi 5,5 bar/alkūn. vel. posūkio kampo. Apibendrinant galima teigti, kad nustatant viršutinę HCCI darbo ribą, geriau naudoti vidutinę skaitinę $(dP/d\theta)_{\max}$ reikšmę, nei parametrų išsibarstymą pagal $(dP/d\theta)_{\max}$ [6].

Tyrimų tikslas ir uždaviniai

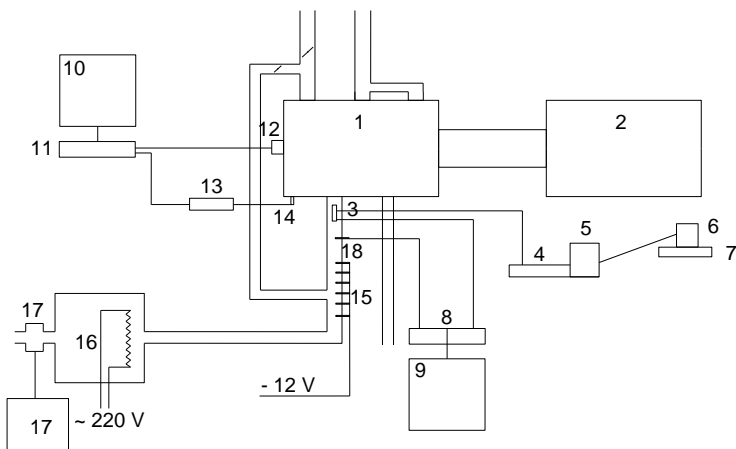
Darbo tikslas – ištirti variklio HCCI darbo proceso rodiklius, jam veikiant homogeniniais bioetanolio – oro mišiniais.

Tyrimų metodika

Tyrimams naudotas dyzelinis variklis D-243, kurio vienas cilindras buvo paruoštas dirbti pagal HCCI principą. Likę 3 cilindrai veikė tradiciniu dyzelinio variklio ciklu. Bandymų stendo schema pateikta 1 pav. Degusis mišinys buvo ruošiamas elektromagnetiniu purkštuvu purškiant bioetanolį į įsiurbimo kolektorių. Purkštuvą buvo valdomas NI cRIO 9022 sistema su cRIO 9114 platforma ir DRIVEN PFI Rev G modulių. Prieš atliekant bandymus, variklis buvo pašildomas iki darbinės temperatūros. Nustatoma apkrovos stendu apkrova 50 Nm ir variklio alkūninio veleno sūkliai.

Variklio indikavimas atliekamas matuojant slėgį pirmajame cilindre AVL pjezoelektriniu slėgio jutikliu GU24D (matavimo ribos 0–280 bar, tikslumas $\pm 0,1$ bar). Signalas stiprinamas MICROIFEM stiprintuvu. Alkūninio veleno posūkio kampas matuotas AVL enkoderiu 365C $\pm 0,1^\circ$ tikslumu. Visi signalai buvo suvedami į AVL IndiModul 622 indikavimo sistemą. Čia duomenys sinchronizuojami, apdorojami ir užrašomi AVL IndiCom Mobil programine įranga. Signalai užrašomi kas $0,1^\circ$ alkūninio veleno posūkio kampo.

Anglies viendeginio (CO) ir anglies dvideginio (CO₂), nesudegusių angliavandenilių (CH), azoto oksidų (NO ir NO₂) emisijų kiekiai išmatuoti dujų analizatoriumi Testo 350 XL.



1 pav. Bandymų stendo schema: 1 - dyzelinis variklis D-243; 2 – apkrovos stendas; 3 – elektromagnetinis purkštuvus; 4 – degalų akumuliatorius; 5 – degalų siurblys; 6 – indas degalams; 7 – elektroninės svarstyklės; 8 – NI cRIO 9022 sistema su cRIO 9114 platforma ir DRIVEN PFI Rev G; 9 – kompiuteris su LabView programine įranga; 10 – kompiuteris su AVL IndiCom Mobile programine įranga; 11 – indikavimo modulis AVL IndiModul 622; 12 – enkoderis AVL 365C; 13 – signalo stiprintuvus MICROIFEM; 14 –slėgio jutiklis; 15 – šildymo žvakės; 16 – oro šildytuvus; 17 – oro srauto matuoklis Sensyflow P14243; 18 – termopora

Fig. 1. Test system: 1 - Diesel engine D-243; 2 – Electrical AC stand dynamometer KS56-4; 3 – Electrical fuel injectors; 4 – Fuel accumulator; 5 – Fuel pump; 6 – Fuel tank; 7 – Electrical libra SK 1000; 8 – Controller NI cRIO 9022 with cRIO 9114 platform and DRIVEN PFI Rev G; 9 – PC with LabView program; 10 – PC with AVL IndiCom Mobile program; 11 – Measurement module AVL IndiModul 622; 12 – Encoder AVL 365C; 13 – Amplifier MICROIFEM; 14 – Pressure transducer AVL GU24D; 15 – Glow plug; 16 – 7,7 kW air heater; 17 – Air flow meter Sensyflow P14243; 18 – Thermocouple

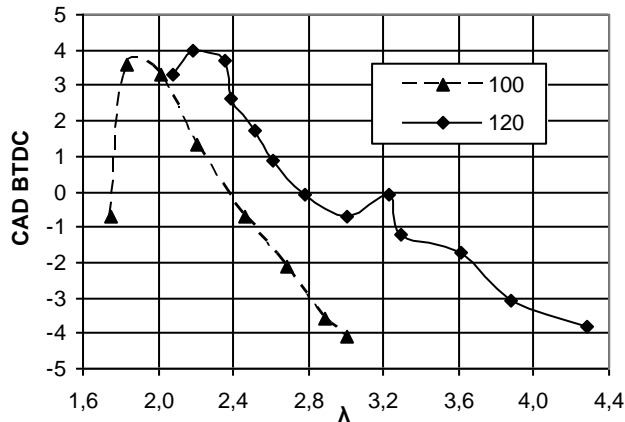
Deginių optinis skaidrumas D (%) matuotas firmos Bosch prietaisu RTT 100/RTT, kurio rodmenys pateikiami Hartridge vienetais nuo 0 iki 100 % skalėje $\pm 0,1$ % tikslumu.

Bandymo metu buvo tyrinėtos bioetanolio – oro homogeninių mišinių savaiminio užsiliepsnojimo savybės, slėgio cilindre susidarymas, deginių emisijos.

Tyrimų metu buvo keičiama įsiurbiamo oro temperatūrą bei tiekiamo bioetanolio kiekis. Degalų kiekis priklauso nuo purkštuko atidarymo trukmės. Tiekiamas oras šildomas oro pulsavimų slopinimo talpoje sumontuotu 7,7 kW galios elektriniu šildytuvu bei įsiurbimo kolektoriuje sumontuotomis šildymo žvakėmis. Šia oro šildymo sistema įsiurbiamo oro temperatūrą buvo galima keisti nuo 80 iki 160 °C.

Tyrimų rezultatai

Kaip matyti 2 pav., bioetanolio – oro mišinio savaiminio užsiliepsnojimo momentui turi įtakos tiekiamo oro temperatūra ir mišinio sudėtis. Esant 100 °C pradinei oro temperatūrai, greičiausiai užsiliepsnoja $\lambda = 1,9$ sudėties degusis mišinys. Mišiniui liesėjant ir riebějant, degimas prasideda vėliau. Kai $\lambda > 2,4$, mišinys užsiliepsnoja stūmokliui esant VGT. Toliau liesinant mišinį, degimas prasideda išsiplėtimo takto pradžioje, t.y. už VGT. Į variklį tiekiant riebesnį už $\lambda = 1,74$ bioetanolio-oro mišinį, buvo pastebimas detonacinis degimas. Tiekiamo oro temperatūrą padidinus 20 laipsnių, stabilus degimas pasistūmėjo liesesnių mišinių link. Anksčiausiai (4 laipsniai iki VGT) nagrinėjamu atveju užsiliepsnodavo $\lambda = 2,2$ sudėties bioetanolio – oro mišiniai, o stūmokliui esant VGT, – $\lambda = 2,8$ sudėties mišinys. Tačiau esant aukštesnei tiekiamo oro temperatūrai, detonacinis degimas buvo pastebimas naudojant liesesnius mišinius – $\lambda < 2,1$.

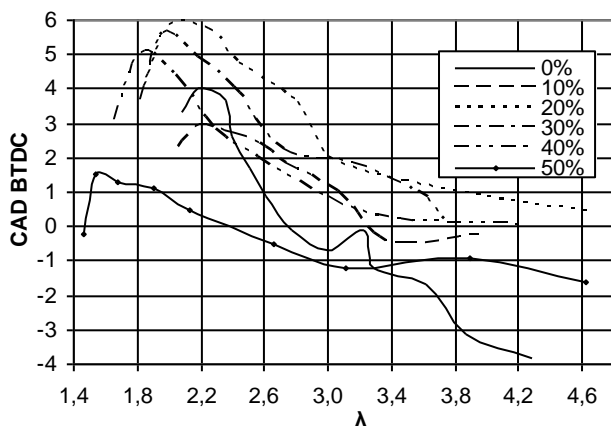


2 pav. Bioetanolio užsiliepsnojimo pradžios momentų priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento

Fig. 2. Dependencies of the start of bioethanol autoignition with regard to TDC on air fuel equivalence ratio

Užsiliepsnojimo pradžią galima valdyti naudojant deginių recirkuliaciją (DR). Gražinamą į įsiurbimą deginių kiekį didinant iki 20 %, bioetanolio-oro degiojo mišinio užsiliepsnojimo momentas ankstėjo (3 pav.). Deginių recirkuliaciją padidinus iki 30 %, užsiliepsnojimas pradėjo vėlėti, tačiau mišinys dar vis užsi-

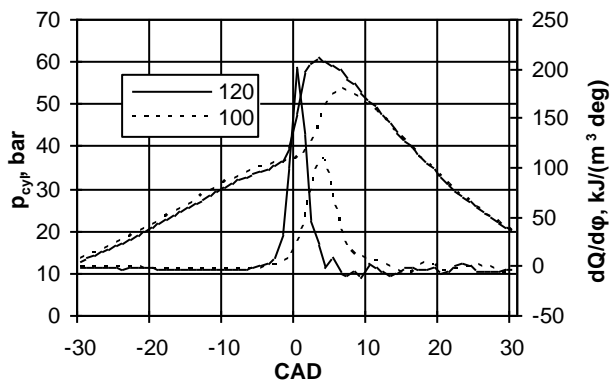
liepsnodavo anksčiau, nei nenaudojant deginių recirkuliacijos. Tolesnis deginių recirkuliacijos didinimas iki 40 % ir 50 %, toliau vėlino užsiliepsnojimo momentą. Pvz., kai $\lambda = 3,0$ ir DR lygi 0 %, mišinys užsiliepsnodavo 0,7 alkūninio veleno posūkio kampo laipsnio už VGT. Esant tam pačiam oro pertekliaus koeficientui ir 10 % DR, degimas prasideda 1 laipsnis iki VGT, 20 % DR – 2 laipsniai iki VGT, 30 % DR – 1,9 laipsnio iki VGT, 40 % DR - 0,8 laipsnio iki VGT, 50 % DR – 1 laipsnis už VGT.



3 pav. Deginių recirkuliacijos įtaka užsiliepsnojimo pradžiai
Fig. 3. The EGR influence on the start of autoignition

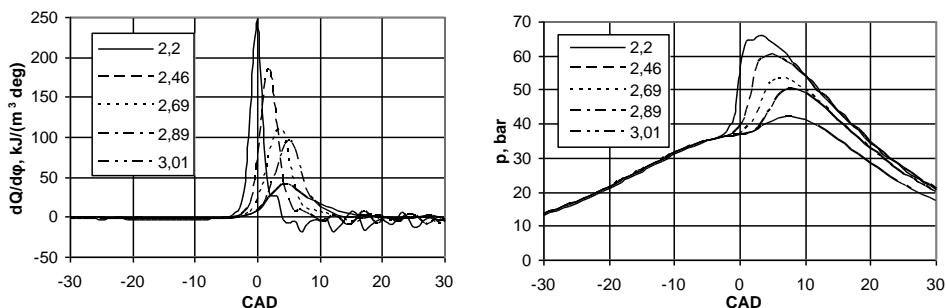
Didėjant deginių recirkuliacijai, detonacinio degimo pradžia persistumia riebesnių mišinių link. Tiekiant 120 °C temperatūros orą ir nenaudojant deginių recirkuliacijos, detonacinis degimas prasidėdavo, kai mišinys buvo riebesnis už $\lambda = 2,1$. Gražinant į įsiurbimą 30 % deginių, detonacinio degimo riba išsiplėtė iki $\lambda = 1,8$, o DR padidinus iki 50 %, net iki $\lambda = 1,5$.

Tiekiamo homogeninio bioetanolio – oro mišinio temperatūra turi įtakos ir šilumos išsiskyrimo greičiui bei dujų slėgiui cilindre.



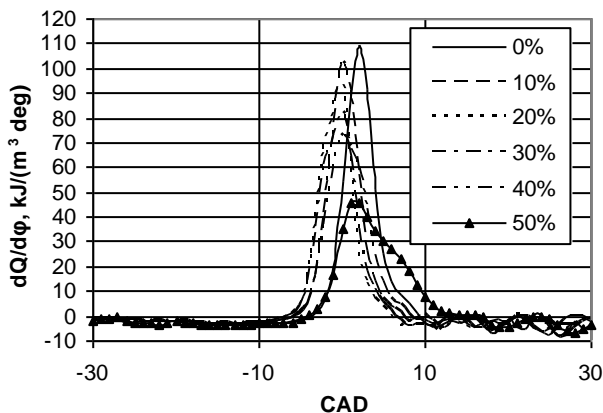
4 pav. Šilumos išsiskyrimo greičio ir slėgio cilindre kitimo kreivės
Fig. 4. Heat release and cylinder pressure curves versus crank angle

Esant tokiam pat pertekliaus koeficientui, aukštesnė pradinė mišinio temperatūra prieš suspaudimą, lemia didesnę šilumos išsiskyrimo greitį ir tuo pačiu didesnę maksimalų slėgį cilindre (4 pav.). Homogeninio bioetanolio – oro mišinio temperatūrai esat 100 ir 120 °C, šilumos išsiskyrimo greitis buvo lygus atitinkamai 107,3 ir 201 kJ/(m³ laips). Maksimalus slėgis cilindre buvo lygus atitinkamai 53,3 ir 60,9 bar. Be to, esant aukštesnei mišinio temperatūrai, užsiliepsnojimas prasideda anksčiau, todėl šilumos išsiskyrimo greitis ir slėgis cilindre maksimalias reikšmes pasiekia anksčiau. Tiekiamo mišinio temperatūrą padidinus nuo 100 °C iki 120 °C, šilumos išsiskyrimo greitis maksimalią reikšmę pasiekė 4, o dujų slėgis cilindre 3 alkūninio veleno posūkio kampo laipsniais anksčiau.



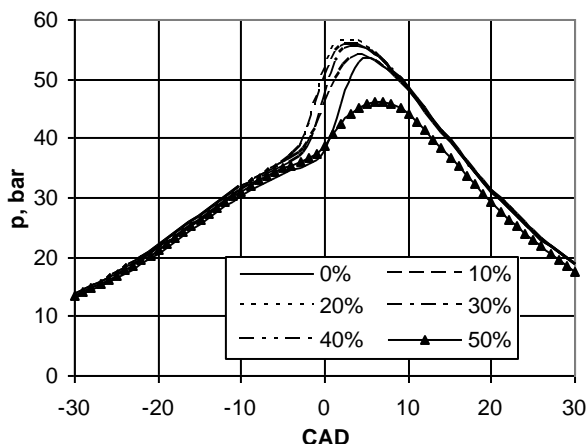
5 pav. Šilumos išsiskyrimo greičio ir slėgio cilindre kitimo kreivės
Fig. 5. Heat release rate and cylinder pressure curves versus crank angle

Keičiant bioetanolio kiekį mišinyje (keičiant oro pertekliaus koeficientą), kinta ir maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis bei dujų slėgis cilindre. Liesėjant mišiniams, mažėja maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis ir tuo pačiu maksimalus slėgis cilindre. Keičiasi ir šių pikų susidarymo padėtis alkūninio veleno posūkio kampo atžvilgiu. Liesėjant mišiniams, minėtų dydžių maksimalios vertės pasiekiamos vėliau (5 pav).



6 pav. Šilumos išsiskyrimo greičio priklausomybė nuo deginių recirkuliacijos
Fig. 6. The influence of EGR on the heat release rate

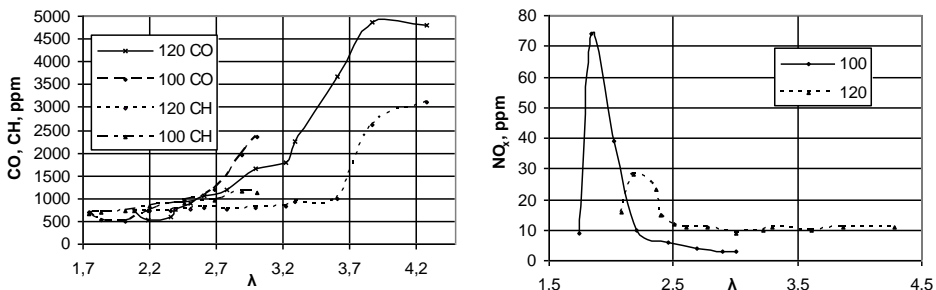
6 pav. pateikta deginių recirkuliacijos įtaka šilumos išsiskyrimo greičiui. Didėjant grąžinamų į įsiurbimą deginių kiekiui, šilumos išsiskyrimo greitis mažėja. Į įsiurbimą grąžinant 10 % deginių, maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis sumažėjo 9 %. Deginių recirkuliaciją padidinus iki 30 %, maksimalus šilumos išsiskyrimo greitis sumažėjo 27 %, o DR padidinimas iki 50 % maksimalų šilumos išsiskyrimo greitį sumažino net 59 %. Be to, nagrinėjama atvejais šilumos išsiskyrimo greitis maksimalią reikšmę pasiekdavo anksčiau.



7 pav. Slėgio cilindre kitimo priklausomybė nuo deginių recirkuliacijos
Fig. 7. The influence of EGR on the cylinder gas pressure

Didžiausias dujų slėgis cilindre, esant tai pačiai mišinio sudėčiai, gautas kai deginių recirkuliacija buvo lygi 20–30 % (7 pav.). Slėgio maksimumo padėtis kito nežymiai.

Įsiurbiamo oro temperatūros ir degiojo mišinio sudėties įtaka azoto oksidų (NO_x), anglies monoksido (CO) ir nevisiškai sudegusių angliavandenilių (CH) emisijai, varikliui veikiant bioetanolio - oro mišiniu, pateikta 8 pav. Azoto oksidų susidarymas yra jautrus temperatūros kitimui ciklo metu. Pagal Zeldovičiaus mechanizmą, aukštesnėje kaip 1800 K temperatūroje NO_x formavimosi greitis staigiai didėja, didėjant temperatūrai. Šių bandymų metu azoto oksidų emisijos daugelyje taškų svyravo apie 10 ppm. Tik kai bioetanolio – oro mišinys buvo riebiausias, gautos didesnės emisijos reikšmės: 28 ir 74 ppm, esant atitinkamai 120 °C ir 100 °C mišinio temperatūroms. Tačiau reikia paminėti, kad šiuose matavimo taškuose pasireiškė detonacinis variklio darbas, kas sąlygojo aukštesnes degimo temperatūras. Kadangi HCCI procesui būdinga žema degimo temperatūra, azoto oksidų emisija kituose matavimo taškuose buvo nedidelė.



8 pav. CO, CH ir NO_x emisijų priklausomybė nuo oro pertekliaus koeficiento
Fig. 8. Dependencies of the CO, HC and the HO_x emitted on air-to-fuel equivalence ratio

Tačiau dėl žemesnės degimo temperatūros gaunamos didesnės CO ir CH emisijos (8 pav.). Kai įsiurbiamo bioetanolio – oro mišinio temperatūra buvo lygi 120 °C, CO emisija, didėjant oro pertekliaus koeficientui, didėjo. Tai paaiškinama tuo, kad degant liesnesiam mišiniui, išsiskiria mažesnis šilumos kiekis. Šios šilumos nepakanka, kad CO galutinai oksiduotųsi iki CO₂. CH emisija kito analogiškai. Tiekiamo mišinio temperatūros įtaka CO ir HC emisijoms nėra reikšminga. Tačiau aukštesnės mišinio temperatūros leidžia dirbti su liesnesniais mišiniais. Reikia pažymėti, kad CO ir CH koncentracijos, priešingai nei NO_x, buvo didelės. Minimali CO koncentracija buvo lygi – 512 ppm, o CH koncentracija – 660 ppm.

Deginių recirkuliacijos ženklėnė įtaka deginių emisijai pastebėta ją padidinus iki 50 %. Šiuo atveju CO ir HC kiekis deginiuose didėjo, o NO_x mažėjo.

Išmatuotas deginių optinis skaidrumas visuose tirtuose režimuose neviršijo 3,5 %.

Išvados

1. Į variklį tiekiant 120 °C bioetanolio – oro mišinius, jie užsiliepsnoja nuo 4° iki VGT iki 3,8° už VGT, kai λ kinta 2,18–4,28 ribose. Tiekiamo mišinio temperatūrą sumažinus iki 100 °C, užsiliepsnojimo zona susiaurėja iki $\lambda = 1,74 – 3,01$.

2. Taikant deginių recirkuliaciją, HCCI režimo ribas galima išplėsti riebesnių mišinių link.

3. Varikliui veikiant HCCI režimu bioetanolio – oro mišiniu, NO_x emisija neviršijo 74 ppm, deginių dūmingumas buvo mažesnis už 3,5 %.

4. Minimali CO ir CH emisija, varikliui veikiant HCCI režimu bioetanolio – oro mišiniu, viršijo 512 ir 660 ppm.

Literatūra

1. Maurya R. K., Agarwal A. K. Experimental study of combustion and emission characteristics of ethanol fuelled port injected homogeneous charge compression ignition (HCCI) combustion engine. Applied Energy 88. 2011. p. 1169–1180.

2. Zhang C., Pan J., Tong J., Li J. Effects of Intake Temperature and Excessive Air Coefficient on Combustion Characteristics and Emissions of HCCI Combustion. *Procedia Environmental Sciences* 11. 2011. p. 1119–1127.

3. Najt, P. M. and Foster, D. E., "Compression-Ignited Homogeneous Charge Combustion," SAE paper 830264, 1983.

4. Homogeneous charge compression ignition (HCCI) technology. A report to the U.S. Congress. 2001. p. 48.

5. Xingcai L., Libin J., Yuchun H., Linlin Z., Zhen H. Inhibition effect of doping methyl tert-butyl ether compounds to n-heptane on homogenous charge compression ignition combustion. *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 1705–1714.

6. Maurya R. K., Agarwal A. K. Experimental investigation on the effect of intake air temperature and air–fuel ratio on cycle-to-cycle variations of HCCI combustion and performance parameters. *Applied Energy* 88 (2011) 1153–1163.

Каститис Лауринайтис, Стасис Славинскас

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СГОРАНИЯ БИОЭТАНОЛЯ В HCCI ДВИГАТЕЛЯХ

Резюме

Эмиссия отработавших газов в двигателях внутреннего сгорания зависит от способа смесеобразования и самого процесса сгорания. Низкие эмиссии оксидов азота и твердых частиц получаются, когда однородная смесь воспламеняется от возрастающей температуры во время сжатия. Но управлять процессом воспламенения, особенно при переменной нагрузке и переменных оборотах двигателя, становится очень трудно. В статье представлены результаты экспериментальных исследований воспламенения однородных биоэтанольных-воздушных смесей: влияние температуры всасываемого воздуха и состава смеси на момент самовоспламенения и эмиссию отработавших газов.

При нагреве воздуха на впуске до 100 °С, горючая смесь с биоэтанолом воспламенялась быстрее всего при $\lambda = 1,9$. Когда коэффициент избытка воздуха выше или ниже, воспламенение становится позднее. При коэффициенте $\lambda > 2,4$ воспламенение происходит на ВМТ. Повышение температуры воздуха до 120 °С расширило границы стабильного воспламенения до $\lambda = 4,28$.

Скорость извлечение тепла и давление в цилиндре тоже зависит от температуры. Максимальная скорость извлечения тепла при температурах 100 и 120 °С достигает 107,3 и 201 кДж/(м³ град). А давление в цилиндре 53,3 и 60,9 бар.

При стабильном воспламенении эмиссия NO_x не превышала 74 ppm. Но низкая температура противоположно влияет на эмиссии СО и СН. Эмиссии СО и СН были вольше чем 512 и 660 ppm относительно. Дымность отработавших газов не превышает 3,5 %.

HCCI, биоэтанол, однородная смесь, эмиссия, температура всасываемого воздуха, коэффициент избытка воздуха.

Kastytis Laurinaitis, Stasys Slavinskas

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HCCI COMBUSTION PROCESS WHEN USING BIOETHANOL

Abstract

HCCI combustion has the potential to be highly efficient and to produce low emissions. HCCI engines can have efficiencies as high as compression-ignition, direct-injection engines, while producing ultra-low oxides of nitrogen and particulate matter emissions. But this process is difficult to keep under control by changing engine load and speed. The effects of intake air temperature and mixture concentration on HCCI combustion characteristics and emissions were analyzed in this paper.

The bioethanol – air mixtures start burning probably when air temperature is 100 °C and $\lambda = 1.9$. When air-fuel ratio is more or less than 1.9, the start of combustion occurs later. At $\lambda = 2.4$, the start of combustion takes place at TDC. When operating at $\lambda > 1.74$, the knocking burning was observed.

The higher temperature of the combustible mixture before compression stroke gives higher heat release rate and cylinder pressure data. At the temperature of 100 and 120 °C the heat release rate was 107,3 and 201,0 kJ/(m³ deg). The cylinder pressure was equal to 53,3 and 60,9 bar.

At low combustion temperature NO_x emissions are not high. When oxidation reaction is stable, NO_x emission at many measurement points was not higher than 10 ppm. But at higher relative air/fuel ratio the NO_x emission increased to 74 ppm. The reason of this result was the knocking combustion. The low temperature reaction increases the CO and CH emissions. The minimum of CO and HC emissions was 512 and 660 ppm. Smoke opacity was < 3,5 %.

HCCI, bioethanol, homogeneous fuel – air mixture, emission, air temperature, relative air/fuel ratio.