

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Alfredas RIMKUS

**IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF
OPERATION OF AN INTERNAL
COMBUSTION ENGINE BY USING
BROWN'S GAS**

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

**TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)**



LEIDYKLA
Vilnius **TECHNIKA** 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Saugirdas PUKALSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Transport Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T).

Members:

Prof Dr Artūras JUKNA (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P),

Prof Dr Habil Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėda University, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T),

Prof Dr Habil Gintautas MILIAUSKAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Energetics and Power Engineering – 06T),

Assoc Prof Dr Stasys SLAVINSKAS (Aleksandras Stulginskis University, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T).

Opponents:

Prof Dr Gvidonas LABECKAS (Aleksandras Stulginskis University, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T),

Dr Laurencas RASLAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Transport Engineering – 03T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 1 p. m. on 31 January 2014.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 30 December 2013. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Alfredas Rimkus, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Alfredas RIMKUS

**VIDAUS DEGIMO VARIKLIO DARBO
EFEKTYVUMO DIDINIMAS
PANAUDOJANT BRAUNO DUJAS**

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

**TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)**



Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Saugirdas PUKALSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

prof. dr. Artūras JUKNA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėdos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T),

prof. habil. dr. Gintautas MILIAUSKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, energetika ir termoinžinerija – 06T),

doc. dr. Stasys SLAVINSKAS (Aleksandro Stulginskio universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T).

Oponentai:

prof. dr. Gvidonas LABECKAS (Aleksandro Stulginskio universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T),

dr. Laurencas RASLAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – 03T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2014 m. sausio 31 d. 13 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2013 m. gruodžio 30 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 2225-M mokslo literatūros knyga.

© Alfredas Rimkus, 2013

Introduction

Topicality of the problem. The principal source of nowadays transport fuels is oil. At present, its resource amounts up to 500 billion barrels, i.e. from 14% to 16% of ever prospected oilfields. Annual oil consumption is about 30 billion barrels (researches were made by S. Lee and R. Curley). This circumstance causes looking for new alternative sources of fuel. In future, hydrogen-based energy is highly promising. Hydrogen producing of water by electrolysis is believable to become the most applicable branch of hydrogen-based energy sector because of availability of unlimited sources of raw materials and unsophisticated technology of production. The mixture of combustible hydrogen and oxygen gas produced on water electrolysis was called Brown's gas by the name of scientist Yull Brown involved in its research. The said mixture is denoted HHO. Hydrogen effectively accumulates and transfers energy and its combustion product is non-polluting water vapor. Hydrogen is an active chemical element in an internal combustion engine (ICE) as well: while being combusted with other fuels, it improves their combustion, thus improving the environmental and energy performance indicators of the engine (researches were made by T. D. Andrea, A. Yilmaz, V. Knop, D. C. Rakopoulos, S. Wang, C. M. Whiete et al.).

Hydrogen-based energy conforms to the provisions of EU White Book "The Plan of Formation of Joint European Transport Space. Development of a Competitive Transport System Based on Effective Use of Resources". Increased use of hydrogen-based energy sources is encouraged by „Europe 2020“ programme where the landmarks for using alternative fuels are provided (EU White Book; Europe 2020). Investments in hydrogen using in transport, industry and energy sectors are planned in EU research and innovation programme „Horizon 2020“. In course of implementation of the said programmes, all known sources of hydrogen energy should be used upon their adaptation to the transport sector.

Hydrogen accumulation and transporting in a vehicle requires sophisticated, costly and heavy-weighing equipment. It causes an increase of the price, the weight and the operation costs of the vehicle. Hydrogen may be produced in a driven vehicle; it is possible to store the minimum quantities of it and to supply this gas to the cylinders of the engine together with other fuels. The simplest method of hydrogen production is water electrolysis which requires direct current can be extracted using the engine's mechanical power or alternative energy.

Object of the research. The object of the research: spark and compression ignition internal combustion engines operating on traditional and alternative fuel with additionally supplied Brown's gas.

Aim and tasks of the work. The principal aim includes theoretical justification and experimental research on the energy and environmental performance indicators of internal combustion engines fueled by traditional fuels and by alternative fuels with additionally supplied Brown's gas.

For implementation of the aim, the following tasks should be solved:

1. To design and make a system for Brown's gas producing and fuel injection moment control equipment. To explore the properties and energetic efficiency of HHO gas generator.
2. To carry out experimental research on the influence of Brown's gas upon the energy performance indicators of spark and compression ignition internal combustion engines fueled by traditional fuels (gasoline, diesel fuel) and alternative fuels (E85, rapeseed oil, biodiesels and biobutanol additive) on changing the composition of the combustible mixture and using power of the internal combustion engine and alternative energy for HHO gas producing.
3. To carry out experimental research on the influence of Brown's gas upon the environmental performance indicators of spark and compression ignition internal combustion engines fueled by traditional fuels (gasoline, diesel fuel) and alternative fuels (E85, rapeseed oil, biodiesels and biobutanol additive) on changing the composition of the combustible mixture and using power produced by the internal combustion engine and alternative energy for HHO gas producing.
4. To establish the influence of HHO gas upon formation of the combustible mixture and the causes of changes of the energy and environmental performance indicators on the base of the theoretical analysis and mathematical modeling of compression ignition internal combustion engines. To extend the theoretical and practical basis for a further improvement of technologies for using hydrogen additive in internal combustion engines.

Methodology of research includes. In the work, theoretical and experimental research and digital modeling methods are applied. Digital modeling of the working cycle of an engine and establishment of its energy, environmental & economic performance indicators were carried out upon applying AVL BOOST program. The digital model developed by FORTRAN programming language was used for analysis of the peculiarities of hydrogen and biodiesels in a compression ignition internal combustion engine. For

Brown's gas producing, we designed and made mobile water electrolysis equipment. Experimental research works on spark ignition engines (fuel injection into the intake manifold) and compression ignition engines (indirect and direct fuel injection into the cylinder) upon additional HHO supply were carried out at various laboratories. For bench testing, the following principal laboratory equipment was used: engine load stands, a cylinder pressure sensor, charging pressure and exhaust temperature sensors, exhaust composition analyzers, fuel consumption calculating equipment, and a stable isotope mass spectrometer.

Scientific novelty. In course of development of the dissertation, the following new results in transport engineering branch were obtained:

1. The influence of Brown's gas upon the energy and environmental performance indicators of a spark-ignited internal combustion engine fueled by a mixture of gasoline and bioethanol had been explored and science-based recommendations on gas using were provided.
2. The influence of Brown's gas upon the energy and environmental performance indicators of a compression ignition internal combustion engine fueled by diesel fuel, a mixture of fuel and biobutanol, oil and biodiesels had been explored. The investigation had been carried out on using both power of the internal combustion engine and an alternative energy source for Brown's gas producing. Science-based recommendations on gas using were provided.
3. The mathematical model of compression and combustion (of gas with hydrogen and diesel fuel) in a compression ignition internal combustion engine with direct fuel injection describing the thermodynamic processes in the engine cylinder upon additional supply of Brown's gas that was developed according to methodology of other authors was approved.
4. After the investigation on the exhaust emission from a compression ignition internal combustion engine with direct fuel injection fueled by diesel fuel and biodiesel with additional supply of Brown's gas upon applying the stable carbon isotope mass ratio method, the influence of Brown's gas on concentration on the carbon-containing aerosol particles in the exhaust was established.

Practical value. After completion of complex theoretical and experimental research on internal combustion engines fuelled by traditional fuels, biofuels and additionally supplied Brown's gas, it was found that:

1. The energy and environmental performance indicators of a spark-ignited internal combustion engine are improved when gasoline or a

mixture of gasoline and bioethanol is added with small quantities of Brown's gas.

2. On additional Brown's gas supply to a compression ignition internal combustion engine (with divided or undivided combustion chamber) fueled by diesel fuel or various biofuels (such as a mixture of diesel fuel and biobutanol, rapeseed oil, biodiesels), its energy performance indicators change slightly; however, the environmental performance indicators are improved.
3. The mathematical model of compression and combustion in a compression ignition internal combustion engine developed according to methodology of other authors enables to assess in the digital way the thermodynamic processes in the engine upon additional supply of Brown's gas.

The obtained results of the scientific and practical research conform to the trends of development of vehicles: using alternative fuels, increasing the energetic efficiency and reducing the environmental pollution. The accumulated considerable theoretical and practical experience will be applicable in further research works on using hydrogen additive in internal combustion engines.

Defended propositions

1. In a spark-ignited internal combustion engine, hydrogen presented in additionally supplied Brown's gas (~ 0.15% of the volume of the intake air) improves the process of combustion of the diluted combustible mixture, reduces CO and CH concentration in the exhaust emission and improves the energy parameters of the engine when it is fueled by gasoline or a mixture of gasoline and ethanol.
2. In a compression ignition internal combustion engine fueled by traditional and alternative fuels, the additionally supplied Brown's gas (~ 0.12% of the volume of the intake air) improves the combustion process; in addition, it causes a reduction of the concentration of incomplete combustion products (CO, CH) in the exhaust and the smokiness of the latter. When power of the internal combustion engine is used for HHO gas producing, the engine's load increases and it causes an increase of NO_x emission and the energy performance indicators of the engine. If alternative energy is used for HHO producing, NO_x concentration in the exhaust reduces and the energy performance indicators remain the same.
3. If the quantity of supplied Brown's gas in a compression ignition engine is increased (from 0.1% to 0.3% of the volume of the intake air), the growing difference between the values of carbon isotope

ratios in particles of fuel and aerosol attests an improvement of the combustion process.

4. The following hypotheses (reasoned both theoretically and by digital modeling) alternative to the influence of HHO gas upon formation of a combustible mixture in a compression ignition engine are possible:
 - self-ignition of active radicals of hydrogen before injection of the main fuel;
 - molecular – kinetic peculiarities of HHO gas that affect the cylinder pressure in the end of the compression stroke.

The scope of the scientific work. The dissertation consists of the Introduction, three Chapters and the summation of the results, the list of references, the list of publications of the author on the subject of the dissertation. In addition, five Annexes are enclosed.

The volume of the work includes 135 pages (without the annexes); in the text, 69 numbered formulas, 46 figures and 15 tables are provided. Total 125 references were used in the dissertation.

1. An analysis of scientific researches of hydrogen production and using in vehicles

In the Chapter, the perspective of on-board hydrogen and Brown's gas producing and using is analyzed on the base of legal and scientific sources. In scientific literature, descriptions of the aspects of on-board HHO gas producing and using are usually narrow, so the methods of on-board hydrogen (as a component of Brown's gas) producing and the relevant technologies are discussed upon as well, the properties of hydrogen, as a fuel additive for increasing the efficiency of an internal combustion engine, are analyzed, the opportunities and perspectives of its application are discussed upon.

2. The methodology of research on using Brown's gas in internal combustion engines

In the work, theoretical & experimental research and methods of digital modeling are applied. Digital modeling of an engine's life cycle and establishment of energy and environmental performance indicators were carried out upon applying AVL BOOST program. The digital model developed by FORTRAN programming language was used for analysis of the peculiarities of hydrogen and biodiesels in a compression ignition internal combustion engine. In addition, an assessment of physical properties of compressed gas where HHO gas is presented was performed upon taking into account the molecular-kinetic properties of Brown's gas. For Brown's gas (HHO) producing, we have

designed and made mobile water electrolysis equipment. Thus we established the efficiency of the said gas producing and using (life cycle) in internal combustion engines $\eta_{eHHO} \approx 0.18$.

Experimental research works on spark ignition engines (fuel injection into the intake manifold) and compression ignition engines (indirect and direct fuel injection into the cylinder) upon additional HHO supply were carried out at laboratories of Vilnius Gediminas Technical University and at laboratories of foreign states (Table 1). The fuels used: A98 gasoline; E85 – a mixture of gasoline and ethanol; D – diesel fuel, But – biobutanol; A – rapeseed oil; B – biodiesel.

Table 1. Fuels used in the experiments and their notation

Engine Parameter	D14A3 (Honda)	1.6 TD SB (Audi – Volkswagen)	XUD9 1.9 D (Peugeot)	1.9 TDI 1Z (Audi – Volkswagen)
Type of engine. Fuel injection.	Spark ignition. Fuel injection into intake manifold	Compression ignition. Fuel injection into the turbulence chamber	Compression ignition. Fuel injection into the turbulence chamber	Compression ignition. Direct fuel injection
Fuel	A98; A98+HHO; E85; E85+HHO	D; D+HHO;	D; D+HHO; D80+But20; D80+But20+ HHO	D; D+HHO; A; A+HHO; B; B+HHO
Engine load equipment	Dynamometric vehicle traction stand MAHA LPS 2000	Dynamometric vehicle traction stand MAHA LPS 2000	Engine load stand AMX200/200	Engine load stands: КИ-5543; Borghy & Saveri FE 350 S

On investigation of internal combustion engines 1.9 TDI 1Z by load stands, the equipment under investigation is located according to the scheme (Fig. 1). Experiments were made at engine revolutions: $n = 1900 \text{ min}^{-1}$, $n = 2500 \text{ min}^{-1}$, $n = 3100 \text{ min}^{-1}$, $n = 3700 \text{ min}^{-1}$; at engine loads: 25%, 50%, 75% and 100%. Brown's gas was produced by using engine and alternative energy. The following parameters were measured during the test: torque M_e , fuel consumption, the pressure in the intake manifold and in the cylinder, exhaust gas temperature, excess-air coefficient λ , exhaust: CO, CO₂, O₂, HC, NO_x and smokiness. Upon applying the stable carbon isotope mass ratio method, investigation on aerosols in exhaust was carried out. Combustible mixture composition and ignition point were changed during the tests of internal combustion engine extra fuelled by Brown's gas.

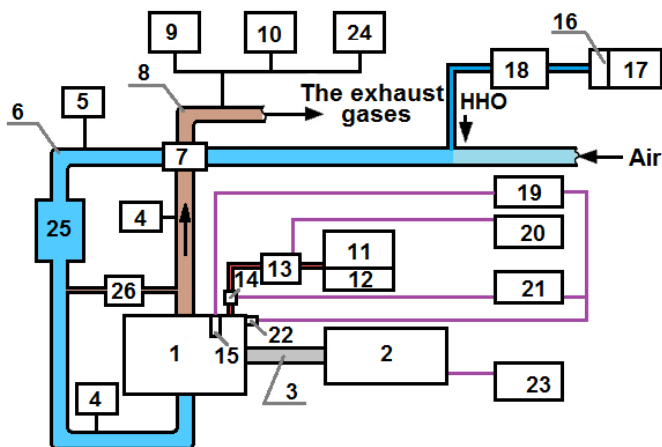


Fig. 1. The scheme of engine testing equipment:

1 – 1,9 TDI diesel engine; 2 – engine load plate; 3 – connecting shaft; 4 – temperature meter; 5 – pressure meter; 6 – intake manifold; 7 – turbocharger; 8 – exhaust manifold; 9 – smoke analyzer; 10 – exhaust gas analyzer; 11 – fuel consumption calculation equipment; 13 – high pressure fuel pump; 14 – injector valve sensor; 15 – cylinder pressure sensor; 16 – Brown’s gas flow controller; 17 – Brown’s gas generator; 18 – flame arrester; 19 – cylinder pressure recording equipment; 20 – fuel injection moment control equipment; 21 – fuel injection moment recording equipment; 22 – crankshaft position sensor; 23 – engine torque and rotational speed recording equipment; 24 – equipment for solid particles collection from combustion products; 25 – air cooler; 26 – EGR valve

An analysis of errors of the results of the experimental works and calculated parameters was carried out.

3. Investigation on the efficiency of using Brown’s gas in internal combustion engines

If a spark ignited engine operates on leaner mixture, when the ignition advance angle is reduced and small amount of Brown’s gas ($Pr_{v.HHO} \approx 0.15\%$) is supplied, the energy (b_i, η_i, η_e) and environmental (CO, HC) performance indicators are improved (Fig. 2). On increasing HHO supply, the energy performance indicators of the engine become worse and NO_x emission grows. Concentration of NO_x increases because of higher engine load which is influenced by bigger amount of energy for Brown’s gas production. What is more, hydrogen in Brown’s gas increases combustion temperature.

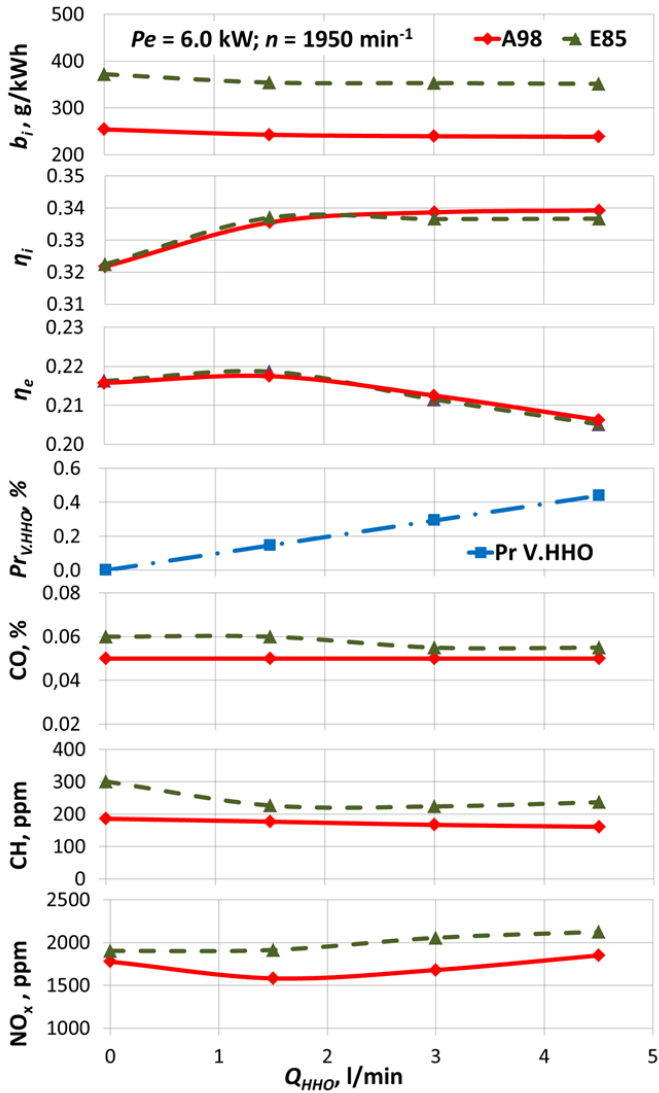


Fig. 2. The influence of Brown's gas upon the energy (b_i , η_i , η_e) and environmental (CO, CH, NO_x) performance indicators in an engine with 6 kW load in spark ignition engine D14A3

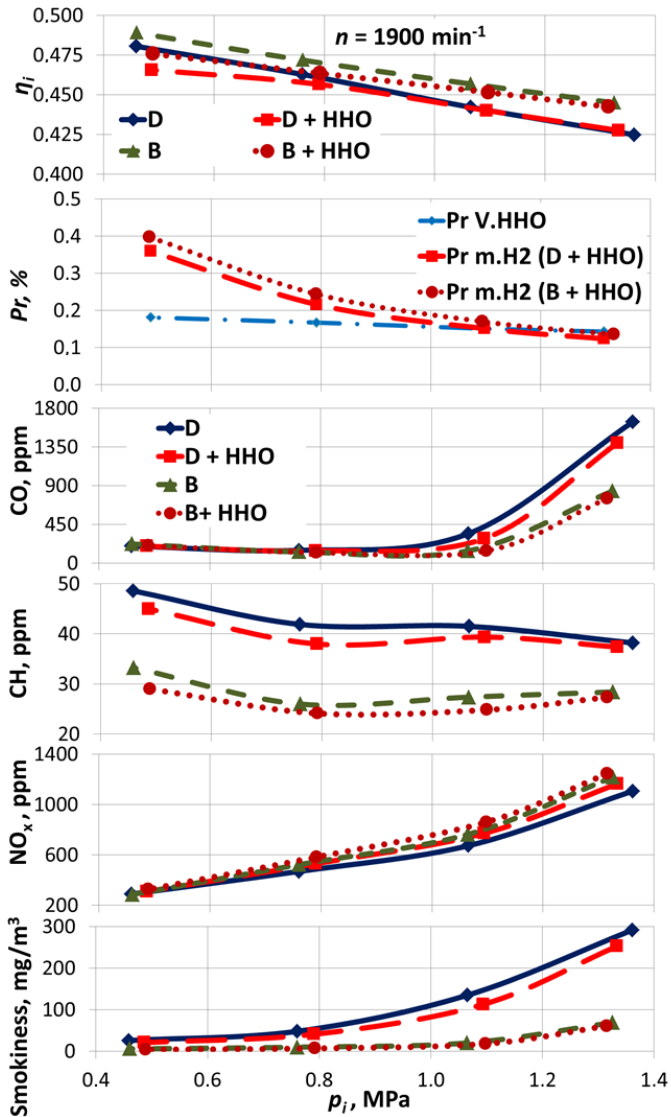


Fig. 3. The influence of Brown's gas upon the energy (η_i) and the environmental performance indicators (CO, CH, NO_x and smokiness) on different load of the 1.9 TDI IZ in a direct injection compression ignition engine

If the optimum quantity of Brown's gas is additionally supplied in a compression ignition engine, $Pr_{V, HHO} = 0.12\text{--}0.15\%$, the energy and environmental performance indicators do not change (Fig. 3). The energy performance indicators of the engine may be improved by ignition delay at crankshaft 2°AV turning angle; in such a case, NO_x concentration is reduced as well. On increasing HHO gas supply, the energy performance indicators become worse; however, the environmental performance indicators trend to growing. This effect may be explained by an additional increase of pressure in the end of compression when HHO gas is additionally supplied (Fig. 4).

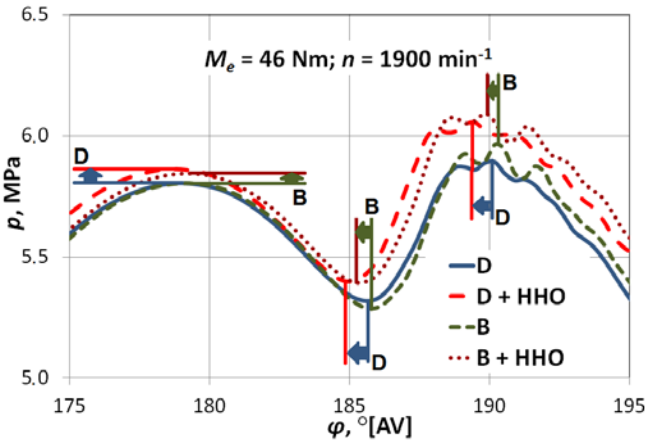


Fig. 4. The influence of Brown's gas upon an additional pressure increase in the cylinder

In course of digital analysis of the compression process, the following possible causes of an additional increase of pressure in a compression ignition engine were established:

- the grown boost pressure of the turbocharger;
- different molecular-kinetic properties of air and HHO gas;
- advanced ignition of hydrogen because of high temperature achieved on the compression.

The above-described reduces the ignition delay period of the fuel. On compression, the most probable is self-ignition of active radicals of monoatomic hydrogen. Other molecules of hydrogen penetrate into the fuel and improve combustion of hydrocarbons. The growing difference between the values of carbon isotope ratios in particles of fuel and aerosol attests an improvement of the combustion process.

General conclusions

The completed complex experimental works and mathematical modeling of internal combustion engines as well as analysis of changes of their performance indicators on using traditional and alternative biofuels enabled us to formulate the following summarized conclusions on the influence of Brown's gas on the energy and environmental performance indicators of internal combustion engines:

1. The efficiency of Brown's gas producing and using (life cycle) in internal combustion engines established on measuring energy consumption by the designed and made Brown's gas producing and using equipment (upon assessing the consumption of the power of the engine used for Brown's gas producing) ~ 18%.
2. The energy performance indicators of internal combustion engines depend on the type of the engine, its mode of operation, the quantity of Brown's gas and the way of generation of energy usable for production:
 - if power of an internal combustion engine is used for HHO production: in a spark ignition engine, the indicated thermal efficiency grows up to 5%, when the engine is fueled by a diluted mixture and the optimum quantity of HHO gas (~ 0.5% of the volume of the intake air) is supplied; in a compression ignition engine, the energy performance indicators become inconsiderably worse;
 - if alternative energy is used and the optimum quantity of HHO gas (~ 0,12% of the volume of the intake air) is supplied, the energetic efficiency of a compression ignition engine remains the same. A delay of starting fuel injection (crank angle ~ 2°) causes an increase of the effective efficiency of the internal combustion engine.
3. A small quantity of Brown's gas (0.12–0.15% of the volume of the intake air) causes a considerable increase of the energy and environmental performance indicators of a spark ignition engine and a compression ignition engine:
 - in a spark ignition engine, CH concentration reduces to 14% (when the engine operates on a diluted mixture and is fueled by gasoline) and to 24% (when the engine is fueled by fuel E85). In a compression ignition engine, CH concentration reduces to 15% (when the engine is fueled by diesel fuel) and to 34% (when the engine is fueled by biodiesel fuel);
 - when a spark ignition engine fueled by gasoline operates in the idle mode, CO concentration reduces to 10%; if it is fueled by E85, CO

- concentration reduces to 38%. In a compression ignition engine, CH concentration in exhaust emission reduces to 15%;
- in a compression ignition engine fueled by diesel fuel and biodiesel fuel, smokiness of the combustion products reduces to 25%; the concentration of emitted aerosols reduces as well;
 - when power of the internal combustion engine is used for Brown's gas producing, CO₂ and NO_x concentration in a spark ignition engine and a compression ignition engine increases until 6%;
 - when an alternative source of energy is used for Brown's gas producing in a compression ignition engine, NO_x concentration reduces 16–22%, on increasing the supplied quantity of HHO gas.
4. The influence of Brown's gas upon trends of changes of the energy and environmental performance indicators of an engine is based on the following causes:
- in a spark ignition engine, active hydrogen presented in Brown's gas extends the limits of combustible mixture ignition and combustion, so operation of the engine on diluted mixtures becomes stable. Hydrogen increases the speed of flame front propagation and its permeability as well as the combustion temperature;
 - if power of the internal combustion engine is used for Brown's gas producing, the load, fuel consumption and combustion temperature increase;
 - in compression ignition engines, hydrogen presented in HHO gas penetrates into hydrocarbonic compounds of the injected fuel, thus shortening the ignition time and improving the combustion process.
5. The analysis of the results of the research on a compression ignition engine provided a basis for the following hypotheses (theoretically reasoned and based on mathematical modeling) alternative to the influence of HHO gas upon formation of a combustible mixture:
- the molecular-kinetic theory based on the influence of HHO gas upon parameters of a compressed gas mixture;
 - advanced ignition of the active hydrogen radicals presented in Brown's gas in a compression ignition engine. It causes reducing the energetic efficiency of the engine; however, it positively impacts the environmental performance indicators of the engine.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation In the reviewed scientific periodical publications

Rimkus, A; Pukalskas, S; Matijošius, J; Sokolovskij, E. 2013. Betterment of ecological parameters of diesel engine using Brown's gas, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* Vol. 21(2): 133–140. ISSN 1648-6897. (ISI Web of Science).

Makarevičienė, V; Sendžikienė, E; Pukalskas, S; Rimkus, A; Vegneris, R. 2013. Performance and emission characteristics of biogas used in diesel engine operation, *Energy Conversion and Management* Vol. 75: 224–233. ISSN 0196-8904. (ISI Web of Science).

Rimkus, A; Pukalskas, S; Matijošius, J; Biedrzycki, J. 2012. Dyzelinio variklio ekologinių ir energetinių rodiklių tyrimas naudojant dyzelino biobutanolio ir Brauno dujų mišinius, *Žemės ūkio inžinerija* Vol. 44(1–3): 72–83. ISSN 1392-1134.

Paulauskas, V; Nagurnas, S; Rimkus, A. 2012. Benzininių variklių taršos eksperimentiniai tyrimai, atkartojant Europos važiavimo ciklą NEDC, *Žemės ūkio inžinerija* Vol. 44(1–3): 34–47. ISSN 1392-1134.

Rimkus, A; Ulickas, T; Matijošius, J; Pukalskas, S; Stravinskas, P. 2012. Brauno dujų panaudojimas aliejumi veikiančiame dyzeliniame variklyje, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos* T. 4(4): 376–380. ISSN 2029-2341.

Matijošius, J; Mažeika, M; Rimkus, A. 2010. Trikomponenčių degalų, sudarytų iš dyzelino, biodyzelino ir propanolio, taikymas dyzeliniame variklyje, *Mokslas – Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos* T. 2(6): 77–80. ISSN 2029-2341.

In the other editions

Melaika, M.; Rimkus, A.; Pukalskas, S.; Žaglinskis, J. 2013. Simulation of parameters of SI engine using H₂ and CH₄ fuel blends, *Transport Means – 2013*: 13–16. ISSN 1822-296X.

Melaika, M.; Rimkus, A.; Pukalskas, S.; Matijošius, J.; Imiolek, M. 2013. Optimization of bus engine advanced ignition angle by numerical simulation using compressed natural gas and hydrogen fuel blend. *TRANSBALTICA 2013*. Vilnius: Technika, 126–130. ISSN 2029-2376. ISBN 9786094574702.

Pukalskas, S.; Bogdanovičius, Z.; Matijošius, J.; Melaika, M.; Rimkus, A.; Vėgneris, R.; Stravinskas, P.; Zautra, R. 2013. Biometano ir benzino mišinio įtakos kibirkštinio uždegimo variklio veikimo parametrams tyrimai. 16-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos *Mokslas – Lietuvos ateitis* teminės konferencijos „Transporto inžinerija ir vadyba“ straipsnių rinkinys. Vilnius: Technika, 177–181. ISSN 2029-7157. ISBN 9786094574900.

Rimkus, A; Mindaugas, M; Valiūnas, V. 2012. Suslėgtų gamtinių dujų ir vandenilio degalų mišinio panaudojimo Vilniaus miesto viešajame transporte efektyvumo tyrimas,

Technologijos ir menas: tyrimai ir aktualijos. Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija Nr. 3: 59–64. ISSN 2029-400X.

Rimkus, A; Melaikas, M; Pukalskas, S; Nagurnas, S. 2012. Research of hydrogen influence for gas bus ecological and economic parameters, *Transport Means – 2012*: 13–16. ISSN 1822-296X.

Melaika, M; Rimkus, A. 2012. Variklio darbo modeliavimas naudojant skirtingus suslėgtų gamtinių dujų ir vandenilio degalų mišinius, *Mokslas – Lietuvos ateitis teminės konferencijos „Transporto inžinerija ir vadyba“ straipsnių rinkinys*. Vilnius: Technika, 306–311. ISSN 2029-7157. ISBN 978-609-457-132-9.

Rimkus, A; Pukalskas, S; Matijošius, J. 2011. HHO dujų panaudojimo benzininiuose vidaus degimo varikliuose efektyvumo tyrimas. *International conference on hydrogen production (ICH2P-11) straipsnių rinkinys*. ICH2P-11 PROCEEDINGS Salonikai, Graikija: Paper No 125VEH.

Pukalskas, S; Matijošius, J; Rimkus, A; Bogdanovičius, Z. 2010. Mišraus biodegalų tiekimo būdo panaudojimas, *VII mokslinė konferencijos „Technologijos mokslo darbai vakarų Lietuvoje“ medžiaga*. Klaipėdos universiteto leidykla, 79–86. ISSN 1822-4652.

About the author

Alfredas Rimkus was born in Siauliai, on 26 of June 1963.

The qualification of an Engineer mechanic of Automobile ir Automobile property was graduated in Faculty Mechanics at Vilnius Civil engineering institute, 1986. In 1986–2002 was working at Vilnius Higher technical school, in 2002–2008 was working at Vilnius technical college, from 2008 till now working at Vilnius College of technologies and design. In 2009–2013 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. Alfredas Rimkus in 2011–2012 was on internship at Automotive Industry Institute (PIMOT) in Warsaw (Poland), in 2012 was on internship at University of Zilina (Slovakia), in 2013 was on internship at Technical University in Prague (Czech Republic). At present – lecturer in Road Transport Department of Vilnius Gediminas Technical University.

VIDAUS DEGIMO VARIKLIO DARBO EFEKTYVUMO DIDINIMAS PANAUDOJANT BRAUNO DUJAS

Mokslo problemos aktualumas. Šiuolaikinio transporto degalų pagrindinis žaliavos šaltinis yra nafta. Jos išteklių šiuo metu yra iki 500 milijardų barelių, o tai sudaro nuo 14 % iki 16 % visų kada nors išžvalgytų naftos telkinių. Per metus naftos suvartojimas siekia apie 30 milijardų barelių (tyrimus atliko S. Lee ir R. Curley). Tai turi įtakos naujų, alternatyvių naftinės kilmės degalams, resursų paieškai. Ateityje didelę perspektyvą turi vandenilinė energetika. Tikėtina, kad labiausiai vartotina jos šaka bus vandenilio gamyba iš vandens elektrolizės būdu, nes tai sąlygoja neriboti žaliavos išteklių ir nesudėtinga gamybos technologija. Vandens elektrolizės metu gaunamų degiųjų vandenilio ir deguonies dujų mišinys yra pavadintas jas tyrusio mokslininko Yull Brown garbei Brauno dujomis. Šios dujos žymimos HHO. 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 (tyrimus atliko T. D. Andrea, A. Yilmaz, V. Knop, D. C. Rakopoulos, S. Wang, C. M. Whiete ir kiti).

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 (ES baltoji knyga; Europa 2020). 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.

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.

Tyrimų objektas. Darbo tyrimų objektas – kibirkštinio ir slėginio uždegimo vidaus degimo varikliai, veikiantys įprastiniais bei alternatyviaisiais degalais su papildomai tiekiamomis Brauno dujomis.

Darbo tikslas ir uždaviniai. Pagrindinis tikslas – teoriškai pagrįsti ir eksperimentiškai ištirti įprastiniais bei alternatyviaisiais degalais su papildomai tiekiamomis Brauno dujomis veikiančių vidaus degimo variklių energetinius ir ekologinius rodiklius.

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Suprojektuoti ir pagaminti Brauno dujų gamybos įrenginį ir degalų įpurškimo pradžios momento valdymo įrangą. Ištirti HHO dujų generatoriaus charakteristikas ir energetinį efektyvumą.
2. Eksperimentiškai ištirti Brauno dujų įtaką kibirkštinio ir slėginio uždegimo variklių energetiniams rodikliams, naudojant tradicinius (benziną, dyzeliną) bei alternatyviusius degalus (E85, rapsų aliejų, biodyzeliną ir biobutanolio priedą), keičiant degiojo mišinio sudėtį bei uždegimo momentą, HHO dujų gamybai naudojant VDV bei alternatyvią energiją.
3. Eksperimentiškai ištirti Brauno dujų įtaką kibirkštinio ir slėginio uždegimo variklių ekologiniams rodikliams, naudojant tradicinius (benziną, dyzeliną) bei alternatyviusius degalus (E85, rapsų aliejų, biodyzeliną ir biobutanolio priedą), keičiant degiojo mišinio sudėtį bei uždegimo momentą, HHO dujų gamybai naudojant VDV bei alternatyvią energiją.
4. Remiantis slėginio uždegimo variklio veikimo rodiklių pokyčio teorine analize ir matematinio modeliavimu nustatyti HHO dujų įtakos degiojo mišinio susidarymui ir ekologinių bei energetinių rodiklių kitimui priežastis. Išplėsti teorinį ir praktinį pagrindą tolimesniam vandenilio priedo naudojimo vidaus degimo varikliuose technologijų tobulinimui.

Tyrimų metodika. Darbe taikomi teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai bei skaitinio modeliavimo metodai. Skaitinis variklio darbo ciklo modeliavimas bei energetinių, ekologinių ir ekonominių rodiklių nustatymas atliktas naudojant AVL BOOST programą. FORTRAN programavimo kalba sukurtu skaitiniu modeliu atlikta vandenilio ir biodyzelino degimo ypatumų slėginio uždegimo variklyje analizė. Brauno dujų gamybai naudotas disertacijos autoriaus projektuotas ir pagamintas mobilus vandens elektrolizės įrenginys. Eksperimentiniai kibirkštinio (degalų įpurškimas į įsiurbimo kolektorių) ir slėginio uždegimo variklių (netiesioginis ir tiesioginis degalų įpurškimas į cilindrą) tyrimai, papildomai tiekiant HHO dujas, atlikti įvairiose laboratorijose (2.1 lentelė). Stendinių tyrimų metu naudota ši pagrindinė laboratorinė įranga: variklio apkrovos stendai, slėgio cilindre jutiklis, pripūtimo slėgio ir išmetamųjų dujų temperatūros jutikliai, išmetamųjų dujų sudėties analizatoriai, degalų sąnaudų matuoklis, stabilijų izotopų masių spektrometras.

Mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie transporto inžinerijos mokslo krypčiai svarbūs nauji rezultatai:

1. Ištirta Brauno dujų įtaka kibirkštinio uždegimo variklio energetiniams ir ekologiniams rodikliams, naudojant benzino ir bioetanolio mišinį, pateiktos moksliai pagrįstos dujų naudojimo rekomendacijos.
2. Ištirta Brauno dujų įtaka slėginio uždegimo variklių energetiniams ir ekologiniams rodikliams, naudojant dyzeliną, dyzelino ir biobutanolio mišinį, aliejų bei biodyzeliną. Tyrimai atlikti Brauno dujų gamybai panaudojant ir VDV energiją, ir alternatyvų energijos šaltinį. Pateiktos moksliai pagrįstos dujų naudojimo rekomendacijos.
3. Pagal kitų autorių sukurtą metodiką apčiuobtas slėginio uždegimo variklio su tiesioginiu degalų įpurškimu suslėgimo ir degimo (vandenilio turinčių dujų ir dyzelino) matematinis modelis, aprašantis variklio cilindre vykstančius termodinaminius procesus į variklį papildomai tiekiant Brauno dujas.
4. Atlikus slėginio uždegimo variklio su tiesioginiu degalų įpurškimu, naudojančio dyzeliną ir biodyzeliną su papildomai tiekiamomis Brauno dujomis, išmetalų tyrimą stabilių anglies izotopų santykio metodu, nustatyta Brauno dujų įtaka anglies turinčių aerolio dalelių koncentracijai išmetamosiose dujose.

Praktinė vertė. Atlikus kompleksinius teorinius ir eksperimentinius vidaus degimo variklių tyrimus, naudojant tradicinius degalus, biodegalus bei papildomai tiekiant Brauno dujas, nustatyta, kad:

1. Kibirkštinio uždegimo variklio energetiniai ir ekologiniai rodikliai gerinami benzina bei benzino ir bioetanolio mišinį papildant mažais Brauno dujų kiekiais.
2. Slėginio uždegimo varikliui (su padalyta ir su vientisa degimo kamera), veikiančiam dyzelinu ar įvairiais biodegalais (dyzelino ir biobutanolio mišiniu, rapsų aliejumi, biodyzelinu), papildomai tiekiant Brauno dujas, energetiniai rodikliai mažai kinta, tačiau gerėja ekologiniai rodikliai.
3. Pagal kitų autorių sukurtą metodiką apčiuobtas slėginio uždegimo variklio suslėgimo ir degimo matematinis modelis, leidžia skaitiniu būdu įvertinti variklyje vykstančius termodinaminius procesus kintant papildomai tiekiamam Brauno dujų kiekiui.

Gauti mokslinio ir praktinio tyrimo rezultatai atitinka transporto priemonių raidos tendencijas: alternatyvių degalų panaudojimą, energetinio efektyvumo didinimą ir ekologinės taršos mažinimą. Sukaupta teorinė ir praktinė patirtis

tolimesniems vandenilio priedo naudojimo vidaus degimo varikliuose tyrimams.

Ginamieji teiginiai

1. Kibirkštinio uždegimo variklyje papildomai tiekiamose Brauno dujose (~ 0,15 % įsiurbiamo oro tūrio) esantis vandenilis gerina paliesinto mišinio degimo procesą, sumažina CO ir CH koncentracijas išmetamosiose dujose ir gerina variklio energetinius parametrus, naudojant benziną bei benzino ir etanolio degalų mišinį.
2. Slėginio uždegimo variklyje, veikiančiame tradiciniais ir alternatyviais degalais, papildomai tiekiamos Brauno dujos (~ 0,12 % įsiurbiamo oro tūrio) gerina degimo procesą ir mažina nepilno degimo produktų (CO, CH) koncentraciją deginiuose bei dūmingumą. HHO dujų gamybai naudojant VDV energiją, išauga variklio apkrova ir tai didina NO_x emisiją bei variklio energetinius rodiklius. HHO gamybai naudojant alternatyvią energiją, NO_x koncentracija deginiuose mažėja, energetiniai rodikliai nekinta.
3. Didinant Brauno dujų tiekiamą slėginio uždegimo variklyje (nuo 0,1 % iki 0,3 % įsiurbiamo oro tūrio), augantis skirtumas tarp degalų ir aerozolio dalelių anglies izotopų santykio verčių, rodo degimo proceso gerėjimą.
4. Galimos teoriškai ir matematinio modeliavimu pagrįstos alternatyvios HHO dujų įtakos degiojo mišinio susidarymui slėginio uždegimo variklyje hipotezės:
 - savaiminis aktyvių vandenilio radikalų užsiliepsnojimas prieš įpurškiant pagrindinius degalus;
 - molekulinį – kinetiniai HHO dujų ypatumai, turintys įtakos suslėgimo takto pabaigos slėgiui cilindre.

Darbo apimtis. Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas. Taip pat yra penki priedai.

Darbo apimtis yra 135 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 69 numeruotos formulės, 46 paveikslai ir 15 lentelių. Rašant disertaciją buvo panaudota 125 literatūros šaltiniai.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgta vandenilio vartojimą skatinantys veiksniai, vandenilio ir Brauno dujų naudojimo vidaus degimo varikliuose mokslinių tyrimų metodika ir rezultatai. Formuluojamos skyriaus išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai. Antrajame skyriuje ištirtas Brauno dujų gamybos įrenginio efektyvumas, pateikiama Brauno dujų panaudojimo vidaus degimo varikliuose tyrimo metodika. Trečiajame skyriuje

pateikti Brauno dujų panaudojimo kibirkštinio ir slėginio uždegimo varikliuose eksperimentinių tyrimų ir skaitinio modeliavimo rezultatai, nustatytas optimalus papildomai tiekiamų HHO dujų kiekis, racionali degiojo mišinio sudėtis ir poreikis reguliuoti uždegimo momentą.

Bendrosios išvados

Atlikti kompleksiniai vidaus degimo variklių eksperimentiniai ir matematinio modeliavimo tyrimai bei variklių veikimo rodiklių pokyčio analizė, naudojant tradicinius bei alternatyviuosius biodegalus, leidžia suformuluoti apibendrintas Brauno dujų įtakos VDV energetiniams ir ekologiniams rodikliams išvadas:

1. Suprojektuotu ir pagamintu Brauno dujų gamybos įrenginiu nustatytas šių dujų gamybos ir panaudojimo (būvio ciklo) VDV efektyvumas ~ 18 %.
2. Energetiniai VDV rodikliai priklauso nuo variklio tipo, veikimo režimo, Brauno dujų kiekio ir gamybai naudojamos energijos išgavimo būdo:
 - HHO dujų gamybai naudojant VDV energiją: kibirkštinio uždegimo variklio, indikatorinis naudingumo koeficientas auga iki 5 %, varikliui veikiant paliesintu mišiniu ir tiekiant optimalų HHO kiekį (~ 0,15 % įsiurbiamo oro tūrio); slėginio uždegimo variklio energetiniai variklio rodikliai nežymiai blogėja;
 - naudojant alternatyvią energiją ir tiekiant optimalų HHO dujų kiekį (~ 0,12 % įsiurbiamo oro tūrio) slėginio uždegimo variklio energetinis efektyvumas nekinta. Degalų įpurškimo pradžios vėlinimas (~ 2°AV) didina VDV efektyvųjį naudingumo koeficientą.
3. Mažas Brauno dujų kiekis (0,12–0,15 % įsiurbiamo oro tūrio) ženkliai pagerina kibirkštinio ir slėginio uždegimo variklių ekologinius rodiklius:
 - CH koncentracija deginiuose kibirkštinio uždegimo varikliui veikiant paliesintu mišiniu ir naudojant benzinažumą sumažėja iki 14 %, naudojant degalus E85 iki 24 %. Slėginio uždegimo varikliui veikiant dyzelinu CH koncentracija sumažėja iki 15 %, naudojant biodyzeliną iki 34 %;
 - CO koncentracija kibirkštinio uždegimo varikliui veikiant tuščiąja eiga benzinu sumažėja iki 10 %, naudojant E85 degalus iki 38 %. Slėginio uždegimo variklio deginių CO koncentracija sumažėja iki 15 %;
 - deginių dūmingumas slėginio uždegimo varikliui veikiant ir dyzelinu, ir biodyzelinu sumažėja iki 25 %, mažėja išmetamų aerosolių koncentracija;

- Brauno dujų gamybai naudojant VDV energiją, CO₂ ir NO_x koncentracija kibirkštinio ir slėginio uždegimo variklių deginiuose išauga iki 6 %;
 - Brauno dujų gamybai naudojant alternatyvų energijos šaltinį, slėginio uždegimo variklyje, didinant HHO kiekį, NO_x koncentracija mažėja 16–22 %.
4. Brauno dujų įtaką variklio energetinių ir ekologinių rodiklių kitimo tendencijoms pagrindžia šios priežastys:
- kibirkštinio uždegimo variklyje Brauno dujose esantis chemiškai aktyvus vandenilis praplečia degiojo mišinio užsiliepsnojimo ir degimo ribas, variklis gali stabiliai veikti paliesintais mišiniais. Vandenilis spartina liepsnos fronto plitimo greitį bei skvarbą, didina degimo temperatūrą;
 - Brauno dujų gamybai naudojant VDV energiją, auga variklio apkrova, degalų sąnaudos ir degimo temperatūra;
 - slėginio uždegimo varikliuose HHO dujose esantis vandenilis skverbiasi į purškiamų degalų angliavandenilių junginius, trumpina užsiliepsnojimo trukmę, gerina jų degimą.
5. Remiantis slėginio uždegimo variklio tyrimo rezultatų analize pateiktos teoriškai ir matematinio modeliavimu pagrįstos alternatyvios HHO dujų įtakos degiojo mišinio susidarymui hipotezės:
- molekulinė – kinetinė teorija pagrįsta HHO dujų įtaka suslegiamų dujų mišinio parametrams;
 - išankstinis Brauno dujose esančių aktyvių vandenilio radikalų užsiliepsnojimas slėginio uždegimo variklyje, mažinantis variklio energetinį efektyvumą, tačiau turintis teigiamą įtaką variklio ekologiniams rodikliams.

Trumpos žinios apie autorių

Alfredas Rimkus gimė 1963 m. birželio 26 d. Šiauliuose.

1986 m. įgijo Automobilių ir autoūkio inžinieriaus mechaniko kvalifikaciją Vilniaus inžinerinis statybos institute, Mechanikos fakultete. 1986–2002 m. dirbo Vilniaus aukštesniojoje technikos mokykloje, 2002–2008 m. dirbo Vilniaus technikos kolegijoje, 2008 iki dabar dirba Vilniaus technologijų ir dizaino kolegijoje. 2009–2013 m. – Vilniaus Gedimino technikos universiteto doktorantas. Alfredas Rimkus 2011–2012 m. stažavosi Varšuvos Pramoniniame motorizacijos institute (PIMOT) (Lenkija), 2012 m. stažavosi Žilinos Universitete (Slovakija), 2013 m. stažavosi Čekijos Technikos Universitete Prahoje (Čekijos respublika). Šiuo metu dirba lektoriumi Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automobilių transporto katedroje.

Alfredas RIMKUS

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF OPERATION OF AN INTERNAL
COMBUSTION ENGINE BY USING BROWN'S GAS

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Transport Engineering (03T)

Alfredas RIMKUS

VIDAUS DEGIMO VARIKLIO DARBO EFEKTYVUMO DIDINIMAS
PANAUDOJANT BRAUNO DUJAS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, transporto inžinerija (03T)

2013 12 30. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius