

Топливо и энергетика

УДК 621.436.038

Бойченко С.В.¹, докт. техн. наук, проф.,
Кухарёнок Г.М.², докт. техн. наук, проф.,
Гершань Д.Г.², **Черняк Л.Н.³**, канд. техн. наук,
Шкильнюк И.О.³

¹ Жешувский технологический университет, Жешув, Польша

Аллея Повстанцев Варшавы, 8, 35.9595 Жешув, Польша, e-mail: chemmotology@ukr.net

² Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

просп. Незалежности, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь, e-mail: kux@tut.by

³ Национальный авиационный университет, Киев, Украина

просп. Космонавта Комарова, 1, 03058 Киев, Украина, e-mail: chemmotology@ukr.net

Влияние состава и свойств топлива на рабочий процесс двигателя

Проведены расчетные исследования влияния состава и свойств топлива на рабочий процесс двигателя по разработанной методике, включающей компьютерную программу расчета рабочего процесса, модели течения топлива в наконечнике распылителя и развития топливных струй в камере сгорания. Получены регрессионные и графические зависимости удельного индикаторного расхода топлива и удельного выброса оксидов азота от элементного состава, плотности, вязкости и поверхностного натяжения топлива для дизеля, которые позволяют оценивать влияние вышеуказанных состава и свойств на показатели рабочего процесса. Для дизелей целесообразно по сравнению с метанолом и этанолом использование бутанола, состав и свойства которого обеспечивают лучшие топливно-экономические и экологические показатели двигателя. *Библ. 18, рис. 3, табл. 1.*

Ключевые слова: топливо, состав, свойства, двигатель, рабочий процесс.

Использование альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания является одним из путей дальнейшего развития экономики. Они позволяют сократить потребление нефтяного топлива, а также достичь значительного улучшения показателей экологической безопасности двигателя.

Чтобы достичь реального влияния на проблемы, связанные с использованием двигателей, применение альтернативных топлив должно давать конкурентное преимущество по энер-

гетическим, экономическим и экологическим показателям.

Показатели рабочего процесса двигателя определяются составом и свойствами топлива. Их влияние неоднозначно и зависит от многих факторов: режимов работы двигателя, способов применения топлива на двигателе, организации рабочего процесса.

Цель настоящей работы — оценка влияния состава и свойств топлива на показатели рабочего процесса двигателя.

Результаты исследований

Разработана методика исследования влияния состава и свойств топлива на рабочий процесс двигателя, включающая компьютерную программу расчета рабочего процесса, модели течения топлива в носке распылителя и развития топливных струй в камере сгорания. Алгоритм исследования представлен на рис.1.

Исследования были проведены на дизеле 4ЧН 11/12,5 Минского моторного завода. Режимы исследования являются режимы внешней скоростной характеристики и 13-ступенчатого цикла ESC. Диапазон изменения состава и свойств топлив определен по таблице [1–13]: содержание углерода $g_C = 0,33–0,87$, водорода $g_H = 0,077–0,471$ и кислорода $g_O = 0,01–0,37$; плотность $\rho = 790–890$ кг/м³, динамическая вязкость $\mu = 0,0012–0,0035$ Па·с, поверхностное натяжение $\gamma = 0,018–0,032$ Н/м.

Компьютерная программа расчета рабочего процесса (МРПД), позволяющая учитывать влияние состава и свойств топлива, создана на основе разработанной математической модели рабочего процесса. Эта модель для определения давления газов в цилиндре использует первое начало термодинамики, для рассматриваемого процесса представленное в таком виде [14]:

$$dQ = dL + dU + dQ_w, \quad (1)$$

где dQ – количество теплоты, выделяемой при сгорании; dL – работа газов в цилиндре; dU – изменение внутренней энергии газов, находя-

щихся в цилиндре; dQ_w – потери теплоты от газов в стенке.

Решение этого уравнения конечно-разностным методом относительно текущего давления газов в цилиндре имеет вид:

$$P_n = \{2 B_0 H_u (\Delta X_n - \Delta X_{wn}) + P_{n-1} \times [(K_{n+1})/(K_{n-1})] (V_{n-1} - V_n)\} / [(K_{n+1}) / (K_{n-1})] (V_{n-1} - V_n), \quad (2)$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива; ΔX_n – относительное количество теплоты, выделившейся на участке; ΔX_{wn} – относительные потери теплоты от газов в стенке; P_{n-1} – давление газов в начале рассматриваемого участка; K_n – величина отношения теплоемкостей для середины участка, $K_n = C_p/C_v$ (здесь C_p , C_v – теплоемкости рабочего тела соответственно при постоянном давлении и объеме, которые определяются с учетом элементарного состава топлива); V_{n-1} , V_n – соответственно объемы в начале и конце рассматриваемого участка.

Для расчета количества теплоты, выделившейся на участке, применена методика Н.Ф. Разлейцева.

Температура газов в цилиндре в конце расчетного участка определяется из характеристического уравнения:

$$T_n = P_n V_n / (R M_a \mu_{X_n}), \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная; M_a – количество молей газов в начале сжатия;

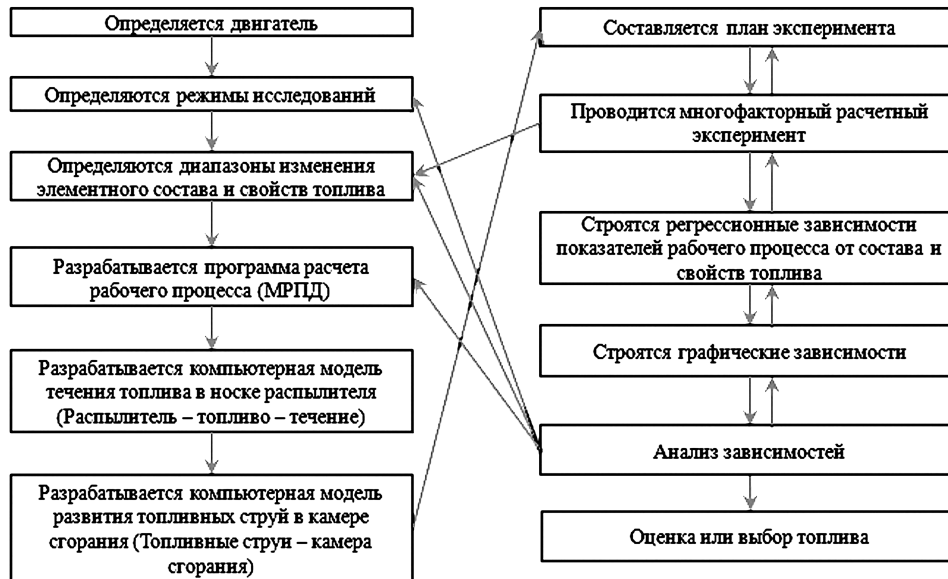


Рис.1. Алгоритм исследования влияния состава и свойств топлива на рабочий процесс.

Состав и свойства топлив

Показатель	Дизельное	Метанол	Этанол	н-Бутанол	Диметиловый эфир	Эфиры растительных масел	Рапсовое масло	Водород
Плотность при 20 °С, кг/м ³	810–860	795	789	810	2,091	875–900	917	70
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с	3,5–6,0	0,55	1,76	3,64	–	3,5–5,0	76	–
Октановое число (исследовательский метод)	–	104–115	106	100	–	20–25	–	30–40
Цетановое число	45–55	3–5	8	18	>55	50–55	40	45–90
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	42,5–43	19,7	26,8	33,1	25	37–38	37,1	118
Количество воздуха*, кг	14,3–14,7	6,5	9	11,2	8,9	13,5–14,5	12,3	34,8
Элементный состав:								
g _C	0,86	0,375	0,522	0,649	0,522	–	0,776	–
g _H	0,13	0,12	0,130	0,135	0,130	–	0,115	1,0
g _O	0,01	0,50	0,348	0,216	0,348	–	0,109	–

* Теоретически необходимое для полного сгорания 1 кг топлива.

$\mu_{\text{Хп}}$ – текущее значение коэффициента молекулярного изменения.

Текущее значение коэффициента молекулярного изменения для дизеля определяем по следующей зависимости:

$$\mu_{\text{Хп}} = (1 + g_{\text{H}}/4 + g_{\text{O}}/32 - 1/m_{\text{T}}) / (\alpha L_0 + 1/m_{\text{T}}), \quad (4)$$

где α – коэффициент избытка воздуха; m_{T} – молекулярная масса топлива; L_0 – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива.

Количество оксидов азота определялось по методике расчета равновесного состава продуктов сгорания на основании уравнений материального баланса и уравнения Дальтона [15].

Модели течения топлива в носке распылителя и развития топливных струй в камере сгорания представлены в работах [16–18].

Для исследования использовали насыщенный, близкий к D-оптимальному, план для трех изменяемых параметров. Постоянство заданного режима поддерживалось изменением цикловой подачи топлива.

Проводили расчетный эксперимент по разработанной компьютерной программе и моделям. По его результатам построены регрессионные зависимости показателей рабочего процесса от состава и свойств топлива для всех режимов экологического цикла. Так, для режима С100 цикла ESC построены регрессионные зависимости удельного индикаторного расхода топлива g_i и удельного выброса оксидов азота g_{NO_x} от плотности, вязкости и поверхностного натяжения, г/(кВт·ч):

$$g_i = 476,1 - 0,407 \rho - 23037 \mu - 5270 \sigma + 1,97 \cdot 10^{-4} \rho^2 + 1446125 \mu^2 + 51276 \sigma^2 + 2,39 \rho \mu + 0,964 \rho \sigma + 462733 \mu \sigma; \quad (5)$$

$$g_{\text{NO}_x} = 7,24 - 0,0529 \rho + 981 \mu + 1009 \sigma + 39,75 \cdot 10^{-6} \rho^2 - 78450 \mu^2 - 9770 \sigma^2 + 0,717 \rho \mu - 0,396 \rho \sigma - 43169 \mu \sigma. \quad (6)$$

Результаты анализа полученных зависимостей представлены на рис.2, 3.

Увеличение плотности для всех значений вязкости рассматриваемого диапазона при поверхностном натяжении 0,023 Н/м приводит к снижению удельного индикаторного расхода топлива. Также g_i падает с увеличением вязкости, причем в области максимальных значений μ падение замедляется. Наименьший удельный индикаторный расход топлива получается при его плотности 890 кг/м³ и вязкости 0,0035 Па·с и составляет 177,3 г/(кВт·ч), что на 13 г/(кВт·ч) меньше наибольшего. С ростом поверхностного натяжения увеличение вязкости в зависимости от плотности может давать либо уменьшение, либо увеличение g_i .

Удельный выброс оксидов азота падает с уменьшением плотности и вязкости при поверхностном натяжении 0,023 Н/м. Величина падения зависит от сочетания значений плотности и вязкости. Например, интенсивность падения g_{NO_x} выше при уменьшении вязкости в области высоких плотностей. Минимальный удельный выброс NO_x получается при плотности 790 кг/м³ и вязкости 0,0012 Па·с и составляет 1,61 г/(кВт·ч), что в 1,7 раз меньше максимального. При дальнейшем росте поверхностного натяжения удельный выброс оксидов азота с увеличением вязкости растет, а затем начинает снижаться в зависимости от значений плотности.

Влияние плотности, вязкости и поверхностного натяжения топлива на показатели рабочего процесса неоднозначно. Определяющее влияние на улучшение показателей рабочего процесса оказывает сочетание их значений. Во многом это связано с тем, что процессы смесеобразова-

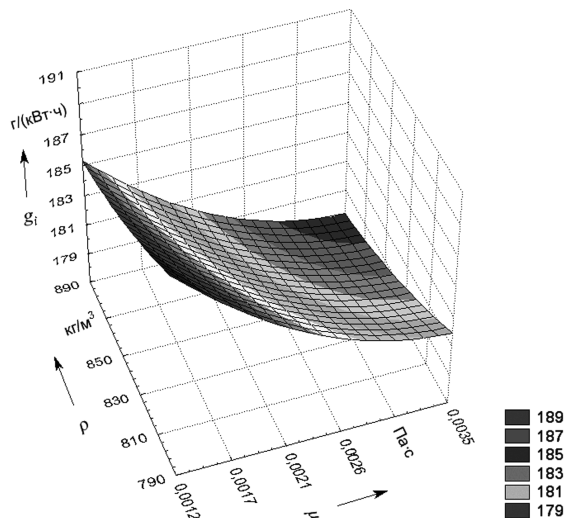


Рис.2. Зависимость удельного индикаторного расхода топлива от плотности и вязкости при поверхностном натяжении 0,023 Н/м.

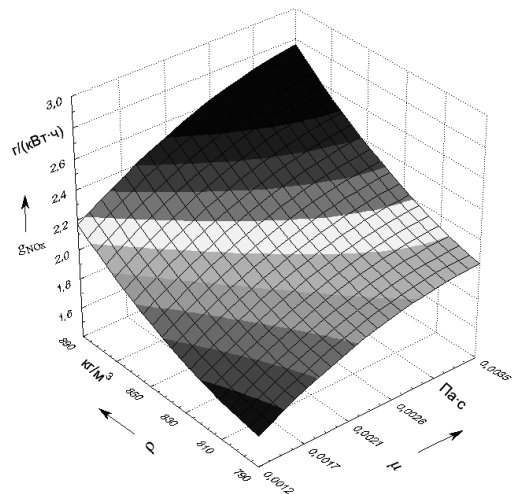


Рис.3. Зависимость удельного выброса оксидов азота от плотности и вязкости топлива при поверхностном натяжении 0,023 Н/м.

ния и сгорания существенно зависят от процессов впрыскивания и распыливания топлива, качество которых тесно связано с сочетанием значений данных свойств.

Проведенные исследования показали, что удельный индикаторный расход топлива снижается с уменьшением соотношения долей углерода и водорода в топливе при всех значениях доли кислорода рассматриваемого диапазона. Снижение g_i наблюдается и при уменьшении доли кислорода в топливе во всем диапазоне соотношения долей углерода и водорода. Изменение удельного выброса оксидов азота от соот-

ношения g_C/g_H зависит от содержания кислорода в топливе. Выбросы могут и расти, и падать с различной интенсивностью.

При выборе состава и свойств топлива необходимо учитывать изменение показателей рабочего процесса двигателя во всем диапазоне режимов его работы, разброс значений по режимам, возможность достижения требуемых показателей изменением регулировочных параметров двигателя.

Из проведенных исследований следует, что для дизельных двигателей целесообразно по сравнению с метанолом и этанолом использовать бутанол, состав и свойства которого обеспечивают лучшие топливно-экономические и экологические показатели двигателя.

Выводы

Разработана методика исследования, включающая компьютерную программу расчета рабочего процесса, модели течения топлива в носке распылителя и развития топливных струй в камере сгорания.

Установлены регрессионные зависимости удельного индикаторного расхода топлива и удельного выброса оксидов азота от элементного состава, плотности, вязкости и поверхностного натяжения топлива для режимов цикла ESC автомобильного дизеля 4ЧН11/12,5.

Уменьшение отношения долей углерода и водорода при одинаковом содержании кислорода улучшает показатели рабочего процесса. Наличие кислорода в топливе положительно влияет на протекание процесса сгорания, однако уменьшает теплотворную способность топлива.

Для дизелей целесообразно по сравнению с метанолом и этанолом использовать бутанол, состав и свойства которого обеспечивают лучшие топливно-экономические и экологические показатели двигателя.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / Под ред. В.Н.Луканина. М. : Высш. шк., 2005. 479 с.
2. Емельянов В.Е., Крылов И.Ф. Автомобильный бензин и другие виды топлива: свойства, ассортимент, применение. М. : Астрель: АСТ: Профиздат, 2005. 207 с.
3. Марков В.А., Патрахальцев Н.Н. Спиртовые топлива для дизельных двигателей. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2010. № 1. С. 22–26.
4. Автомобильный справочник. М. : За рулем, 2012. 1280 с.
5. Данилов А.М., Каминский Э.Ф., Хавкин В.А. Альтернативные топлива: достоинства и недостатки.

- Проблемы применения. *Рос. хим. журн.* 2003. № 6. С. 4–11.
6. Бобылев В.Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ : Справ. пособие. М. : Рос. хим.-технол. ун-т, 2003. 24 с.
 7. Мыслик, М.И., Свистула А.Е. Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания. *Ползуновский вестник*. 2009. № 1–2. С. 37–43.
 8. Матиевский Д.Д., Кулманаков С.С. Обеспечение перспективных экологических норм ДВС за счет применения смесевых биотоплив. *Двигатели внутреннего сгорания*. 2010. № 2. С. 96–99.
 9. Джерихов В.Б. Автомобильные эксплуатационные материалы. Ч. 1. Топлива : Учеб. пособие. СПб. : СПбГАСУ, 2008. 245 с.
 10. Rakopoulos D.C. Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*. 2010. № 89. P. 2781–2790.
 11. Wang J. Oxygenated blend design and its effects on reducing diesel particulate emissions. *Fuel*. 2009. № 88. P. 2037–2045.
 12. Dziegielewski W. Butanol/biobutanol as a component of an aviation and diesel fuel. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. Vol. 21, № 2. P. 69–75.
 13. Hönig V., Kotek M., Marik J. Use of butanol as a fuel for internal combustion engines. *Agronomy Research*. 2014. Vol. 12, № 2. P. 333–340.
 14. Кухаренок Г.М. Показатели рабочего процесса двигателя при работе на смесях бензина с бутанолом. *Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов*. Минск : Беларус. науч.-техн. ун-т, 2011. С. 260–264.
 15. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М. : Машиностроение, 1981. 160 с.
 16. Кухаренок Г.М., Гершань Д.Г. Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля. *Вестник Беларус. науч.-техн. ун-та*. 2011. № 4. С. 35–39.
 17. Кухаренок Г.М., Гершань Д.Г. Моделирование течения смесей дизельного топлива с бутанолом в носке распылителя форсунки. *Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов*. Минск : Беларус. науч.-техн. ун-т, 2015. С. 70–75.
 18. Hershman Dz. Coordination of fuel sprays characteristics with combustion chamber parameters. *12th EAEC 2009 European Automotive Congress. Final programme & Book of abstracts*. 2009. P. 57–58.

Поступила в редакцию 17.04.18

Бойченко С.В.¹, докт. техн. наук., проф.,
Кухарьенок Г.М.², докт. техн. наук., проф., **Гершань Д.Г.²**,
Черняк Л.Н.³, канд. техн. наук, **Шкільнюк І.О.³**

¹ **Жешувський технологічний університет, Жешув, Польща**

Алея Повстанців Варшави, 8, 359595 Жешув, Польща, e-mail: chemmotology@ukr.net

² **Білоруський національний технічний університет, Мінськ, Білорусь**
 пр-т Незалежності, 65, 220013 Мінськ, Республіка Білорусь, e-mail: kux@tut.by

³ **Національний авіаційний університет, Київ, Україна**

просп. Космонавта Комарова, 1, оф. 1.402, 03680, e-mail: chemmotology@ukr.net

Вплив складу та властивостей палива на робочий процес двигуна

Проведено розрахункові дослідження впливу складу та властивостей палива на робочий процес двигуна за розробленою методикою, що містить комп'ютерну програму розрахунку робочого процесу, моделі перебігу палива у носку розпилювача та розвитку паливних струменів у камері згорання. Отримано регресійні та графічні залежності питомої індикаторної витрати палива та питомого викиду оксидів азоту від елементного складу, щільності, в'язкості та поверхневого натягу палива для дизеля, які дозволяють оцінювати вплив вищезгаданих складу та властивостей на показники робочого процесу. Для дизельних двигунів доцільно у порівнянні з метанолом та етанолом використовувати бутанол, склад та властивості якого забезпечують кращі паливно-енергетичні та екологічні показники двигуна. *Бібл. 18, рис. 3, табл. 1.*

Ключові слова: паливо, склад, властивості, двигун, робочий процес.

Boichenko S.V.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, **Kukharenok G.M.²**,
Doctor of Technical Sciences, Professor, **Gershan D.G.²**, **Chernyak L.N.³**,
Candidate of Technical Sciences, **Shkilnyuk I.O.³**

¹ **Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland**

8, Al. Powstancow Warszawy, 359595 Rzeszow, Poland, e-mail: chemmotology@ukr.net

² **Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus**

65, Nezavisimosty Ave., 220013 Minsk, Belarus, e-mail: kux@tut.by

³ **National Aviation University, Kiev, Ukraine**

1, Cosmonavt Komarov Ave., 03680 Kiev, Ukraine, e-mail: chemmotology@ukr.net

Influence of the Composition and Fuel Properties on the Engine Working Process

Calculated studies of the influence of the composition and properties of fuel on the working process of the engine have been carried out according to the developed method, including a computer program for calculating of the working process, models for the flow of fuel in the nose of the fuel nozzle, and the development of fuel steam in the combustion chamber. Regression and graphical dependencies of the specific indicator fuel consumption and specific emission of nitrogen oxides on the elemental composition, density, viscosity and surface tension of the diesel fuel are obtained, which allow to evaluate the influence of the above composition and properties on the performance of the process. As a result of the conducted researches, it was concluded that for diesel engines it is better to use butanol, in comparison with methanol and ethanol, the composition and properties of which provide the best fuel-economic and ecological parameters of the engine. *Bibl. 18, Fig. 3, Tab. 1.*

Key words: fuel, composition, properties, engine, working process.

References

1. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. 1. Teoriya rabochih protsessov: uchebnik dlya vuzov. Ed. V.N.Lukanin. Moscow : Vysshaya shkola, 2005. 479 p. (Rus.)
2. Emelyanov V.E., Kryilov I.F. Avtomobilnyy benzin i drugie vidy topliva: svoystva, assortiment, primenenie. Moscow : Astrel: AST: Profizdat, 2005. 207 p. (Rus.)
3. Markov V.A., Patrahaltsev N.N. Spirtovyye topliva dlya dizelnykh dvigateley. *Transport na alternativnom toplive*. 2010. No. 1. P. 22–26. (Rus.)
4. Avtomobilnyy spravochnik : Translate from English. Moscow : Za rulem, 2012. 1280 s. (Rus.)
5. Danilov A.M., Kaminskiy E.F., Havkin V.A. Alternativnyye topliva: dostoinstva i nedostatki. Problemy primeneniya. *Rossiyskiy himicheskii zhurnal*. 2003. No. 6. pp. 4–11. (Rus.)
6. Bobilyov V.N. Fizicheskie svoystva naibolee izvestnykh himicheskikh veshchestv. Moscow : RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2003. 24 p. (Rus.)
7. Myisnik M.I., Svistula A.E. Analiz teplofizicheskikh svoystv alternativnykh topliv dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya. *Polzunovskiy vestnik*. 2009. No. 1–2. pp. 37–43. (Rus.)
8. Matievskiy D.D., Kulmanakov S.S. Obespechenie perspektivnykh ekologicheskikh norm dvs za schet primeneniya smesevykh biotopliv. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2010. No. 2. pp. 96–99. (Rus.)
9. Dzhirihov V.B. Avtomobilnye ekspluatatsionnyye materialy. Ch. 1. Topliva. Sankt-Peterburg : SPbGASU, 2008. 245 p.
10. Rakopoulos D.C. Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends. *Fuel*. 2010. No. 89. pp. 2781–2790.
11. Wang J. Oxygenated blend design and its effects on reducing diesel particulate emissions. *Fuel*. 2009. No. 88. pp. 2037–2045.
12. Dziegielewski W. Butanol/biobutanol as a component of an aviation and diesel fuel. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. 21 (2). pp. 69–75.
13. Hoenic V., Kotek M., Marik J. Use of butanol as a fuel for internal combustion engines. *Agronomy Research*. 2014. 12 (2). pp. 333–340.
14. Kuharenok G.M. Pokazateli rabocheho protsessa dvigatelya pri rabote na smesyah benzina s butanolom. *Sovershenstvovanie organizatsii dorozhnogo dvizheniya i perevozok passazhirov i gruzov*. Minsk : Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2011. pp. 260–264. (Rus.)
15. Zvonov V.A. Toksichnost dvigateley vnutrennego sgoraniya. Moscow : Mashinostroenie, 1981. 160 p. (Rus.)
16. Kuharenok G.M., Gershan D.G. Modelirovanie harakteristik toplivnykh struy i parametrov kamery sgoraniya dizelya. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 4. pp. 35–39. (Rus.)
17. Kuharenok G.M., Gershan D.G. Modelirovanie techeniya smesey dizelnogo topliva s butanolom v noske raspylatelya forsunki. Minsk : Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskii universitet, 2015. pp. 70–75. (Rus.)
18. Hershman Dz. Coordination of fuel sprays characteristics with combustion chamber parameters. 12th EAEC 2009 European Automotive Congress. Final programme & Book of abstracts. 2009. pp. 57–58.

Received April 17, 2018