

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-395-400>

УДК 621.43

## Влияние величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса

Канд. техн. наук, доц. Г. А. Вершина<sup>1)</sup>, асп. О. С. Быстренков<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019  
Belarusian National Technical University, 2019

**Реферат.** С течением времени к двигателям внутреннего сгорания предъявляется все больше требований, вызванных необходимостью экономии топлива, снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, повышения надежности работы, уменьшения габаритов и затрачиваемых материалов, массы, уровня шума, упрощения изготовления и эксплуатации. В городах, где количество двигателей очень велико, использование газа в качестве топлива позволяет значительно снизить загрязнение окружающей среды. В некоторых странах есть отдельные экологические программы, стимулирующие перевод двигателей с бензина на газ. Однако в настоящее время применение газовых двигателей на автомобильном транспорте ограничено, что связано с рядом проблем технического и эксплуатационного характера. С целью решения данной задачи и предотвращения возможных проблем на уже готовом двигателе прибегают к математическим расчетам и моделированию. В рамках исследования по установлению влияния величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса необходимо разработать соответствующую методику расчета. В связи с этим проведен анализ методик и программ расчета рабочего процесса двигателя, разработана методика расчета рабочего процесса газодизельного двигателя. Проведено расчетное исследование по разработанной методике. Установлено влияние величины запальной порции дизельного топлива на эффективные и экологические показатели работы двигателя. Расчет проводился для номинального режима работы двигателя, газовое топливо – пропан-бутан. В качестве исходных данных для расчета приняты конструктивные параметры двигателя ГД-243. Установлены следующие зависимости: по мере увеличения запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) наблюдается некоторое снижение мощности двигателя, а также при принятых условиях – рост  $\text{CO}_2$  при снижении  $\text{CO}$  и  $\text{NO}$ .

**Ключевые слова:** топливная экономичность, экологические требования, методика, исследование, уравнение, разработка, мощность, крутящий момент, расход топлива

**Для цитирования:** Вершина, Г. А. Влияние величины запальной порции дизельного топлива газодизельного двигателя на параметры его рабочего процесса / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 395–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-395-400>

## Influence of Diesel Fuel Ignition Portion Value on Working Process Parameters of Gas-Diesel Engine

G. A. Vershina<sup>1)</sup>, O. S. Bystrenkov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** More and more requirements are imposed to engines of internal combustion due to the passage of time. These requirements are caused by the necessity to save fuel, to reduce emissions of pollutants into the atmosphere, to improve operational reliability, to reduce size and cost of spent materials, weight, noise level, to simplify manufacturing and operational processes. Use of gas as a fuel in the cities where number of engines is extremely large can significantly reduce environmental pollution. Some countries have separate environmental programs that encourage transfer of engines from gasoline to gas.

### Адрес для переписки

Вершина Георгий Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-76-64  
oup@bntu.by

### Address for correspondence

Vershina Georgy A.  
Belarusian National Technical University  
65 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-76-64  
oup@bntu.by

At present, however, the use of gas engines in road transport is limited due to a number of technical and operational problems. Mathematical calculations and simulations are applied in order to solve this task and prevent possible problems in a manufactured. As part of the research to establish an influence of the diesel fuel ignition portion value in a gas-diesel engine on parameters of its operational process, it is necessary to develop an appropriate calculation method. In this regard, an analysis of methods and programs for calculation of the operational engine process has been carried out, and a method for calculation of an operational process for a gas-diesel engine has been developed in the paper. A computational study has been made in accordance with the developed methodology. The paper has revealed an influence of the diesel fuel ignition portion value on effective and environmental performance of an engine operation. The calculation has been performed for a nominal mode of the engine operation, gas fuel – propane-butane. Design parameters of a ГД-243-engine have been taken as initial data for the calculation. The following dependences have been established: as a diesel fuel ignition portion is increasing (replacement proportion of gas fuel with diesel), there is some decrease in engine power, and under the accepted conditions, there is an increase in CO<sub>2</sub> with a decrease in CO and NO.

**Keywords:** fuel efficiency, environmental requirements, methodology, research, equation, development, power, torque, fuel consumption

**For citation:** Vershina G. A., Bystrenkov O. S. (2019) Influence of Diesel Fuel Ignition Portion Value on Working Process Parameters of Gas-Diesel Engine. *Science and Technology*, 18 (5), 395–400. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-395-400> (in Russian)

## Введение

Научно-исследовательскими и конструкторскими организациями в области машиностроения накоплен большой опыт конструирования, доведения и введения двигателей в эксплуатацию. Найдены специальные методы расчета агрегатов, систем и элементов двигателей, способы подбора основных конструктивных корреляций, схем компоновки как всего двигателя, так и его узлов [1–4].

С ужесточением норм, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания, внедрялись каталитические системы доочистки, современные топливные системы, устройства для регулирования фаз газораспределения и систем турбонаддува, способы изменения степени сжатия двигателя, которые в совокупности дают двигателям возможность соответствовать данным нормам и современному уровню. Однако такое глубокое регулирование и управление двигателем сделали его конструкцию гораздо сложнее. Соответственно для ускорения процесса конструирования двигателя организации совершенствуют развитие этого процесса. С этой целью прибегают к развитию компьютерного моделирования:

- оно предоставляет данные, которые могут быть получены только при полном натурном исследовании двигателя с применением, в том числе, современных технологий лазерной диагностики;

- данная информация становится доступна на начальных стадиях конструирования, тогда как будущий двигатель изображен только на чертежах;

- комплексную информацию от сложной модели можно использовать на более мелких при

разработке алгоритмов регулирования и управления двигателем.

На современном этапе развития к двигателю предъявляются различные требования: необходимы высокая экономия топлива, соответствие экологическим стандартам, таким как снижение токсичности газов, выбрасываемых в атмосферу; повышение уровня безотказности в работе, компактность; уменьшение объема применяемых материалов, массы, уровня шума; упрощение изготовления и эксплуатации.

Цель исследований – составление методики расчета рабочего процесса газодизельного двигателя. Проведены расчеты по разработанной методике, которая применена в совокупности с методом расчета равновесного состава продуктов сгорания, определено влияние величины запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) на эффективные, экономические и экологические показатели работы двигателя.

## Основная часть

В настоящее время для решения столь широкого круга задач принято выделять две основные группы моделей, реализуемых в различных программных средах [5]: построение моделей ДВС, которые подходят к рассмотрению двигателя как к совокупности термодинамических систем; модели, основанные на задачах гидродинамики (известная в зарубежных источниках как Computational Fluid Dynamic, или CFD). При использовании последних весь двигатель разбивается на отдельные трехмерные элементы (рис. 1). Для каждого из элементов моделируется система уравнений сохранения энергии, массы, импульса и состояния.

Термодинамические модели ДВС развиваются и совершенствуются на протяжении более ста лет.



Рис. 1. Сетка для расчета

Fig. 1. Calculation grid

Наиболее известной и применяемой моделью является методика теплового расчета двигателя, разработанная еще в 1907 г. профессором В. И. Гриневецким. Метод основан на рассмотрении расчетного цикла, который отличается от действительного рядом допущений и упрощений. Берутся за основу положения термодинамики и термохимии. Следует отметить, что методика очень последовательна, достаточно полно и наглядно демонстрирует сущность происходящих в двигателе явлений. Дает возможность для проведения расчетных исследований, дополнения и совершенствования методики для решения более обширного круга задач. Надо сказать, что впоследствии над улучшением данной методики работали Н. Р. Брилинг, Е. Г. Мазинг, А. С. Кулешов, Н. Ф. Разлейцев, А. С. Орлин, Б. С. Стечкин и др.

В настоящее время крупнейшими научными организациями интенсивно разрабатываются программы по улучшению рабочих процессов ДВС на основе алгоритмов решения вопросов гидродинамики с применением моделей с движущейся стенкой. В данной модели может имитироваться подача топлива в цилиндры и коллекторы ДВС с последующим движением газовых потоков в объемной постановке. В различных отраслях наибольшее распространение получили такие программы, как STAR-CD (CD Adapco); FIRE (AVL); VECTIS (Ricardo); Fluent (FluentInc.) и KIVA (LosAlamosNationalLaboratory). Данное программное обеспечение может моделировать развитие течения газа и распыливаемого топлива в камере сгорания двигателя, движение топливных пленок, температурные поля и концентрацию рабочего тела в рабочем объеме (рис. 2). Развивается моделирование эмиссии сажи,  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ . Однако эти

задачи окончательно не решены применительно к саже и  $\text{CO}$ . Достоверность результатов расчета не всегда на высоком уровне. Существенную трудность при использовании CFD сегодня вызывают трудоемкость расчетов и необходимость применения суперкомпьютеров.

Каждая из данных групп моделей направлена на решение определенного круга задач.

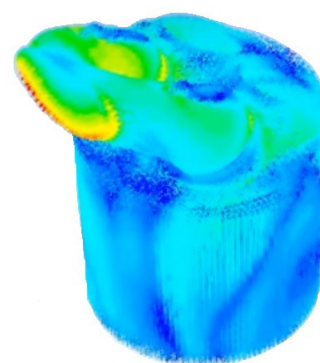


Рис. 2. Газодинамические процессы в цилиндре двигателя

Fig. 2. Gas-dynamic processes in engine cylinder

При разработке модели рабочего процесса газодизельного двигателя за основу была взята модель Гриневецкого – Мазинга [6]. Величина запальной порции дизельного топлива учитывалась при расчете теоретически необходимого количества воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг смеси жидкого и газового топлива

$$L_0 = qL_0^{\text{ж}} + (1-q)L_0^{\text{г}},$$

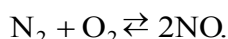
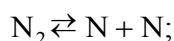
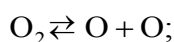
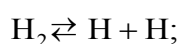
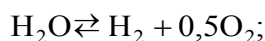
где  $q$  – величина запальной порции дизельного топлива, %;  $L_0$ ,  $L_0^{\text{ж}}$ ,  $L_0^{\text{г}}$  – теоретически необходимое количество воздуха (кмоль) для сгорания 1 кг смеси жидкого и газового топлива, жидкого топлива, газового топлива соответственно.

#### Методика расчета равновесного состава продуктов сгорания

При использовании данной методики возможно рассчитать концентрации 11 равновесных продуктов сгорания для смеси паров топлива с воздухом. Для проведения расчета должны быть известны значения коэффициента избытка воздуха, температуры и давления [7–9]. Данная модель позволяет достаточно точно рассчитать параметры процесса сгорания. Наиболее достоверные результаты получаются при выполнении расчетов по выявлению концентраций основных токсичных компонентов отработавших газов, таких как  $\text{CO}$  и  $\text{NO}$ .

Основные допущения в модели: продукты сгорания считаются идеальными газами, в системе процесс горения полностью завершен и установлено химическое равновесие между компонентами. В таком случае система определяется законами сохранения вещества, действующих масс и Дальтона.

После завершения процесса химическое равновесие между образующимися компонентами сгорания устанавливается по следующим реакциям:



В данных уравнениях можно видеть 11 компонентов, которые в наибольшей степени образуются после сгорания топлива и завершения всех реакций:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{N}$ . Для определения их концентраций требуется составить 11 уравнений. С этой целью используют четыре уравнения материального баланса и семь уравнений равновесия.

Уравнения материального баланса составляют по каждому элементу исходной смеси на основе неизменности числа атомов этих элементов в ходе реакции:

$$M_{\text{CO}_2} + M_{\text{CO}} = \frac{C}{12}(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{H}} + \frac{1}{2}M_{\text{OH}} = \frac{H}{2}(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{N}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{NO}} + \frac{1}{2}M_{\text{N}} = 0,79\alpha L_0(1 + \gamma_r);$$

$$M_{\text{CO}_2} + M_{\text{O}_2} + \frac{1}{2}M_{\text{CO}} + \frac{1}{2}M_{\text{H}_2\text{O}} + \frac{1}{2}M_{\text{O}} + \frac{1}{2}M_{\text{OH}} + \frac{1}{2}M_{\text{NO}} = \left(\frac{O}{32} + 0,21\alpha L_0\right)(1 + \gamma_r),$$

где  $C$ ,  $H$ ,  $O$  – массовые доли углерода, водорода и кислорода в 1 кг топлива;  $L_0$  – теоретически

необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива;  $\gamma_r$  – коэффициент остаточных газов;  $M_x$  – число молей соответствующих компонентов.

Уравнения равновесия, вытекающие из закона действующих масс, составляют по каждой реакции системы в следующем виде:

$$K_1 = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}}\sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{-0,5};$$

$$K_2 = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2}\sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{-0,5};$$

$$K_3 = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{OH}}\sqrt{M_{\text{H}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{-0,5};$$

$$K_4 = \frac{M_{\text{H}}}{\sqrt{M_{\text{H}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{0,5};$$

$$K_5 = \frac{M_{\text{O}}}{\sqrt{M_{\text{O}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{0,5};$$

$$K_6 = \frac{M_{\text{NO}}}{\sqrt{M_{\text{O}_2}M_{\text{N}_2}}};$$

$$K_7 = \frac{M_{\text{N}}}{\sqrt{M_{\text{N}_2}}} \left(\frac{P_z}{M_\Sigma}\right)^{0,5},$$

где  $K_x$  – константы равновесия химических реакций;  $M_\Sigma$  – общее число молей компонентов продуктов сгорания.

Константы равновесия можно рассчитать по следующим аппроксимирующим уравнениям в зависимости от температуры:

$$K_1 = 3,4447 \cdot 10^{-7} T_z^{0,6885} \exp\left(\frac{289322}{RT_z}\right);$$

$$K_2 = 24,142 \cdot 10^{-3} T_z^{-0,2421} \exp\left(\frac{247410}{RT_z}\right);$$

$$K_3 = 15,088 \cdot 10^{-4} T_z^{-0,1118} \exp\left(\frac{288568}{RT_z}\right);$$

$$K_4 = 13,1792 T_z^{0,4056} \exp\left(\frac{-218561}{RT_z}\right);$$

$$K_5 = 156,6265 T_z^{0,2126} \exp\left(\frac{-249964}{RT_z}\right);$$

$$K_6 = 6,0469 T_z^{-0,0322} \exp\left(\frac{-91235}{RT_z}\right);$$

$$K_7 = 79,8151 T_z^{0,2920} \exp\left(\frac{-475224}{RT_z}\right).$$

При математическом моделировании ДВС ставится задача не только расчета соответствующих процессов, но и применения данной модели для изучения и усовершенствования исследуемого объекта методами численных экспериментов. Таким образом, совместное использование методики расчета Гриневецкого – Мазинга в совокупности с методикой расчета равновесной концентрации продуктов сгорания позволяет определить влияние различных конструктивных параметров двигателя на эффективные, экономические и экологические показатели.

На основании данных методик было проведено моделирование рабочего процесса газодизельного двигателя, установлено влияние величины запальной порции дизельного топлива на эффективные и экологические показатели. В качестве исходных данных для расчета приняты конструктивные параметры двигателя ГД-243 [10].

Расчет проводился для номинального режима работы двигателя, газовое топливо – пропан-бутан. Принималось, что коэффициент избытка воздуха оставался неизменным и равным 1 при изменении порции дизельного топлива. При этом по мере увеличения порции дизельного топлива уменьшалась доля газового топлива, а диапазон парциальной доли дизельного топлива варьировался в пределах от 5 до 30 %.

Как показали исследования, по мере увеличения запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) наблюдается некоторое снижение мощности двигателя (рис. 3).

Происходит это вследствие того, что дизельное топливо обладает меньшим значением нижней теплоты сгорания, чем газовое, при

увеличении подачи дизельного топлива суммарная теплота сгорания смеси падает, что, в свою очередь, приводит к снижению температуры  $T_z$  и давления  $p_z$ .

Разумеется, пропорционально уменьшится часовой расход газового топлива и увеличится часовой расход дизельного топлива. В свою очередь, это приведет к изменению токсичных составляющих отработавших газов.

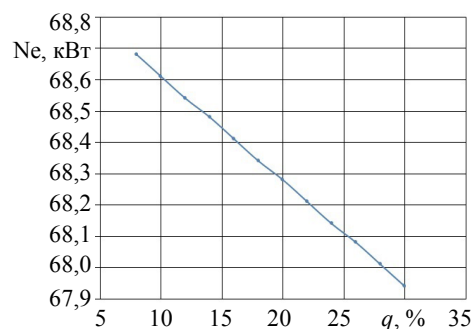


Рис. 3. Зависимость эффективной мощности газодизельного двигателя от величины запальной порции дизельного топлива

Fig. 3. Dependence of effective power for gas diesel engine on values of diesel fuel ignition portion

Зависимость концентраций основных токсичных компонентов отработавших газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  и  $\text{CO}_2$ ) от величины запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) приведена на рис. 4. Можно отметить, что вследствие снижения температуры с ростом величины запальной порции дизельного топлива наблюдается рост  $\text{CO}_2$  и снижение  $\text{CO}$  и  $\text{NO}$ .

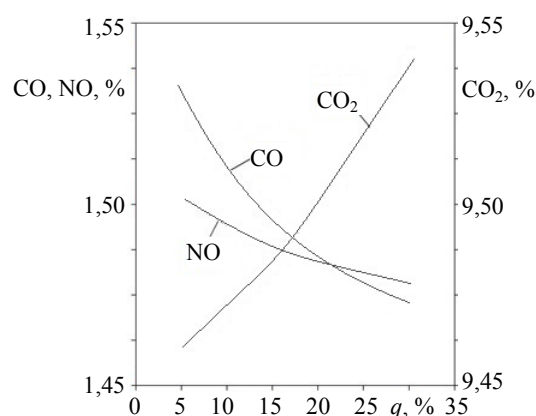


Рис. 4. Зависимость выбросов  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$  от величины запальной порции дизельного топлива

Fig. 4. Dependence of  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ -emissions on values of diesel fuel ignition portion

## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика расчета рабочего процесса газодизельного двигателя с учетом параметров равновесного состава продуктов сгорания отработавших газов, что позволяет определить эффективные показатели работы двигателя, а также величину выбросов вредных веществ отработавших газов.

2. Проведены расчетные исследования по влиянию величины запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) на эффективные и экологические показатели работы двигателя. По мере увеличения запальной порции дизельного топлива (доли замещения газового топлива дизельным) при принятых условиях наблюдается некоторое снижение мощности двигателя, а также рост  $\text{CO}_2$  при снижении  $\text{CO}$  и  $\text{NO}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чернецов, Д. А. Анализ процесса образования токсичных компонентов в камере сгорания дизельных двигателей / Д. А. Чернецов, В. П. Капустин // Вопросы современной науки и практики. 2011. № 1. С. 54–58.
2. Гиринович, М. П. Исследование процессов образования оксидов азота при сгорании топлив в перспективных дизелях / М. П. Гиринович. М.: Центр науч.-исслед. автомоб. и автотранспорт. ин-т, 2006. 17 с.
3. Сакулин, Р. Ю. Снижение эмиссии оксидов азота в ДВС с унифицированным рабочим процессом при работе на обводненном этаноле / Р. Ю. Сакулин. Уфа: Уфим. гос. авиац.-техн. ун-т, 2010. 17 с.
4. Салова, Т. Ю. Улучшение эксплуатационных показателей дизельных энергоустановок путем совершенствования смесеобразования и нейтрализации отработавших газов / Т. Ю. Салова. СПб., 1999. 397 с.
5. Кулешов, А. С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС / А. С. Кулешов. М., 2011. 235 с.
6. Расчет рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания: справ. пособие / под общ. ред. А. С. Орлина. 2-е изд., доп. М.: МАШГИЗ, 1958. 160 с.
7. Мехтиев, М. И. Методика, алгоритм и программа расчета равновесного состава продуктов сгорания топливовоздушной смеси на ЭВМ / М. И. Мехтиев, Х. Б. Багиров. Баку: Изд. АзПИ имени Ч. Ильдрыма, 1984. 31 с.
8. Звонов, В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
9. Warnatz, J. Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation / J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble. Berlin: Springer, 2006. 378 p.

10. Вершина, Г. А. Способы организации рабочего процесса газодизельного двигателя / Г. А. Вершина, О. С. Быстренков // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 383–390. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390>.

Поступила 27.11.2018

Подписана в печать 31.07.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

## REFERENCES

1. Tchernetsov D. A., Kapustin V. P. (2011) Analysis of Process on Formation of Toxic Components in Combustion Chamber of Diesel Engine. *Voprosy Sovremennoy Nauki i Praktiki = Problems of Contemporary Science and Practice*, (1), 54–58 (in Russian).
2. Girinovich M. P. (2006) *Investigations on formation Process of nitrogen Oxide During Fuel Combustion in Prospective Diesel Engines*. Moscow, Centre of Automobile Scientific Research and Automotive Engine Institute. 17 (in Russian).
3. Sakulin R. Yu. (2010) *Reduction in Nitrogen Oxide Emission in Internal Combustion Engine with Unified Operational Process while Using Watered Ethanol*. Ufa, Ufa State Aviation Technical University. 17 (in Russian).
4. Salova T. Yu. (1999) *Improvement of Operational Indices in Diesel Power Plants while Modernizing Mixture Formation and Neutralization of Waste Gas*. Saint-Petersburg. 397 (in Russian).
5. Kuleshov A. S. (2011) *Development of Methods for Calculation and Optimization of Operational Processes in Internal Combustion Engine*. Moscow. 235 (in Russian).
6. Orlin A. S., Kruglov M. G. (eds.) (1958) *Calculation of Operational Processes in Internal Combustion Engines*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, MASHGIZ Publ. 160 (in Russian).
7. Mekhtiev M. I., Bagirov Kh. B. (1984) *Methodology, Algorithm and Calculation Program for Equilibrium Composition of Fuel-Air Mixture Combustion Products while Using Computing Machine*. Baku, Publishing House of Azerbaijan Technical University named after Ch. Ildrym. 31 (in Russian).
8. Zvonov V. A. (1981) *Toxicity of Internal Combustion Engines*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 160 (in Russian).
9. Warnatz J., Maas U., Dibble R. W. (2006) *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Berlin, Springer. 378.
10. Vershina G. A., Bystrenkov O. S. (2017) Methods for Organization of Operational Process in Gas and Diesel Engine. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 383–390. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-383-390>.

Received: 27.11.2018

Accepted: 31.07.2019

Published online: 30.09.2019