

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.436

doi: 10.30987/2782-5957-2022-9-4-10

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ТИПА «COMMON RAIL» В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ AVL BOOST HYDSIM

Александр Алексеевич Обозов¹, Руслан Асланович Новиков^{2✉}, Павел Анатольевич Гришанов³

^{1,2,3} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ obozov51@mail.ru

² ranowikow@gmail.com

³ grishanov_1996@bk.ru

Аннотация

Цель исследования: моделирование гидродинамических процессов, происходящих в электромагнитной топливной форсунке дизеля с использованием программного комплекса (ПК) AVL Boost Hydsim.

Задача, решению которой посвящена статья: проектирование аппаратуры аккумуляторных систем впрыскивания и распыливания топлива типа «Common Rail»; описание методологии разработки аккумуляторных топливных систем с помощью ПК Hydsim.

Методы исследования: численное моделирование процесса топливоподачи на основе гидродинамических зависимостей, описывающих движение сжимаемой вязкой жидкости, в программной среде Hydsim.

Новизна работы: в связи с постоянным ужесточением экологических и технико-экономических требований к дизельным двигателям внутреннего сгорания (ДВС), которые напрямую зависят от совершенства системы топливоподачи, возникает необходимость в программном

инструменте, позволяющем инженерам производить проектирование соответствующей топливной аппаратуры. Также важно иметь эффективную и исчерпывающую методику работы с подобными программными решениями.

Результаты исследования: разработана модель электромагнитной топливной форсунки дизельного двигателя, в кратком изложении дана методика построения гидравлической модели форсунки (в двумерной постановке задачи) и анализ получаемых результатов моделирования.

Выводы: ПК AVL Boost Hydsim имеет ряд преимуществ по сравнению со своими конкурентами, которые позволяют существенно сократить время, затрачиваемое на проектирование и внедрение современной топливной аппаратуры, появляются возможности для динамического анализа гидравлических и гидромеханических систем двигателей.

Ключевые слова: двигатель, аппаратура, процесс, топливоподача, математическое моделирование.

Ссылка для цитирования:

Обозов А.А. Гидродинамический анализ процессов топливных систем типа «COMMON RAIL» в среде имитационного моделирования AVL BOOST HYDSIM / А.А. Обозов, Р.А. Новиков, П.А. Гришанов // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 9. – С. 4 – 10. doi: 10.30987/2782-5957-2022-9-4-10.

Original article

Open Access Article

HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF PROCESSES OF COMMON RAIL FUEL SYSTEMS IN AVL BOOST HYDSIM SIMULATION ENVIRONMENT

Abstract

The study objective is modeling hydro-dynamic processes occurring in an electro-magnetic diesel fuel injector using AVL Boost Hydsim software package (SP).

The task to which the paper is devoted is the design of equipment for Common Rail battery injection and fuel atomization systems; description of methods for developing battery fuel systems using Hydsim SP.

Research methods: numerical simulation of fuel supply based on hydrodynamic dependencies describing the compressible viscous fluid motion in Hydsim software environment.

Novelty of the work: due to constant tightening of environmental, technical and economic requirements for diesel internal combustion engines (ICE), which directly depend on the perfection of the fuel supply system, there is a need for software that allows engi-

neers to design the appropriate fuel equipment. It is also important to have an effective and comprehensive methodology for working with such software solutions.

Research results: a model of an electromagnetic fuel injector of a diesel engine is developed, a brief description is given of the methodology for constructing a hydraulic model of the nozzle (in a two-dimensional problem statement) and an analysis of the simulation results obtained.

Conclusions: AVL Boost Hydsim SP has a number of advantages over its competitors, which can significantly reduce the time spent on the design and implementation of modern fuel equipment, opportunities for dynamic analysis of hydraulic and hydromechanical engine systems appear.

Keywords: engine, equipment, process, fuel supply, mathematical modeling.

Reference for citing:

Obozov AA, Novikov RA, Grishanov PA. Hydrodynamic analysis of processes of COMMON RAIL fuel systems in AVL BOOST HYDSIM simulation environment. *Transport Engineering*. 2022; 9:4 – 10. doi: 10.30987/2782-5957-2022-9-4-10.

Введение

Создание современных высокоэффективных поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) начинается с проектных работ, выполняемых обычно в течение ограниченного времени. Для своевременного решения поставленных задач исследователям необходим инструмент, предоставляющий возможность на начальных этапах проектирования выполнить математические моделирование процессов, протекающих в топливоподающей аппаратуре (ТПА) ДВС.

Одной из наиболее популярных программ для расчета топливоподающей аппаратуры считается *AVL Boost Hydsim*, разработанная австрийской компанией *AVL* [1, 2]. Первоначально программный комплекс *HYDSIM* был разработан для моделирования топливных систем дизельных двигателей. В дальнейшем программа стала успешно использоваться для расчета систем топливоподачи бензиновых двигателей с искровым зажиганием, для определения характеристик впрыскивания альтернативного топлива и решения других

задач. Кроме того, ПК *HYDSIM* находит применение при расчетах гидравлических приводов клапанов, передач, машинных тормозных систем и приводов, то есть позволяет моделировать гидравлические и механические системы.

По сравнению со своими аналогами, такими как *Ricardo* (Англия) и *FAV Motorentchnik GmbH* (Германия), ПК *HYDSIM* обладает следующими преимуществами [3]:

- гибкие возможности моделирования;
- быстрый и надежный расчет;
- применение современных физических моделей;
- точные результаты расчета;
- простой и интуитивно понятный интерфейс;
- возможность оптимизация стратегии управления с помощью *MATLAB* и *Simulink*.

Основой физико-математического аппарата, применяемого в данном программном обеспечении являются законы

гидродинамики: для моделирования движения сжимаемой вязкой жидкости слу-

жит система уравнений Навье-Стокса (закон сохранения импульса):

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial y} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} &= -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\},$$

где x, y, z - координаты точки; P - давление жидкости; v - скорость движения; ρ - плотность; μ - коэффициент динамической вязкости жидкости; g - ускорение свободного падения.

уравнением неразрывности (уравнением Эйлера), которые в векторной форме имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{c} = 0.$$

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме имеет вид:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\rho g - \text{grad}P + \mu \Delta \vec{v}.$$

Возможно решение и более сложных многомерных задач гидродинамики с описанием процессов турбулентности, кавитации и т.д.

Нестационарное течение вязкой сжимаемой жидкости, описывается также

Описание процесса построения гидродинамической модели ТПА дизеля в среде HYDSIM

Проектирование топливной аппаратуры в среде HydSim начинается с построения гидромеханической схемы, отражающей функциональные зависимости между элементами форсунки (рис. 1) [2, 4, 5]. Первым шагом моделирования является создание общей топливной магистрали

(*Rail Pressure*), для которой устанавливается постоянное граничное давление. Следующей важной частью модели является магистраль высокого давления (*Injector Tube*), соединяющая штуцер форсунки с топливным аккумулятором высокого давления.

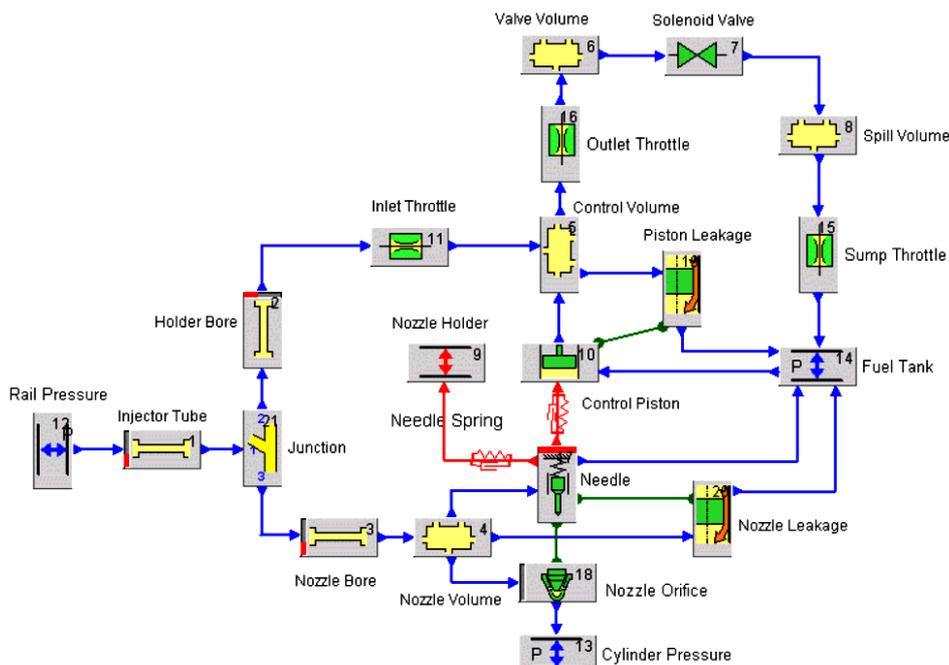


Рис. 1. Гидравлическая модель форсунки, построенная в среде моделирования HYDSIM
Fig. 1. Hydraulic model of the injector built in the HYDSIM simulation environment

В дальнейшем поток топлива на разветвлении (*Junction*) расходится в двух направлениях: одна ветвь проходит через топливный канал в корпусе форсунки (*Holder Bore*) и входной дроссель (*Inlet Throttle*) к управляющему объему (*Control Volume*). Другое ответвление направляет поток через корпус форсунки (*Nozzle Bore*) в полость распылителя (*Nozzle Volume*) и далее непосредственно к самому распылителю (*Nozzle Orifice*).

На рисунке 1 для объема в распылителе находятся необходимые соединения с иглой (*Needle*) и отверстиями распылителя. Для сопловых отверстий построена гидравлическая связь с давлением в цилиндре двигателя (*Cylinder Pressure*), таким образом устанавливается граничное условие в виде постоянного давления со стороны объема цилиндра. В связи с этим нужно определить и задать среднее давление в цилиндре за время впрыскивания (в настоящем примере, 100 бар). Управляющий объем соединен с одной стороны с поршнем управления (*Control Piston*), а с другой - с выходным дросселем (*Outlet Throttle*) большей площади сечения, чем входной дроссель. Выходной дроссель соединен через небольшую полость клапана (*Valve Volume*) с регулирующим дросселем (*Solenoid Valve*). В схеме данный дроссель является заменой электромагнитному кла-

пану дизельной форсунки, он управляет закрытием и открытием слива топлива. Линия слива представляет собой выходной объем (*Spill Volume*), дроссель слива (*Sump Throttle*) и топливный бак (*Fuel Tank*).

На схеме показана связь иглы и управляющего поршня с топливным баком, для которого задано постоянное граничное давление. Рассматриваемые до сих пор связи между элементами являются гидравлическими. Для них нет необходимости вводить начальные данные. Гидравлические связи дополняются механическими, например, игла имеет две механические связи: одна - через пружину форсунки и другая - жесткий стержень, обозначающая взаимодействие иглы с поршнем управления. Для механических соединений необходимо ввести исходные данные. Пружина иглы прилегает к неподвижной опоре (*Nozzle Holder*), которая моделируется как жесткая механическая граница.

Утечки топлива через направляющую иглы и управляющий поршень моделируются двумя элементами: утечки через направляющую иглы (*Nozzle Leakage*) и утечки через поршень управления (*Piston Leakage*). Для обозначения элемента утечек имеются специальные связи для иглы и для управляющего поршня. Игла также имеет специальную связь с сопловыми отверстиями.

Элементы интерфейса и представление результатов моделирования

На рис. 2 представлены элементы интерфейса, предусмотренного для ввода исходных данных для расчета распылителя

форсунки. Результаты расчетов ПК *HYDSIM* представляются в табличной форме и форме графиков (рис.3).

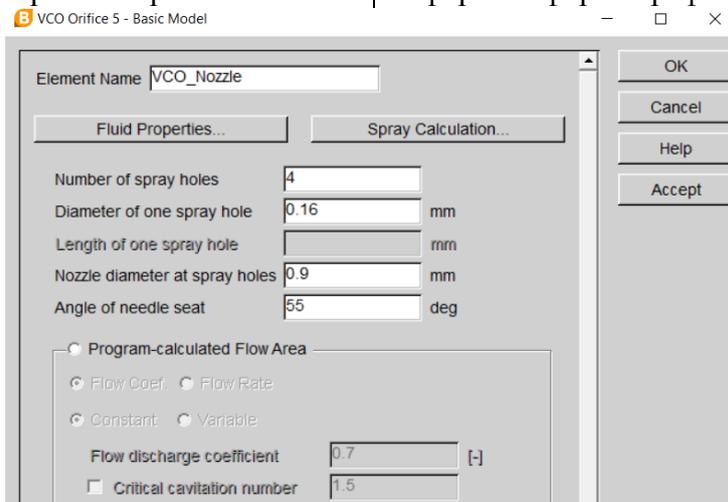


Рис. 2. Пример меню для ввода исходных данных ПК *HYDSIM*
 Fig. 2. Example of a menu for entering the initial data of the PC *HYDSIM*

В качестве примера приведены временные характеристики таких важных параметров, получаемых в результате моделирования, как средний диаметр капли топлива по Заутеру (параметр определяет скорость протекания процессам сгорания в цилиндре), координата вершины топливного факела, угол раскрытия топливного факела (данные параметры определяют степень равномерности распределения топлива внутри камеры сгорания цилиндра).

Программа позволяет пользователю представить на графиках: характер изменения давлений в полостях форсунки; потоки топлива; подъем иглы форсунки и поршня управления; дифференциальную и интегральную характеристики впрыскивания топлива; количественную оценку протечек в системе и др. Возможно получение отчетов по каждому из элементов электромагнитной форсунки представленных на схеме.

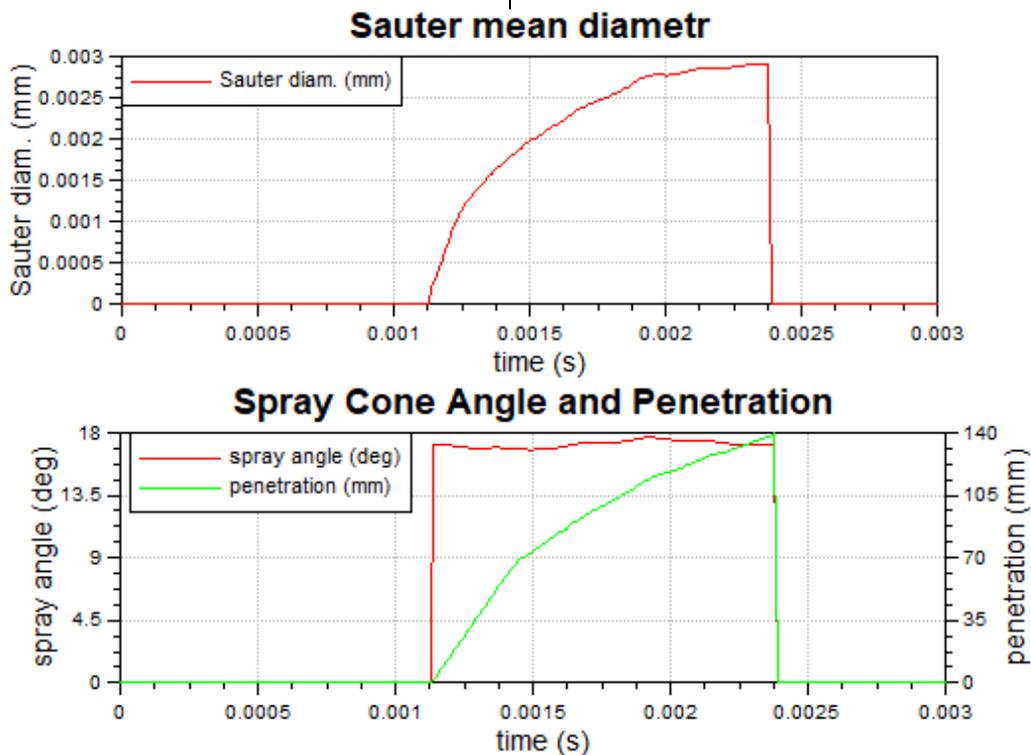


Рис. 3. Изменение среднего диаметра капли топлива (по Заутеру), угла конуса топливного факела и координаты вершины топливного факела в функции от времени
 Fig.3. Change in the average diameter of a fuel drop (according to Sauter), the angle of the cone of the fuel flame and the coordinates of the top of the fuel flame as a function of time

После проведения расчета ПК HYDSIM предоставляет широкие возможности по формированию различных отчетов по каждому элементу гидравлической

системы. Также представляется возможность сгенерировать 2D-анимацию процесса впрыскивания топлива (рис 4.)

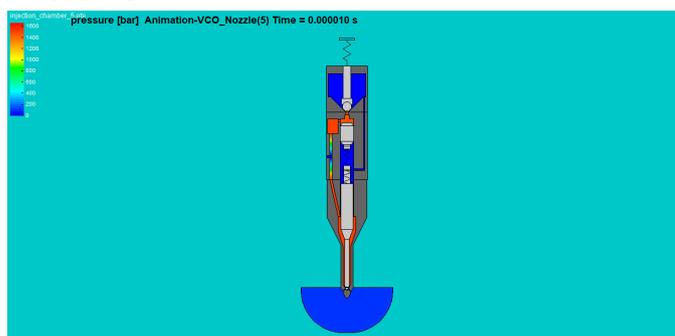


Рис. 4. Анимационное представление процесса топливоподачи в ПК HYDSIM
 Fig. 4. Animation of the fuel supply process in the HYDSIM PC

Результаты моделирования процессов в ПК *HYDSIM* позволяют решать задачи оптимизационного характера, связанные с улучшением процесса смесеобразования и последующего сгорания в цилиндре дизеля, а также оптимизации формы камеры сгорания. Осуществляется взаим-

Заключение

Для достижения всех предъявляемых к дизелям требований, таких как снижение расхода топлива, улучшение показателей экологичности, повышение надежности ДВС, двигателестроительные компании всего мира ведут постоянный поиск технологических решений для снижения трудоемкости производства новой продукции. Общеизвестным фактом является то, что при проектировании нового продукта в условиях ограниченности времени, добиться успеха возможно лишь при принятии правильных и последовательных решений на этапе концептуальной разработки. Благодаря ПК *AVL Boost Hydsim* суще-

ная адаптация процессов впрыскивания топлива и процессов, происходящих в камере сгорания, что в конечном итоге дает возможность улучшить экономические и экологические показатели дизельного двигателя.

ственно сокращается время, затрачиваемое на проектирование и внедрение современной топливной аппаратуры, появляются возможности для динамического анализа гидравлических и гидромеханических систем двигателей.

В дальнейшем для более детального исследования впрыскивания и распыливания топлива в камере сгорания дизеля и дальнейшего расчета смесеобразования и сгорания топливовоздушной смеси возможна интеграция модуля *HYDSIM* с такими программными инструментами как *ANSYS* или *FIRE*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Скрипник А.А. Программное обеспечение для моделирования силовых агрегатов: ноу-хау AVL в увеличении доли исследовательских работ на ранних стадиях проектирования. ООО «АПС Консалтинг». Москва. – URL: http://www.aps-c.ru/publications/AVL_simulation_technologies_wi_th_FM.pdf
2. Шишиков В.В. Автоматизированное проектирование двигателей: методические указания / сост. В.В. Шишков. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. 26 с.
3. MathWorks. Simulate transient behavior of hydraulic system, especially for fuel injection system. [Электронный ресурс]. URL: https://uk.mathworks.com/products/connections/product_detail/avl-boost-hydsim.html
4. Punov P. Research the fuel injection characteristics of a common-rail solenoid injector. *Departement of Combustion Engines, Automobiles and Transport*. Technical University, Sofia, Bulgaria. Proceedings of BulTrans, 2015. pp. 153-158.
5. Čaika V., Sampl P., Tatschl R., Krammer J. et al. Coupled 1D-3D Simulation of Common Rail Injector Flow Using AVL HYDSIM and FIRE. SAE Technical Paper 2009-24-0029, 2009.
6. Seungwoo Hong, Jaewook Shin and M. Sunwoo, "Common rail pressure controller for diesel engines using an empirical model," 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012, pp. 887-892.
7. K. Matkovic, M. Jelovic, J. Juric, Z. Konyha and D. Gracanin, "Interactive visual analysis and exploration of injection systems simulations," VIS 05. IEEE Visualization, 2005., 2005, pp. 391-398.
8. S. abo-Elfadl, A. S. Ali and M. H. Siliman, "Modeling and simulation of the common rail fuel injection system of the diesel engine," 2017 13th International Computer Engineering Conference (ICENCO), 2017, pp. 134-140.
9. Chen Y. and Heister S.D., Modeling Cavitating Flows in Diesel injectors. Atomization and Sprays, Volume 6, pp. 709-726.
10. AVL HYDSIM, User's Guide, Graz 2009.

REFERENCES

1. Skripnik AA. Software for modeling power units: AVL know-how in increasing the share of research at the early stages of design [Internet]. Moscow: ООО "APS Consulting". Available from: http://www.aps-c.ru/publications/AVL_simulation_technologies_wi_th_FM.pdf
2. Shishikov VV. Automated engine design: manual. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center; 2015.
3. MathWorks. Simulate transient behavior of hydraulic system, especially for fuel injection system [Internet]. Available from: https://uk.mathworks.com/products/connections/product_detail/avl-boost-hydsim.html

4. Punov P. Investigation of fuel injection characteristics of the common rail electromagnetic nozzle. Department of Internal Combustion Engines, Automobiles and Transport. Sofia (Bulgaria): Technical University; Proceedings of BulTrans; 2015. p. 153-158.
5. Čaika V, Sampl P, Tatschl R, Krammer J. Simulation of Common Rail Injector Flow Using AVL HYDSIM and FIRE. SAE Technical Paper 2009-24-0029; 2009.
6. Seungwu Hong, Javuk Shin, Sunwu M. Common rail Pressure Regulator for Diesel Engines using an empirical model. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference; 2012. p. 887-892.
7. Matkovich K, Elovich M, Yurich J, Koniha Z, Grachanin D. Interactive visual analysis and simulation study of injection systems: VIS 05. Visualization IEEE; 2005. p. 391-398.
8. Abo-Elfadl S, Ali AS, Siliman MH. Modeling and simulation of common rail fuel injection system of the diesel engine. 13th International Conference on Computer Engineering 2017 (ICENCO); 2017, p. 134-140.
9. Chen Y, Heister SD. Modeling Cavitating Flows in Diesel injectors. Atomization and Sprays; Volume 6. p. 709-726.
10. AVL HYDSIM: user manual. Graz; 2009.

Информация об авторах:

Обозов Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловые двигатели», тел. +7 (962) 133 62 05.

Obozov Aleksandr Alekseevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat Engines; phone: +7 (962) 133 62 05.

Novikov Ruslan Aslanovich, Post graduate of the Department of Heat Engines; phone: +7 (903) 818 26 03.

Новиков Руслан Асланович, аспирант кафедры «Тепловые двигатели», тел. +7 (903) 818 26 03.

Гришанов Павел Анатольевич, аспирант кафедры «Тепловые двигатели», тел. +7 (900) 356 22 04.

Grishanov Pavel Anatolyevich, Post graduate of the Department of Heat Engines; phone: +7 (900) 356 22 04.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 06.05.2022; одобрена после рецензирования 25.05.2022; принята к публикации 25.08.2022. Рецензент – Заикин А.Н., доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортно-технологические машины и сервис», Брянского государственного инженерно-технологического университета.

The article was submitted to the editorial office on 06.05.2022; approved after review on 25.05.2022; accepted for publication on 25.08.2022. The reviewer is Zaikin A.N., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service at Bryansk State Technical University.