

УДК 621.436

Метод реконструкции исходных данных для составления математических моделей дизелей

А.Г. Кузнецов, А.С. Кулешов, С.В. Харитонов

При создании математических моделей комбинированных двигателей первостепенную роль играет получение исходной информации, что сопряжено с большими трудностями. В статье предложен метод реконструкции исходных данных при создании таких моделей путем расчетного получения необходимых характеристик с помощью компьютерных программ моделирования рабочего процесса. Для реализации данного подхода целесообразно использовать программный комплекс «ДИЗЕЛЬ-РК», который в настоящее время находит широкое применение при проектировании комбинированных двигателей как в нашей стране, так и за рубежом. С помощью этого программного комплекса воссоздан рабочий процесс дизеля номинальной мощностью 505 кВт, предназначенного для использования на транспортной установке. Выполнен расчет параметров рабочего процесса для различных режимов работы двигателя и приведены его нагрузочные характеристики, построенные по результатам расчетов. Результаты моделирования показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтвердило правомочность использования предложенного метода реконструкции исходных данных при создании математических динамических моделей комбинированных двигателей.

Ключевые слова: комбинированный двигатель, моделирование, рабочий процесс, программный комплекс.

An initial data reconstruction method for developing mathematical models of diesel engines

A.G. Kuznetsov, A.S. Kuleshov, S.V. Kharitonov

When developing mathematical models of compound engines, finding initial information is of paramount importance, which can be a major challenge. This paper proposes a method for reconstructing initial data by calculating the required characteristics with the help of computer simulation software. To implement this approach, it is recommended to use the software package «DIESEL-RK», which is currently being widely used in the design of compound engines both in our country and abroad. Using this software, the operation of a 505 kW diesel engine to be installed on transport facilities is simulated. The operation parameters are calculated and the load characteristics of the engine are determined on the basis of the results of calculations. The proposed method of reconstructing initial data can be used to develop mathematical models intended for modeling operation modes of compound engines.

Keywords: compound engine, modeling, operation mode, software package.



КУЗНЕЦОВ
Александр Гаврилович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KUZNETSOV
Aleksandr Gavrilovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



КУЛЕШОВ
Андрей Сергеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KULESHOV
Andrey Sergeevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ХАРИТОНОВ
Сергей Викторович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

KHARITONOV
Sergey Viktorovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

В настоящее время перспективным методом, используемым при разработке двигателей транспортных установок и их систем управления, является полунатурное моделирование, в рамках которого натурные элементы системы управления сопрягаются с компьютерной моделью двигателя и энергетической установки [1]. Такой подход позволяет одновременно проводить проектирование двигателя и системы управления, что сокращает время разработки и обеспечивает экономию материальных затрат на испытания и доводку системы управления.

Особенностью полунатурного моделирования является совместное функционирование натурной и компьютерной частей моделирующего стенда в условиях, имитирующих реальные режимы работы, что накладывает соответствующие требования на вид модели двигателя: быстродействие модели должен обеспечивать расчет динамических характеристик двигателя и энергетической установки в масштабе реального времени. Для обеспечения достаточного быстродействия такие модели строятся на базе предварительно полученных функциональных зависимостей между параметрами рабочего процесса комбинированного двигателя, необходимых для расчета как статических, так и динамических режимов [2, 3].

При создании математических моделей комбинированных двигателей первостепенную роль играет вопрос получения исходной информации. Одна из проблем заключается в том, что для описания динамических режимов работы требуются характеристики двигателя, которые не могут быть получены при обычных статических испытаниях. Специальные испытания двигателей с имитацией динамических режимов на практике проводятся редко, так как их организация сопряжена со значительными трудностями. Другая проблема возникает в случае, когда разработчик не имеет возможности получить информацию по агрегатам комбинированного двигателя в достаточном объеме, например, при создании энергетической

установки с двигателем зарубежного производства. Указанные трудности можно преодолеть методом реконструкции исходных данных путем расчетного получения необходимых характеристик с помощью компьютерных программ моделирования рабочего процесса комбинированного двигателя [4–6].

Одной из современных компьютерных программ расчета рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которая может быть использована при реконструкции исходных данных для динамических математических моделей, является программный комплекс «ДИЗЕЛЬ-РК» [7–9], основу которого составляют следующие теоретические положения.

Среди методов расчета рабочего процесса ДВС в настоящее время наиболее широкое распространение получили методы, основанные на представлении цилиндра и коллекторов двигателя в виде незамкнутых термодинамических систем, обменивающихся массой и энергией. Параметры газа в этих системах описываются дифференциальными уравнениями сохранения массы и энергии и уравнением состояния. Для сокращения времени счета и сохранения высокой точности в программном комплексе реализован метод, основанный на пошаговом определении параметров газа в открытой термодинамической системе путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений, полученных преобразованием разностных уравнений баланса массы и энергии и уравнения состояния, записанных для произвольного термодинамического процесса. При записи исходной системы разностных уравнений сделаны общепринятые в таких случаях допущения: об однородности термодинамической системы, о справедливости уравнения состояния Менделеева—Клапейрона, о зависимости свойств рабочего тела от состава и температуры. Исходная система уравнений имеет вид

$$U_2 - U_1 = - \int_{V_1}^{V_2} p dV + \sum I_j^* + Q_x - Q_w;$$

$$G_2 - G_1 = \sum \Delta G_j;$$

$$pV = GRT,$$

где $\int_{V_1}^{V_2} p dV$ — механическая работа, совершаемая

рабочим телом; I_j^* — энтальпия рабочего тела, подведенная к системе в результате добавления массы ΔG_j от j -го источника массы; Q_x — количество теплоты, подведенной к рабочему телу от постороннего источника (вследствие сгорания топлива); Q_w — количество теплоты, отведенной в стенки; p, T, G, V, U, R — соответственно давление, температура, масса, объем, внутренняя энергия и газовая постоянная рабочего тела. Индексы «1» и «2» относятся соответственно к началу и концу рассматриваемого термодинамического процесса.

При рассмотрении процессов газообмена принято допущение об идентичности работы цилиндров двигателя, поэтому в программном комплексе используется квазистатическая модель газообмена. Объемы коллекторов рассматриваются как единичные ячейки, для них приняты те же допущения, что и для цилиндра: о мгновенном распространении возмущений; о мгновенном перемешивании; о независимости параметров газа от координат.

Параметры газа в коллекторах определяются из системы уравнений сохранения массы и энергии для открытой термодинамической системы:

$$\begin{cases} \Delta U = -Q_w + \sum_{j=1}^n I_j^*; \\ \Delta G = \sum_{j=1}^n G_j; \\ pV = GRT, \end{cases}$$

где G_j — масса, поступившая из компрессора или ушедшая в турбину. При расчете энтальпии протекающего через канал газа учитывается теплообмен со стенками канала.

Описание процесса сгорания в дизеле проводится на основе многозонной модели топ-

ливной струи, предложенной профессором Н.Ф. Разлейцевым [10], которая позволяет учесть особенности взаимодействия струи со стенками камеры сгорания. Модель Разлейцева дополнена подмоделями развития тангенциального воздушного вихря и взаимодействия струй и пристеночных потоков с этим вихрем, возможностью учета движения поршня и произвольной формы камеры сгорания, а также уточненной методикой расчета периода задержки самовоспламенения, которая используется для оценки задержки воспламенения каждой порции многофазового впрыска.

Согласно этой модели, струя в своем развитии проходит три стадии:

- 1) начальное образование плотного осевого потока воздуха и капель;
- 2) развитие кумулятивной струи с торможением и разрушением осевого потока в переднем фронте;
- 3) взаимодействие струи со стенками камеры сгорания и распределение уплотненного топливогазового слоя вдоль стенок. Форма пристеночного пятна и скорость его растекания в различных направлениях зависят от угла встречи струи со стенкой и влияния воздушного вихря.

При расчете движения каждой элементарной порции топлива от распылителя к вершине струи (с учетом переноса и деформации струи вихрем) методика позволяет определить распределение топлива в каждой из характерных зон, на которые разбивается струя.

Расчет тепловыделения в камере сгорания дизеля строится на предположении, что во время впрыска и развития струй скорость сгорания лимитируется в основном скоростью испарения. По распределению топлива по характерным зонам топливной струи рассчитывается скорость испарения, и далее, скорость сгорания с учетом основных влияющих факторов.

При расчете скорости тепловыделения используется распространенное допущение о разделении процесса сгорания на четыре основные стадии, которые отличаются своими физическими и химическими особенностями, лимитирующими скорость процесса: период за-

держки самовоспламенения; выгорание топлива, испарившегося за период задержки (объемное сгорание); выгорание впрыскиваемого топлива (диффузионное сгорание); догорание после впрыска.

Расчет параметров турбин и компрессоров, входящих в состав комбинированного двигателя, осуществляется путем согласования характеристик турбин и компрессоров с поршневой частью (характеристики турбин и компрессоров задаются в формате стандарта SAE, который является общепринятым в мировой практике). Расчет показателей турбин и компрессоров проводится по методике, использующей сплайн-интерполяцию их универсальных характеристик.

Приведенные выше методики и алгоритмы расчета рабочих процессов в ДВС реализованы в компьютерной программе «ДИЗЕЛЬ-РК» [7–9], разработанной для операционных систем Windows XP и Windows 7.

В данной работе приведены результаты реконструкции исходных данных при создании математической модели дизеля LIEBHERR 8V D508, который планируется использовать в качестве источника энергии для транспортной установки. Основной исходной информацией для проведения расчетов рабочего процесса двигателя является характеристика дизеля LIEBHERR 8V D508 в виде зависимости крутящего момента M_e от частоты вращения n с нанесенными линиями постоянных значений удельного эффективного расхода топлива g_e (рис. 1).

Характеристики компрессора и турбины взяты на официальном сайте компании Garrett с соответствующим масштабированием [11].

Параметры топливоподающей аппаратуры, камеры сгорания, системы газообмена, фазы газораспределения, системы охлаждения двигателя и системы охлаждения наддувочного воздуха были приняты по результатам работы программы Wizard of New Project Creation, входящей в состав программного комплекса «ДИЗЕЛЬ-РК». Эта программа использует базу данных выполненных конструкций и пересчитывает характерные размеры под требуемый типоразмер с учетом технического уровня из-

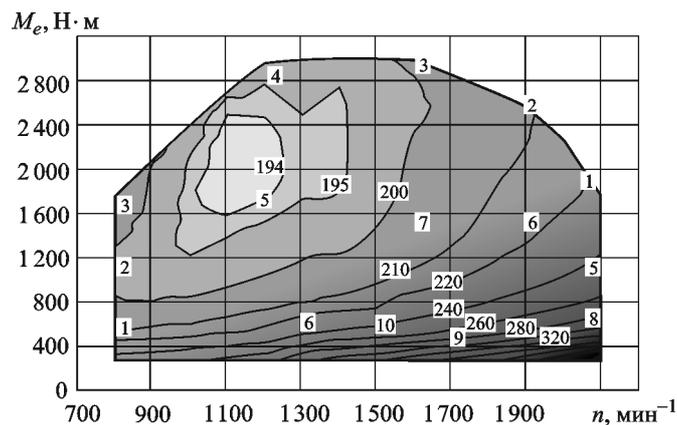


Рис. 1. Характеристика дизеля LIEBHERR 8V D508

делия. Для каждого режима работы дизеля подбирался угол опережения впрыска топлива.

С помощью программы «ДИЗЕЛЬ-РК» с использованием имеющихся материалов, описывающих устройство и конструкцию двигателя, был воссоздан рабочий процесс дизеля LIEBHERR 8V D508 номинальной мощностью 505 кВт. Конфигурация камеры в поршне, конфигурация распылителя, фазы газораспределения и конфигурация впускных и выпускных клапанных каналов, а также степень сжатия и эффективность охладителя наддувочного воздуха приняты по аналогии с двигателями аналогичного типоразмера.

С использованием программы «ДИЗЕЛЬ-РК» выполнен расчет параметров рабочего процесса в точках, охватывающих все области поля режимов работы двигателя. В качестве примера на рис. 2 приведены нагрузочные характеристики двигателя, построенные по результатам расчетов, в виде зависимостей от эффективной мощности N_e следующих параметров рабочего процесса: крутящего момента M_e , индикаторного η_i и эффективного η_e КПД дизеля, коэффициента избытка воздуха α , расхода воздуха через двигатель G_b , частоты вращения вала ротора турбокомпрессора n_r , давления наддува p_k , давления газов перед турбиной p_r .

Данные расчетов использовались для формирования функциональных зависимостей, которые вошли в состав математической динамической модели дизеля LIEBHERR 8V D508. В качестве примера построения используемых в модели характеристик на рис. 3 и 4 приведе-

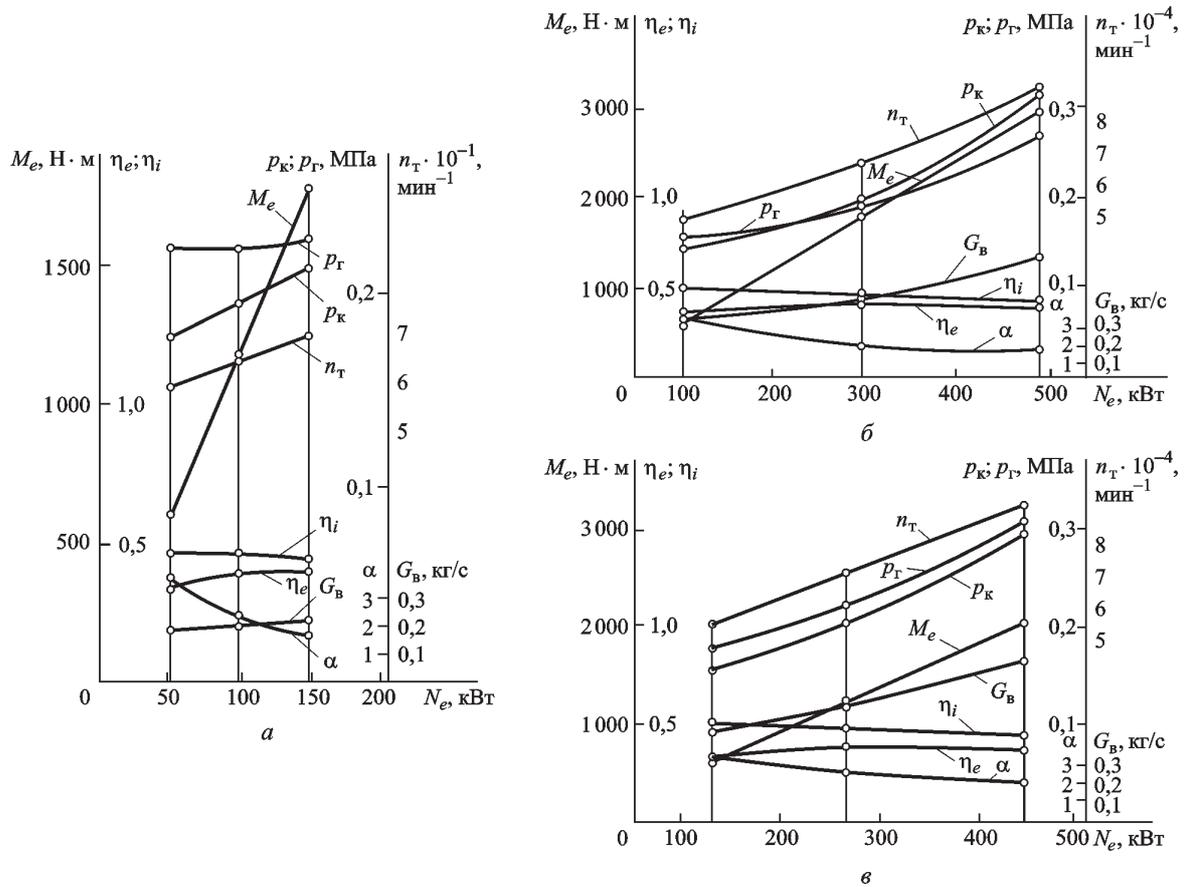


Рис. 2. Нагрузочная характеристика:

a — $n = 800 \text{ мин}^{-1}$; б — $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$; в — $n = 2100 \text{ мин}^{-1}$

ны поверхности зависимостей индикаторного КПД η_i дизеля от угловой скорости вала ω и коэффициента α избытка воздуха (см. рис. 3), расхода G_k воздуха через компрессор от угловой скорости ω_r ротора турбокомпрессора и давления p_k наддува (см. рис. 4).

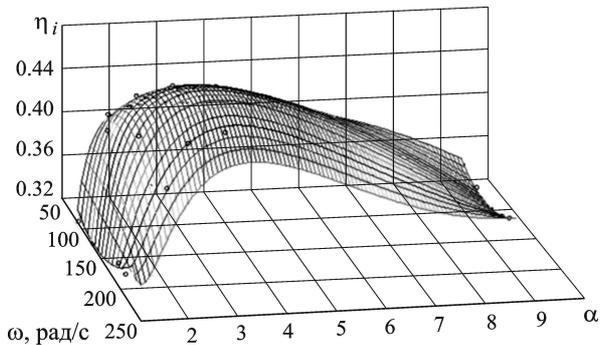


Рис. 3. Индикаторный КПД дизеля

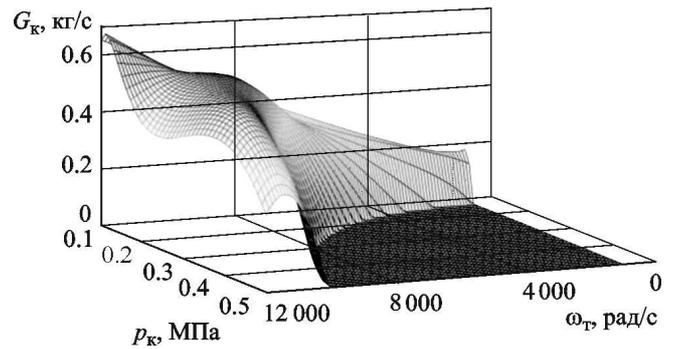


Рис. 4. Расход компрессора

С использованием разработанной модели дизеля LIEBHERR 8V D508 проведено моделирование изменения параметров рабочего процесса дизеля на динамических режимах при исследовании работы системы управления энергетической установкой. Результаты моделирования показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтвердило правомоч-

ность использования предложенного метода реконструкции исходных данных при создании математических динамических моделей комбинированных двигателей.

Выводы

1. Разработан метод реконструкции исходных данных, необходимых для создания математических моделей дизелей с турбонаддувом, с помощью программного комплекса расчета рабочего процесса двигателей «ДИЗЕЛЬ-РК».

2. При использовании разработанного метода воссоздан рабочий процесс дизеля транспортно-го типа мощностью 505 кВт.

3. Получены характеристики функциональных зависимостей между параметрами рабочего процесса, вошедших в состав математической динамической модели дизеля.

Литература

- [1] Кузнецов А.Г., Трифонов В.Л. Разработка стенда полунатурного моделирования энергетической установки с дизелем. *Актуальные проблемы развития поршневых ДВС*: Мат. межотрасл. науч.-тех. конф. Санкт-Петербург, 2008, с. 96–98.
- [2] Кузнецов А.Г. Динамическая модель дизеля. *Автомобильная промышленность*, 2010, № 2, с. 30–33.
- [3] Бокоников А.Н., Кузнецов А.Г. Математическая модель системы воздухообеспечения автомобильного дизеля для полунатурного моделирования его динамических режимов. *Грузовик*, 2009, № 11, с. 30–33.
- [4] Lauer T. CFD Helps make engines more efficient. *Dynamics*, 2012, issue 12.01, pp. 35–36.
- [5] KIVA-4, Los Alamos National Laboratory. URL: <http://www.lanl.gov/orgs/tt/license/software/kiva> (дата обращения 10 февраля 2014).
- [6] AVL FIRE ® Product description. URL: <http://www.avl.com/web/ast/fire> (дата обращения 10 февраля 2014).
- [7] DIESEL-RK is an engine simulation tool. URL: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru> (дата обращения 10 февраля 2014).
- [8] Кулешов А.С., Грехов Л.В. Расчетное формирование оптимальных законов управления дизелями на традиционных и альтернативных топливах. *Безопасность в техносфере*, 2007, № 5, с. 30–32.
- [9] Кулешов А.С., Грехов Л.В. *Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподдачи и рабочих*

процессов двигателей внутреннего сгорания. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 64 с.

[10] Шеховцов А.Ф., ред. *Процессы в перспективных дизелях*. Харьков, Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. 352 с.

[11] *Garrett turbochargers*. URL: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbocharger#> (дата обращения 10 февраля 2014).

References

[1] Kuznetsov A.G., Trifonov V.L. *Razrabotka stenda polunaturalnogo modelirovaniia energeticheskoi ustanovki s dizelem* [Development of HIL stand with diesel power plant]. *Aktual'nye problemy razvitiia porshnevyykh DVS: Materialy mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Actual problems of piston engine: interdisciplinary Materials Science and Engineering Conference]. St. Petersburg, 2008, pp. 96–98.

[2] Kuznetsov A.G. Dinamicheskaiia model' dizelia [Diesel dynamic model]. *Avtomobil'naia promyshlennost'* [Automotive industry]. 2010, no. 2, pp. 30–33.

[3] Bokonikov A.N., Kuznetsov A.G. Matematicheskaiia model' sistemy vozdukhosnabzheniia avtomobil'nogo dizelia dlia polunaturalnogo modelirovaniia ego dinamicheskikh rezhimov [Mathematical model of Gas Exchange System of automobile diesel for realtime modelling of dynamic operating points]. *Gruzovik* [Truck]. 2009, no. 11, pp. 30–33.

[4] Lauer T. CFD Helps make engines more efficient. *Dynamics*, 2012, issue 12.01, pp. 35–36.

[5] KIVA-4, Los Alamos National Laboratory. Available at: <http://www.lanl.gov/orgs/tt/license/software/kiva> (accessed 10 February 2014).

[6] AVL FIRE ® Product description. Available at: <http://www.avl.com/web/ast/fire> (accessed 10 February 2014).

[7] DIESEL-RK is an engine simulation tool. Available at: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru> (accessed 10 February 2014).

[8] Kuleshov A.S., Grekhov L.V. Raschetnoe formirovanie optimal'nykh zakonov upravleniia dizeliami na traditsionnykh i al'ternativnykh toplivakh [Calculated formation of optimal control laws for diesels on conventional and alternative fuels]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2007, no. 5, pp. 30–32.

[9] Kuleshov A.S., Grekhov L.V. *Matematicheskoe modelirovanie i komp'uternaia optimizatsiia toplivopodachi i rabochikh protsessov dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Mathematical modeling and computer-optimized fuel and work processes of internal combustion engines]. Moscow, Bauman Press, 2000. 64 p.

[10] *Protessy v perspektivnykh dizeliakh* [Processes in advanced diesel engines]. Ed. Shekhovtsov A.F. Khar'kov, Osнова publ., 1992. 352 p.

[11] *Garrett turbochargers*. Available at: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbocharger#> (accessed 10 February 2014).

Статья поступила в редакцию 14.03.2014

Информация об авторах

КУЗНЕЦОВ Александр Гаврилович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

КУЛЕШОВ Андрей Сергеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: kuleshov@power.bmstu.ru).

ХАРИТОНОВ Сергей Викторович (Москва) — аспирант кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: devilfess@mail.ru).

Information about the authors

KUZNETSOV Aleksandr Gavriilovich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: kuzag441@mail.ru).

KULESHOV Andrey Sergeevich (Moscow) — Professor of «Piston Engines» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: kuleshov@power.bmstu.ru).

KHARITONOV Sergey Viktorovich (Moscow) — Post-Graduate of «Thermal Physics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: devilfess@mail.ru).