



**ФИЗИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ
В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАКТАХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Л.В. Плотников, Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, А.М. Неволин, М.О. Мисник

**Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина, г. Екатеринбург, Россия**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Резюме: Тепломеханическое совершенство впускных и выпускных систем во много определяют эффективность рабочих процессов поршневых ДВС. В статье представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования теплоотдачи газовых потоков в профилированных газоздушных системах ДВС. Приводятся описание методики численного моделирования, экспериментальной установки, конфигураций исследуемых гидравлических систем, приборной базы и методики проведения опытов. На основе численного моделирования установлено, что использование в выпускных системах ДВС профилированных участков с поперечными сечениями в форме квадрата или треугольника приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на 5-11 %. Показано, что применение во впускной системе поршневых ДВС профилированных участков также приводит к снижению коэффициента теплоотдачи до 10 % при скоростях потока воздуха до 40 м/с и росту коэффициента теплоотдачи до 7% при более высоких скоростях. Экспериментальные исследования качественно подтверждают результаты моделирования.

Ключевые слова: поршневые ДВС, системы впуска и выпуска, газодинамика и теплообмен, стационарные потоки, поперечное профилирование.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-79-10003.

Для цитирования: Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Неволин А.М., Мисник М.О. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №5. С. 22-28. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-22-28.

**PHYSICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF THE THERMAL AND
MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STATIONARY FLOWS IN THE GAS-AIR
PATHS OF PISTON ENGINES**

LV Plotnikov, YM Brodov, BP Zhilkin, AM Nevolin, MO Misnik

**Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Abstract: Thermomechanical perfection of intake and exhaust systems largely determine the efficiency of the working process of reciprocating engines (ICE). The article presents the results of numerical simulation and experimental study of the heat transfer of gas flows in profiled gas-air systems of ICEs. A description of the numerical simulation technique, experimental setup, configurations of the studied hydraulic systems, measuring base and features of the experiments are given. On the basis of numerical modeling, it has been established that the use of profiled sections with cross sections in the shape of a square or a triangle in exhaust systems of an ICEs leads to a decrease in the heat transfer coefficient by 5-11%. It is shown that the use of similar

profiled sections in the intake system of reciprocating engines also leads to a decrease in the heat transfer coefficient to 10 % at low air flow rates (up to 40 m/s) and an increase in the heat transfer coefficient to 7% at high speeds. Experimental studies qualitatively confirm the simulation results.

Keywords: *reciprocating internal combustion engines, intake and exhaust systems, gas dynamics and heat exchange, stationary flows, transverse profiling.*

Acknowledgments: *the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 18-79-10003).*

For citation: Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, Nevolin AM, Misnik MO. Physical and numerical simulation of the thermal and mechanical characteristics of stationary flows in the gas-air paths of piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):22-28. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-22-28.

Введение

Технико-экономические показатели поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в значительной степени зависят от совершенства процессов во впускных и выпускных системах [1, 2]. Данной тематике посвящено много разнонаправленных работ. Например, комплексный подход к совершенствованию выпускной системы автомобильного двигателя представлен в работе [3]. Совершенствование методик расчетов и моделирования процессов впуска и выпуска в условиях газодинамической нестационарности описано в статьях [4, 5]. В них авторы разработали математическую модель двигателя, которая учитывает особенности функционирования цилиндропоршневой группы, тепломеханические процессы в газоздушных трактах и цилиндре двигателя. Важно, что в этих исследованиях данные моделирования подтверждаются с помощью экспериментов. Можно отметить другие работы, направленные на создание математических моделей для расчета процессов впуска и выпуска в поршневых ДВС [6, 7]. В свою очередь, тепломеханическое совершенство систем впуска и выпуска определяет теплонапряженность их деталей и узлов, величину подогрева и испаряемость рабочего тела, величину теплоперепада, которой может сработать в турбине турбокомпрессора в случае двигателя с наддувом. Важность исследования параметров рабочего тела в газоздушном тракте на эффективность работы турбокомпрессора и поршневого ДВС показана в работах [8, 9]. Таким образом, получение сведений о газодинамике и интенсивности теплообмена во впускной и выпускной системах ДВС является актуальной задачей двигателестроения.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования теплоотдачи газовых потоков в профилированных впускных и выпускных системах поршневых двигателей размерности 8,2/7,1.

Параметры моделирования и описание экспериментальной базы

Известно, что поперечное профилирование труб вызывает изменение газодинамики и структуры потоков в гидравлической системе [10-12], а это, в свою очередь, должно привести к изменению интенсивности теплообмена.

Данные исследования проводились, как с помощью математического моделирования, так и экспериментально на лабораторной установке.

Для исследования теплообмена стационарных потоков воздуха в газоздушных системах поршневых ДВС были разработаны математические модели с помощью *CFD*-пакета на основе метода конечных элементов.

Конфигурации исследуемых систем впуска и выпуска состояли из четырех основных элементов: цилиндр двигателя, клапан, головка цилиндра и труба (рис. 1). Диаметр цилиндра составлял 82 мм, внутренний диаметр выпускной трубы и канала в головке цилиндра равнялся 30 мм, диаметр впускной трубы – 32 мм. В ходе моделирования клапан находился в открытом положении (высота подъема клапана равнялась 9 мм). Исследования выполнялись для трех различных труб. В первом случае труба имела постоянное круглое сечение по всей длине – базовый вариант. Во втором и третьем случае трубы имели профилированный участок с поперечными сечениями в форме квадрата и треугольника, соответственно. Длина профилированного участка составляла 250 мм при общей длине трубы – 450 мм. Все профилированные трубы системы выпуска имели эквивалентный гидравлический диаметр $d_3 = 30$ мм, трубы системы впуска – $d_3 = 32$ мм.

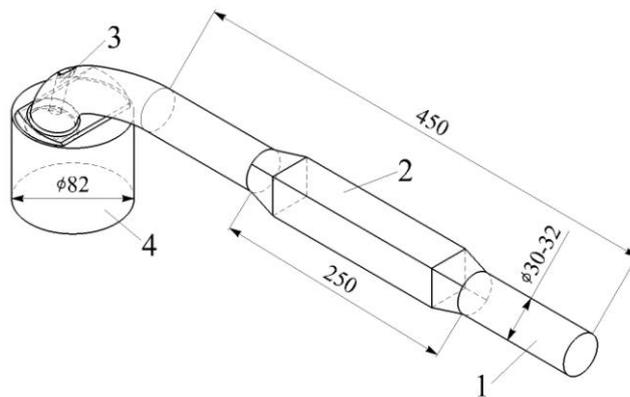


Рис. 1. Конфигурация исследуемых газозвудушных систем: 1 – впускная или выпускная труба; 2 – профилированный участок трубы; 3 – впускной или выпускной клапан; 4 – цилиндр

Граничные условия при моделировании теплообмена в выпускной системе состояли в следующем. На входе в модель задавалось избыточное давление в цилиндре от 90,15 до 130 кПа. На выходе модели – 90 кПа (барометрическое давление за вычетом потери давления вследствие гидравлических потерь). При таких условиях скорость потока газа на выходе из выпускной трубы равнялась от 10 до 130 м/с. В качестве рабочей среды использовался сухой воздух с температурой 120 °С. Граничные условия при моделировании теплообмена во впускной системе были следующие. В качестве рабочей среды использовался сухой воздух с температурой 20 °С,двигающийся со скоростью от 10 до 100 м/с. На входе в модель задавался массовый расход, выход определялся как выход под давлением равным барометрическому. Для моделирования турбулентного течения использовалась k-ε модель турбулентности. Задачи решались в стационарной постановке. Сетки исследуемых газозвудушных систем состояли из порядка 630 000 ячеек.

Экспериментальные исследования теплоотдачи во впускных и выпускных системах проводились для конфигураций, описанных выше. Все основные геометрические размеры труб и цилиндра были одинаковыми при численном моделировании и при экспериментальных исследованиях. Опыты проводились при стационарном режиме течения воздуха в газозвудушных системах двигателя. При исследовании выпускной системы клапан фиксировался в крайнем верхнем положении, а движение воздуха создавалось компрессором, создающим избыточное давление в цилиндре. Средняя скорость потока воздуха в выпускной трубе изменялась в диапазоне от 10 до 90 м/с. При исследовании впускной системы клапан также фиксировался в крайнем верхнем (открытом) положении, а движение воздуха создавалось уже эксгаустером, отсасывающим воздух из цилиндра. Средняя скорость потока воздуха во впускной трубе изменялась в диапазоне от 10 до 90 м/с. Температура воздуха в обоих случаях составляла 18-22 °С.

В исследуемых трубах были выбраны 3 контрольных сечения на расстояниях l_x от окна в головке цилиндра равных 100 мм, 200 мм и 300 мм, в которых устанавливалось по два датчика термоанемометра. При этом в каждом контрольном сечении измерение локального коэффициента теплоотдачи α_x проводилось последовательно в 4 местах, отстоящих друг от друга на угол 90°. Для получения коэффициента теплоотдачи трубы сначала усреднялись величины α_x для каждого контрольного сечения; таким образом получалось среднее значение коэффициента теплоотдачи в сечении. Потом усреднялись значения α_x для всех контрольных сечений – получалось значение коэффициента теплоотдачи для впускной или выпускной трубы.

Для определения мгновенных значений скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x использовался термоанемометр постоянной температуры. Сигналы с термоанемометров поступали в аналого-цифровой преобразователь, а далее в компьютер для обработки и анализа. Максимальная систематическая погрешность измерения скорости составляла 5,4 %, локального коэффициента теплоотдачи – 10,0 %. Подробней методика определения w_x и α_x описана в статье [13].

Численное моделирование теплообмена во впускной и выпускной системах поршневых двигателей

На основе численного моделирования была проведена оценка влияния формы поперечного сечения трубы на интенсивность теплоотдачи в выпускной системе поршневого ДВС (рис. 2).

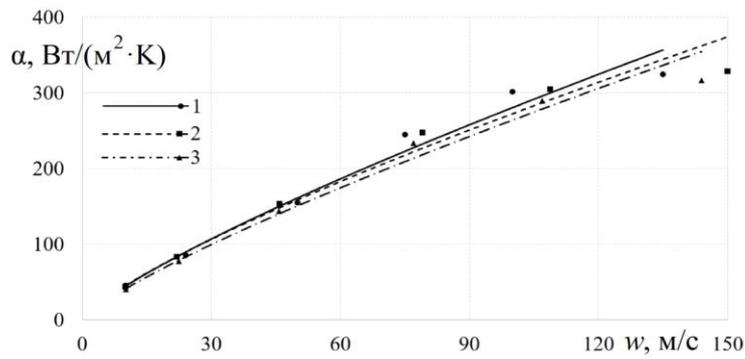


Рис. 2. Расчетные зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха w в выпускной трубе с профилированными участками с разными поперечными сечениями: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Из рис. 2 видно, что при использовании выпускной трубы с участком с квадратным поперечным сечением при всех скоростях потока воздуха наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи, которое достигает 5 % по сравнению с базовой выпускной системой. При этом наибольшее снижение коэффициента теплоотдачи происходит при скоростях потока более 100 м/с. Аналогичный эффект был установлен для выпускной системы с трубой с треугольным поперечным сечением. По мнению авторов, данное отличие связано с наличием устойчивых вихревых структур, образующихся в углах профилированных каналов, которые препятствуют формированию устойчивого пограничного слоя и, соответственно, снижают теплообмен газа со стенками трубы.

На основе численного моделирования была проведена оценка влияния формы поперечного сечения трубы на интенсивность теплоотдачи во впускной системе ДВС (рис. 3). Из рисунка видно, что при использовании впускной трубы с участком с квадратным поперечным сечением при скоростях потока воздуха до 40 м/с наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи, которое достигает 8 % при $w = 10$ м/с (по сравнению с базовой системой впуска). При $w > 40$ м/с, наоборот, происходит рост коэффициента теплоотдачи на величину до 2 %. Аналогичный эффект был установлен для системы впуска с профилированным участком с треугольным сечением. При $w < 25$ м/с имеет место снижение коэффициента теплоотдачи до 14 % по сравнению с базовой впускной системой. В диапазоне $25 < w < 100$ м/с наблюдается рост коэффициента теплоотдачи на величину до 5 %. По мнению авторов, при скорости потока воздуха около 25 м/с в профилированных трубах происходит газодинамическая перестройка структуры потока [14] и, соответственно, пограничного слоя, что вызывает смену направления теплообмена.

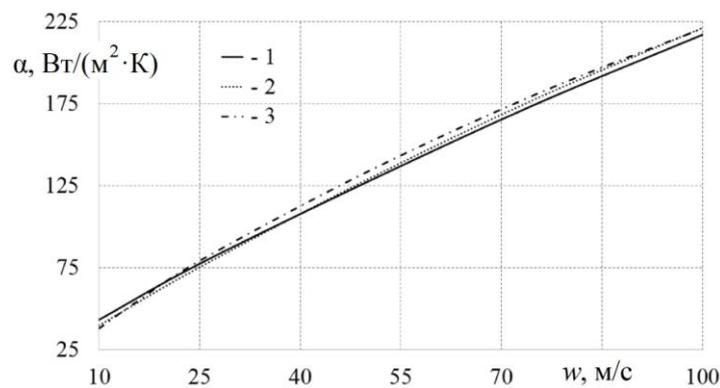


Рис. 3. Расчетные зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха w во впускной трубе с профилированными участками с разными поперечными сечениями: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Для четкого объяснения полученных закономерностей необходимы дополнительные исследования параметров и структуры потоков в профилированных каналах.

Экспериментальные исследования теплообмена во впускной и выпускной системах поршневых двигателей

Экспериментальные исследования теплообмена в выпускной системе подтвердили результаты численного моделирования на качественном уровне (рис. 4). Некоторые отличия в численных значениях могут быть связаны с погрешностью экспериментального

определения коэффициента теплоотдачи и незначительными отличиями в исследуемых конфигурациях систем (в частности, в шероховатости поверхностей).

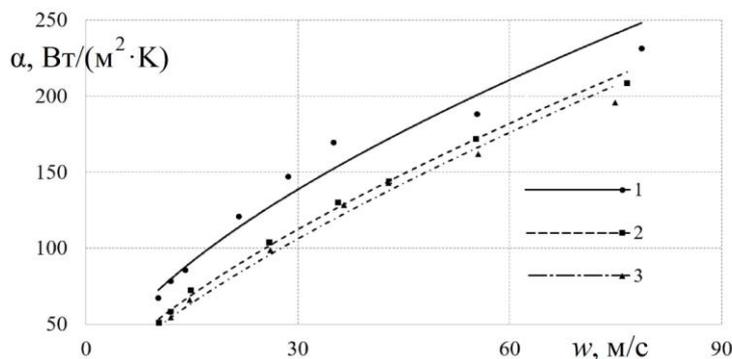


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха w в выпускной трубе с профилированными участками с разными поперечными сечениями: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

При использовании профилированных участков в выпускной системе ДВС при всех скоростях потока наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи по сравнению с базовой выпускной системой. Опыты показали, что при использовании в выпускной системе трубы с квадратным поперечным сечением наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи на величину до 25 %. Подобные данные были получены и при использовании треугольной выпускной трубы: максимальное снижение коэффициента теплоотдачи достигает 33 %. Примечательно, что при исследовании локальной теплоотдачи в выпускной системе в условиях газодинамической нестационарности наблюдается также снижение α_x при всех частотах вращения коленвала [15].

Экспериментальные исследования теплообмена во впускной системе также качественно подтвердили результаты численного моделирования (рис. 5). Опыты показали, что при использовании во впускной системе трубы с квадратным поперечным сечением при скоростях потока воздуха до 40 м/с наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи вплоть до 25 % по сравнению с базовой впускной системой. При $w > 40$ м/с, видимо, происходит перестройка структуры потока и уже имеет место рост коэффициента теплоотдачи на величину до 5 %.

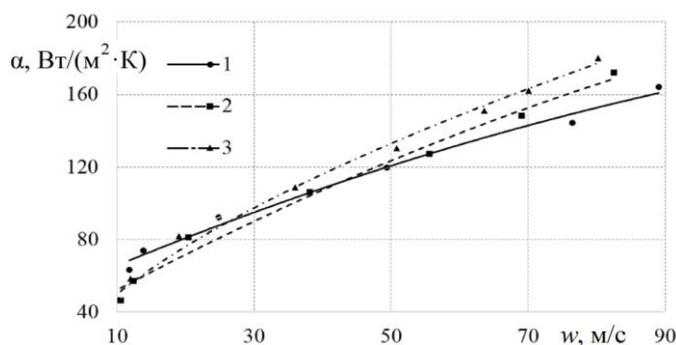


Рис. 5. Экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи α от скорости потока воздуха w во впускной трубе с профилированными участками с разными поперечными сечениями: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Подобные данные были получены и при использовании профилированной впускной трубы с треугольным поперечным сечением. При $w < 25$ м/с наблюдается снижение коэффициента теплоотдачи α , которое достигает максимальной величины в 22 % при скорости $w = 10$ м/с по сравнению с базовой впускной системой. При росте скорости потока воздуха свыше 25 м/с, наоборот, имеет место увеличение значений α на величину до 9 %.

Заключение

На основании данного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Установлено, что наличие профилированного участка в выпускной системе приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на величину до 30 %, что должно привести к повышению эффективности двигателей с турбонаддувом, поскольку в данном случае большой теплоперепад будет срабатывать в лопаточном аппарате турбины, а также

снижению тепловых напряжений в деталях и узлах системы выпуска, что повысит надежность поршневых двигателей внутреннего сгорания в целом;

2. Показано, что использование профилированных участков во впускной системе приводит к снижению коэффициента теплоотдачи при низких скоростях потока (это будет способствовать лучшему наполнению цилиндра на этих режимах), и, наоборот, при высоких скоростях потока наблюдается незначительный рост коэффициента теплоотдачи (это улучшит испаряемость топлива и, соответственно, позволит получить более однородную топливно-воздушную смесь в камере сгорания поршневого двигателя).

3. Полученные данные расширяют теоретическую базу знаний о закономерностях теплообмена в газоздушных системах, уточняют инженерные методики расчета процессов газообмена, а также позволяют совершенствовать конструкции систем впуска и выпуска перспективных двигателей.

Литература

1. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. 546 p.
2. Драганов Б.Х., Круглов М.Г. Обухова В.С. Конструирование впускных и выпускных каналов двигателей внутреннего сгорания. Киев: Вища шк. Головное издательство. 1987. 175 с.
3. Lazarev E, Lazarev V, Pomaz A., Salov A. Exhaust gases energy use in the course of gas exchange in diesel-fueled vehicles. WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2017. V. 224. № 1. pp. 91-99.
4. Гришин Ю.А. Граничные условия для численного расчета газообмена в поршневых двигателях // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 4. С. 1012-1017.
5. Karabulut H. A coupled thermodynamic and dynamic model of a three cylinder diesel engine: A novel approach for gas exchange process // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 121. pp. 750-760.
6. Y. Liu, F. Zhang, Z. Zhao, T. Cui, Z. Zuo, S. Zhang. The Effects of Pressure Difference on Opposed Piston Two Stroke Diesel Engine Scavenging Process // Energy Procedia. 2017. V.142. pp. 1172-1178.
7. Chalet D. New 0D/1D Physical Approach for Modelling the Gas Dynamics Behavior Inside the Intake System of an Engine // Journal of Thermal Science. 2018. V. 27. № 4. pp. 394-403.
8. B. Franzke, S. Pischinger, P. Adomeit, C. Schernus, J. Scharf, T. Uhlmann. A Sectoral Approach to Modelling Wall Heat Transfer in Exhaust Ports and Manifolds for Turbocharged Gasoline Engines // SAE International Journal of Materials and Manufacturing. 2016. V. 9. № 2. pp. 276-285.
9. L. Huang, C. Ma, Y. Li, J. Gao, M. Qi. Applying neural networks to the improvement of gasoline turbocharger heat transfer modeling // Applied Thermal Engineering. 2018. V.141. pp. 1080-1091.
10. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
11. Жилкин Б.П. Влияние формы поперечного сечения впускного канала на газодинамику и расходные характеристики процесса впуска в ДВС // Известия Высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2009. № 7-8. С. 94-98.
12. A.F. Emery, P.K. Neighbors, F.B. Gessner Emery A.F. The numerical prediction of developing turbulent flow and heat transfer in a square Duct // Journal of Heat Transfer. 1980. V. 102. pp. 51-57.
13. Plotnikov L.V. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 160.
14. Plotnikov L. The flows structure in unsteady gas flow in pipes with different cross-sections // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 159.
15. Brodov Y.M. Influence of Intake/exhaust Channel Lateral Profiling on Thermomechanics of Pulsating Flows // Technical Physics. 2018. V. 63. № 3. pp. 319-324.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели», «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р. техн. наук, зав. кафедрой турбин и двигателей, «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: turbine66@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: tot@ustu.ru.

Неволин Александр Михайлович – доцент кафедры «Турбины и двигатели», «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: alexandr_nevolin@mail.ru.

Мисник Мария Олеговна – магистрант, «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: misnikmariya@yandex.ru.

References

1. Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. 546 p.
2. Draganov BH., Kruglov MG., Obuhova VS. *Design of intake and exhaust channels of internal combustion engines*. Kiev: Vishcha shk. Head Publishing. 1987. 175 p.
3. Lazarev E, Lazarev V, Pomaz A., Salov A. Exhaust gases energy use in the course of gas exchange in diesel-fueled vehicles. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2017; 224(1):91-99.
4. Grishin YA. Boundary Conditions for Numerical Calculation of Gas Exchange in Piston Engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017;90(4):965-970.
5. Karabulut HA. Coupled thermodynamic and dynamic model of a three cylinder diesel engine: A novel approach for gas exchange process. *Applied Thermal Engineering*. 2017;121:750-760.
6. Liu F., Zhang Z., Zhao T., et al. The Effects of Pressure Difference on Opposed Piston Two Stroke Diesel Engine Scavenging Process. *Energy Procedia*. 2017;142:1172-1178.
7. Chalet D. New 0D/1D Physical Approach for Modelling the Gas Dynamics Behavior Inside the Intake System of an Engine. *Journal of Thermal Science*. 2018;27(4): 394-403.
8. A Sectoral Approach to Modelling Wall Heat Transfer in Exhaust Ports and Manifolds for Turbocharged Gasoline Engines. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*. 2016; 9(2):276-285.
9. Applying neural networks to the improvement of gasoline turbocharger heat transfer modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2018; 141:1080-1091.
10. Kutateladze SS. *Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance: A Handbook*. Moscow: Energoatomizdat. 1990.367 p.
11. Zhilkin BP. Influence of the cross-sectional shape of the inlet channel on the gas-dynamics and flow characteristics of the intake process in the internal combustion engine. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*.2009;7-8: 94-98.
12. Emery AF. The numerical prediction of developing turbulent flow and heat transfer in a square Duct. *Journal of Heat Transfer*. 1980;102:51-57.
13. Plotnikov LV. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system. *Applied Thermal Engineering*. 2019.
14. Plotnikov L. The flows structure in unsteady gas flow in pipes with different cross-section. *EPJ Web of Conferences*. 2017.
15. Brodov YM. Influence of Intake/exhaust Channel Lateral Profiling on Thermomechanics of Pulsating Flows. *Technical Physics*. 2018;63(3):319-324.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Boris P. Zhilkin – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Yurii M. Brodov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Alexander M. Nevolin – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Maria O. Misnik – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.