

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 62-144.3

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-1-130-142

## СТАЦИОНАРНАЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА ПОТОКОВ В ЦИЛИНДРЕ И ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н.

<sup>1</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, [leonplot@mail.ru](mailto:leonplot@mail.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. На основе физико-математического моделирования оценить влияние конструкции выпускного коллектора на газодинамику и теплообмен стационарных турбулентных потоков газа в цилиндре и выпускной системе поршневого двигателя внутреннего сгорания для разных граничных условий. МЕТОДЫ. Исследование газодинамики и теплообмена потоков осуществлялось с помощью CFD-подхода в специализированном программном обеспечении российского производства. Моделирование выполнялось для перепада давления от 0,15 до 40 кПа (скорость потока на выходе из системы 10-130 м/с). Для моделирования использовалась  $k-\epsilon$  модель турбулентности. Расчетная сетка состояла из 610000 ячеек. Изменение конструкции заключалось в использовании профилированных каналов с поперечными сечениями в форме круга (диаметр 30 мм), квадрата (сторона 30 мм) и треугольника (сторона 52 мм). РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описаны математическая модель, изучаемая геометрия выпускной системы и анализ полученных данных. В качестве газодинамических характеристик потока были выбраны поле скоростей, изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости. Дан анализ газодинамики в продольном сечении выпускной системы и клапана, а также визуализация структуры потока в 4 контрольных сечениях вдоль длины выпускной системы. Коэффициент теплоотдачи в выпускной системе использовался для оценки теплообменных характеристик потока. Показаны качественные и количественные отличия в газодинамических и теплообменных показателях потоков для разных конструкций выпускной системы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлено, что существуют общие газодинамические эффекты при течении газа в разных элементах выпускной системы. Показана эволюция структуры потока вдоль длины системы выпуска на базе изменения поля скоростей, изолиний одинаковых скоростей и касательных вектора скорости. Выявлены вихревые структуры, образующиеся в клапанном узле и углах профилированных каналов. Установлено, что использование профилированных каналов в выпускной системе приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на величину от 5 до 12 %.

**Ключевые слова:** поршневой двигатель; цилиндр; выпускная система; структура потока; изотакси; касательные вектора скорости; коэффициент теплоотдачи; профилированные каналы.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

**Для цитирования:** Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н. Стационарная термогазодинамика потоков в цилиндре и выпускной системе поршневого двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 130-142. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-130-142.

## STATIONARY THERMAL-GAS-DYNAMICS OF FLOWS IN THE CYLINDER AND EXHAUST SYSTEM OF A PISTON ENGINE

LV. Plotnikov, VA. Shurupov, VA. Slednev, DA. Davydov, DN. Krasilnikov

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, [leonplot@mail.ru](mailto:leonplot@mail.ru)

**Abstract:** *THE PURPOSE.* To evaluate the influence of the exhaust manifold design on gas dynamics and heat transfer of stationary, turbulent gas flows in the cylinder and the exhaust system of a reciprocating internal combustion engine for different boundary conditions based on physical and mathematical modeling. *METHODS.* The study of gas dynamics and heat transfer of flows was carried out using the CFD approach in specialized Russian-made software. The simulation was performed for a pressure drop from 0.15 to 40 kPa (the flow velocity at the outlet of the system was 10-130 m/s). The k-ε turbulence model was used for modeling. The computational grid consisted of 610,000 cells. The design change consisted in the use of profiled channels with cross sections in the form of a circle (diameter 30 mm), a square (side 30 mm) and a triangle (side 52 mm). *RESULTS.* The article describes the mathematical model, the studied geometry of the exhaust system and the analysis of the obtained data. The velocity field, isolines of equal velocities, and tangential velocity vectors were chosen as the gas-dynamic characteristics of the flow. The gas dynamics in the longitudinal section of the exhaust system and the valve, as well as the visualization of the flow structure in 4 control sections along the length of the exhaust system, were analyzed. The heat transfer coefficient in the exhaust system was used to evaluate the heat transfer characteristics of the flow. Qualitative and quantitative differences in gas dynamics and heat transfer processes are shown. *CONCLUSION.* It has been established that there are common gas-dynamic effects during the flow of gas in different elements of the exhaust system. The evolution of the flow structure along the length of the exhaust system is shown based on the change in the velocity field, isolines of equal velocities, and tangential velocity vectors. The vortex structures formed in the valve assembly and the corners of the profiled channels are revealed. It has been established that the use of profiled channels in the exhaust system leads to a decrease in the heat transfer coefficient by 5 to 12%.

**Keywords:** piston engine; cylinder; exhaust system; profiled channels; flow structure; velocity isolines; velocity vector tangents; heat transfer coefficient.

**Acknowledgments:** The work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-29-00022).

**For citation:** Plotnikov LV, Shurupov VA, Slednev VA, Davydov DA, Krasilnikov DN. Stationary thermal-gas-dynamics of flows in the cylinder and exhaust system of a piston engine. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (1):130-142. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-130-142.

### Введение (Introduction)

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) остаются актуальными источниками энергии во многих отраслях экономики (распределенная генерация, аварийные источники энергии, тепловозы, грузовики, надводные и подводные корабли и т.д.) [1]. Соответственно, совершенствование конструкции основных систем и термодинамического цикла является важнейшей задачей для развития поршневых двигателей. Протекание термодинамического процесса выпуска отработавших газов из цилиндра двигателя и конструкция выпускной системы существенно определяют технико-экономические показатели ПДВС [2]. Поэтому получение новых данных о газодинамике и теплообмене потоков газа в цилиндре и выпускной системе будет способствовать уточнению инженерных методик для проектирования и модернизации поршневых двигателей с перспективными характеристиками.

Ниже представлен краткий анализ научно-технических результатов об исследовании процесса выпуска в ПДВС. Одним из востребованных научных направлений является разработка новых подходов к исследованию термодинамического цикла двигателя на основе оригинальных математических моделей [3-6]. Krastev V.K. и др. [3] разработали зональную гибридную математическую модель для моделирования турбулентных потоков в

поршневых двигателях. Они доказали, что гибридная модель является более точной по сравнению с традиционным моделированием на основе уравнений Навье-Стокса. Ко I. с соавторами [4] предложили моделирование на основе крупных вихрей для потоков во впускных и выпускных системах поршневых двигателей. Было показано, что этот подход снижает время моделирования и имеет потенциал для использования. Dias Ribeiro M. и др. [5] сделали аналогичные выводы для потоков в цилиндре ПДВС. Buhl S. с соавторами [6] провели сравнение разных подходов к моделированию процессов в системе газообмена двигателя. Было установлено, что необходимо использовать разные математические модели для разных физических процессов с целью получения наиболее точных и достоверных результатов.

Определение уровня теплообмена в процессе выпуска является важным с точки зрения повышения эффективности поршневого двигателя [7-11]. Bai S. и др. [7] исследовали влияние различных настроек двигателя на температуру выпускных газов в дизельном двигателе. Были даны рекомендации по управлению температурой газов в процессе эксплуатации ПДВС. Wu X. с соавторами [8] предложили использовать органический цикл Ренкина на базе поршневого двигателя и его отработавших газов. Были даны инженерные рекомендации для проектирования ПДВС с органическим циклом Ренкина. Simonetti M. и др. [9] экспериментально исследовали газодинамику и теплообмен пульсирующих потоков газа в гидравлической системе, характерной для выпускных систем двигателя. Приводятся уникальные данные о физической связи газодинамических пульсаций потока и интенсивности теплоотдачи. Cerdoun M. с соавторами [10] изучали влияние уровня теплообмена в выпускных каналах на физические процессы во впускных каналах головки блока двигателя на основе численного моделирования.

Существует научное направление по доводке конструкции выпускной системы с целью улучшения эксплуатационных характеристик ПДВС [12-16]. Jang J. и др. [12] определили оптимальную форму выпускного коллектора и длину впускного трубопровода для получения наименьшего расхода топлива для двухцилиндрового двигателя. Wang T.J. [13] определил оптимальные диаметры впускного и выпускного трубопроводов дизельного двигателя для получения наибольшей мощности. Baе M.W. с соавторами [14] удалось повысить номинальную мощность и максимальный крутящий момент газового двигателя почти в два раза посредством доводки конструкции впускной и выпускной систем. Khairuddin U.B. and Costall A.W. [15] удалось повысить КПД турбины системы турбонаддува на 2,1 % посредством газодинамического совершенствования выпускной системы поршневого двигателя.

Усилия специалистов в области поршневых двигателей также направлены на поиск оптимальных режимов и условий работы ПДВС с целью получения наилучших технико-экономических показателей [17, 18]. Также физические параметры процесса выпуска оказывают существенное влияние на уровень шума и экологическую нагрузку, создаваемые поршневым двигателем [19-21].

Таким образом, анализ литературы показал, что исследование процесса выпуска и доводка конструкции выпускной системы остается актуальным и полезным направлением исследований с целью улучшения эксплуатационных и экологических показателей ПДВС.

Цель данного исследования состоит в том, чтобы оценить влияние конструкции выпускного коллектора на газодинамику и теплообмен потоков газа в цилиндре и выпускной системе поршневого двигателя на основе численного моделирования (CFD).

#### **Материалы и методы (Materials and methods)**

Исследование газодинамики и теплообмена стационарных потоков в цилиндре и выпускной системе двигателя осуществлялось посредством численного моделирования на базе CFD-метода в специализированном программном обеспечении Фидесис российского производства.

Исследуемая гидравлическая система состояла из цилиндра, клапанного узла, криволинейного канала в головке блока и выпускных коллекторов разных конструкций. Общий вид и основные размеры гидравлической системы представлены на рис. 1. Диаметр цилиндра составлял 82 мм, диаметр тарелки клапана равнялся 32 мм, высота подъема клапана – 10 мм, внутренний диаметр выпускного коллектора – 30 мм, длина коллектора – 450 мм. Четыре контрольных сечения вдоль длины выпускной системы использовались для визуализации течения газа (рис. 1).

Граничные условия для моделирования процесса выпуска состояли в следующем. На входе в модель задавалось избыточное давление в цилиндре (давление в конце выпуска) от 90,15 до 130 кПа. На выходе модели также задавалось избыточное давление, равное 90 кПа (это барометрическое давление за вычетом потери давления вследствие гидравлических потерь в системе). Соответственно, моделирование выполнялось для разницы давлений между входом и выходом (перепад давления)  $\Delta p$  от 0,15 до 40 кПа. При таких условиях скорость потока газа на выходе из выпускного трубопровода равнялась от 10 до 130 м/с.

Это соответствует  $20000 < Re < 260000$ . Таким образом, режим течения в выпускной системе являлся турбулентным. Для исследуемой геометрии двигателя такие значения скорости соответствуют частотам вращения коленчатого вала ориентировочно от 1000 до 4500 мин<sup>-1</sup>.

В качестве рабочей среды использовался сухой воздух с температурой 20 °С. Для моделирования турбулентного течения газа использовалась  $k-\varepsilon$  модель турбулентности. Задача решалась в стационарной постановке. Расчетная сетка состояла из 630 тысяч ячеек.

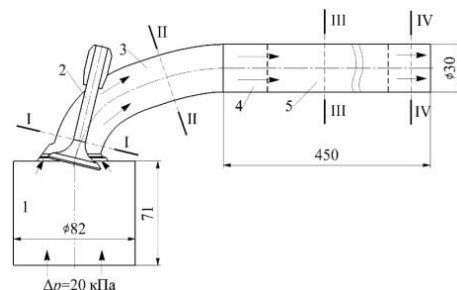


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования исследуемого процесса и геометрические размеры основных элементов (цилиндр и выпускная система) с указанием контрольных сечений: 1 – цилиндр; 2 – тарельчатый клапан; 3 – криволинейный канал; 4 – коллектор; 5 – профилированный участок; I-I – IV-IV – контрольные сечения для визуализации результатов моделирования

Fig. 1. Design diagram for simulating the studied process and geometric dimensions of the main elements (cylinder and exhaust system) with reference sections: 1 - cylinder, 2 - plate valve, 3 - curvilinear channel, 4 - collector, 5 - profiled section; I-I - IV-IV - test sections for visualization of model results

В данном исследовании изучалось влияние конструкции выпускной системы на газодинамику и теплообмен стационарных потоков. Изменение конструкции заключалось в использовании профилированных каналов с поперечными сечениями в форме круга (базовая конфигурация), квадрата и треугольника в выпускном коллекторе. Геометрические размеры квадрата и треугольника определялись исходя из равенства эквивалентного гидравлического диаметра, т.е. 30 мм. Соответственно сторона квадрата составляла 30 мм, а сторона треугольника равнялась 52 мм. Длина профилированного канала составляла около 30 % от общей длины выпускной системы (без учета высоты цилиндра). Геометрия выпускной системы с профилированными каналами показана на рисунке 2.

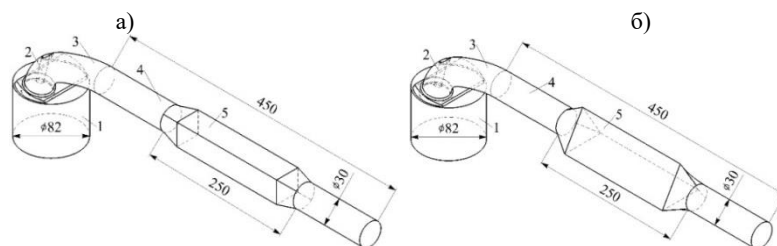


Рис. 2. Геометрические размеры коллектора с профилированными участками в форме квадрата (а) и треугольника (б)

Fig. 2. Geometric dimensions of the manifold with profiled sections in the form of a square (a) and a triangle (b)

Исследования проводились для разных перепадов давления в системе. Однако, для удобства представления и анализа результатов о газодинамических характеристиках потоков в данной статье приводятся данные для  $\Delta p = 20$  кПа. В качестве газодинамических характеристик потока были выбраны поле скоростей в продольном сечении выпускной системы и клапана, изолинии одинаковых скоростей в поперечных сечениях и касательные вектора скорости также в разных контрольных сечениях.

Для определения коэффициента теплоотдачи в исследуемой системе проводилось осреднение результатов по длине выпускного коллектора без учета криволинейного канала и цилиндра двигателя.

#### Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 3 показаны поля скоростей в цилиндре и выпускной системе с коллекторами с каналами с разными поперечными сечениями. Из рисунка видно, что

существуют общие закономерности структуры потока в цилиндре и выпускной системе поршневого двигателя:

- на днище клапана существует застойная зона, в которой скорость равна нулю;
- максимальные значения скорости достигаются в клапанной щели и вдоль стержня клапана;
- в нижней части канала в головке блока наблюдается застойная зона со значениями скорости близкими к нулю.

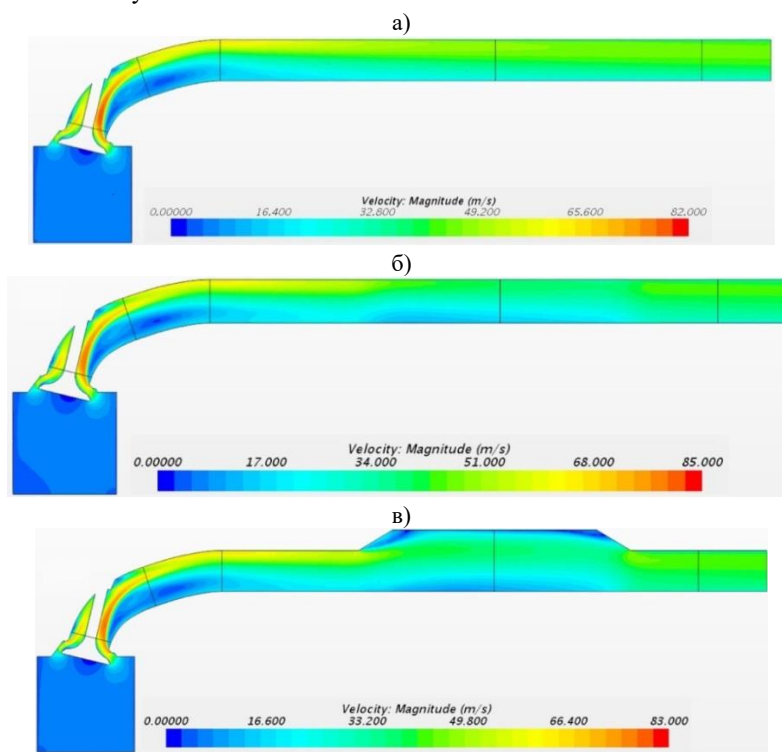


Рис. 3. Поле скоростей в цилиндре и выпускной системе двигателя при перепаде давления  $\Delta p = 20$  кПа для коллекторов с профилированными участками: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

*Fig. 3. Velocity field in engine cylinder and exhaust system at differential pressure  $\Delta p = 20$  kPa for collectors with different profiled sections: a - circle; б - square; в - triangle*

Из рисунка 3 также видно, что профилирование выпускного коллектора не оказывает существенного влияния на структуру потока до квадратного или треугольного канала. При этом, использование профилированных каналов искажает поле скоростей в выпускной системе: наблюдается незначительное торможение течения, размывание ядра потока и формирование застойных зон в углах профилированных каналов (рис. 3б и рис. 3в). Следует отметить, что на выходе выпускной системы (после профилированного участка) структура потока выравнивается и имеет место плавное, равномерное поле скоростей для всех исследуемых конфигураций.

На рисунке 4 показаны изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении (перпендикулярно оси клапана) для выпускных систем с каналами с разными поперечными сечениями.

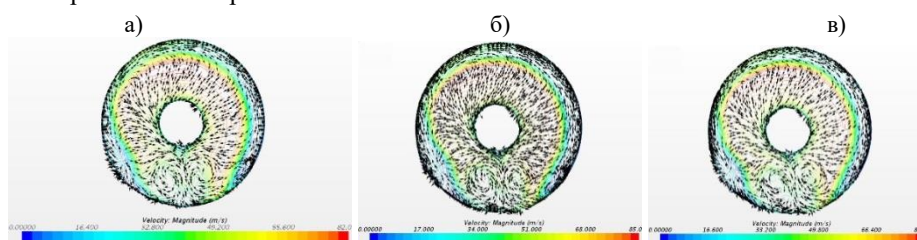


Рис. 4. Изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении I-I при перепаде давления  $\Delta p = 20$  кПа для коллекторов с разными профилированными участками: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

*Fig. 4. Isolines of equal speeds and tangent velocity vectors in the reference section I-I at a pressure difference of  $\Delta p = 20$  kPa for collectors with different shaped sections: a - circle; б - square; в - triangle*

Из рисунка видно, что существуют общие газодинамические закономерности течения газа в выпускной системе вблизи клапанного узла:

- касательные вектора скорости показывают формирование двух крупных вихрей на внутреннем радиусе криволинейного канала (нижняя часть рисунка);
- изолинии скоростей распределяются фактически равномерно по всему сечению канала, кроме области с крупными вихрями;
- наличие клапана приводит к поджатию потока и формированию крупных и мелких вихревых структур.

При этом, следует отметить, что применение профилированных каналов не оказывает существенного влияния на структуру потока в рассматриваемом контрольном сечении (рис. 4б и рис. 4в). Имеют место незначительная деформация изолиний скорости и небольшое уменьшение вихрей на внутренней стороне криволинейного канала в головке блока двигателя.

На рисунке 5 показаны изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении в криволинейном канале в головке блока для выпускных систем с профилированными каналами в коллекторе.

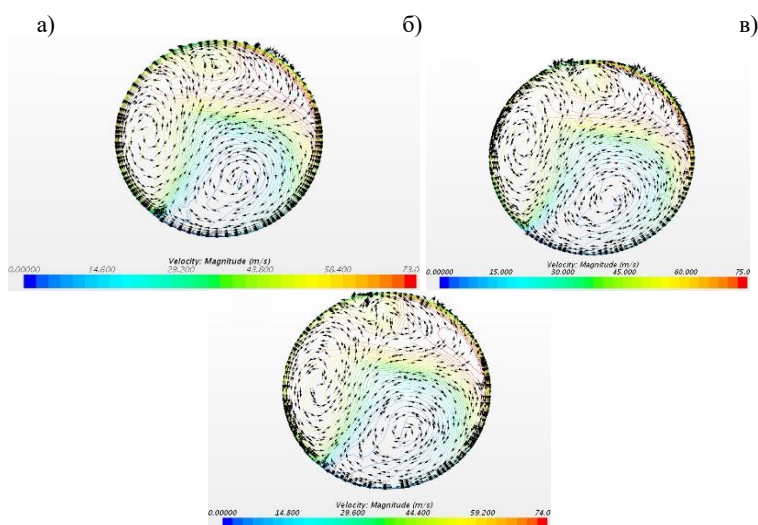


Рис. 5. Изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении II-II при перепаде давления  $\Delta p = 20$  кПа для коллекторов с разными профилированными участками: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

Fig. 5. Isolines of the same speeds and tangent velocity vectors in the reference section II-II at a pressure difference of  $\Delta p = 20$  kPa for collectors with different shaped sections: a - circle; b - square; b - triangle

Из рисунка 5 видно, что существуют общие элементы физического механизма течения газа в криволинейном канале головки блока двигателя:

- касательные вектора скорости показывают, что в криволинейном канале сохраняются два крупных вихря, образовавшиеся ранее вблизи клапана; один вихрь увеличился в размерах и занял практически всю внутреннюю поверхность канала; другой вихрь сместился к левой стороне канала; следует отметить, что на внешней стороне канала наблюдается зарождение третьего небольшого вихря;
- изолинии скоростей указывают на хаотичное распределение скорости по данному контрольному сечению; можно предположить, что в данном сечении происходит перестройка структуры потока.

Следует отметить, что применение профилированных каналов в выпускном коллекторе также не оказывает существенного влияния на структуру потока в криволинейном канале головки блока двигателя (рис. 5б и рис. 5в).

На рисунке 6 показаны изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении в круглом, квадратном и треугольном каналах выпускного коллектора.



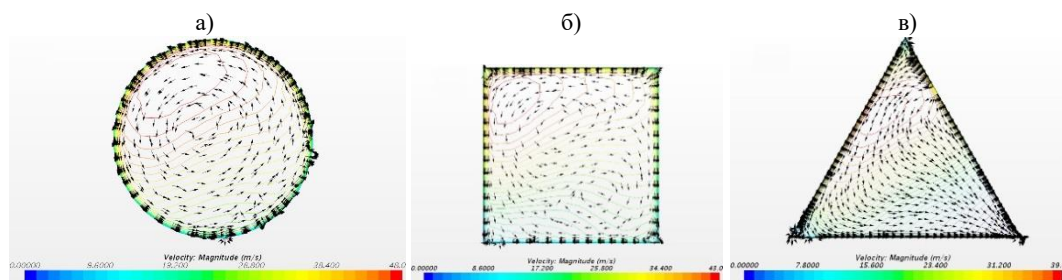


Рис. 6. Изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении III-III при перепаде давления  $\Delta p = 20$  кПа для коллекторов с разными профилированными участками: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

*Fig. 6. Isolines of the same speeds and tangent velocity vectors in the reference section III-III at a pressure difference of  $\Delta p = 20$  kPa for collectors with different shaped sections: a - circle; b - square; b - triangle*

Из рисунка 6а видно, что в круглом выпускном коллекторе имеет место равномерное распределение касательных вектора скорости. При этом, наблюдается смещение изолиний максимальной скорости к верхней части канала. Это можно объяснить поджатием потока и остаточными явлениями после прохождения потоком криволинейного канала в головке блока. Квадратный канал существенно изменяет газодинамические характеристики потока в выпускной системе ПДВС (рис. 6б). Изолинии максимальных скоростей также смещены в верхнюю часть квадрата вследствие деформации потока после криволинейного канала. Касательные вектора скорости показывают, что в углах квадрата образовались два крупных вихря, движущиеся в противоположных направлениях. Эти результаты хорошо соотносятся с классическими экспериментальными данными из монографии [22]. Известно, что в углах квадратного канала образуются продольные вихри, которые оказывают влияние на уровень теплообмена в гидравлической системе.

Использование треугольного канала также значительно меняет структуру потока в выпускном коллекторе (рис. 6в). Изолинии максимальных скоростей смещены в верхний угол. Касательные вектора скорости циркулируют по поперечному сечению и блуждают из одного угла в другой. Такое интенсивное движение потока газа должно оказать влияние на уровень теплообмена в выпускной системе.

На рисунке 7 показаны изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении на выходе из выпускного коллектора.

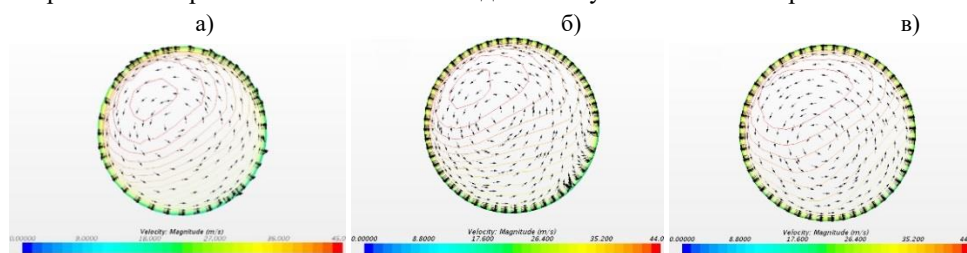


Рис. 7. Изолинии одинаковых скоростей и касательные вектора скорости в контрольном сечении IV-IV при перепаде давления  $\Delta p = 20$  кПа для коллекторов с разными профилированными участками: а – круг; б – квадрат; в – треугольник

*Fig. 7. Isolines of equal speeds and tangent velocity vectors in the reference section IV-IV at a pressure difference of  $\Delta p = 20$  kPa for collectors with different shaped sections: a - circle; b - square; b - triangle*

Из рисунка 7 видно, что существуют общие физические закономерности течения газа на выходе из выпускной системы:

- касательные вектора скорости показывают фактически равномерную структуру потока в данном сечении;
- изолинии максимальных скоростей смещены в верхнюю часть контрольного сечения;
- большинство газодинамических явлений сгладились на выходе из выпускной системы.

Профилированные каналы не оказали существенного влияния на газодинамику стационарного потока на выходе из выпускной системы. Они вызвали лишь некоторую деформацию изолиний одинаковых скоростей в последнем сечении (рис. 7б и рис. 7в).

Необходимо оценить влияние профилированных каналов (соответственно, других газодинамических условий течения) на уровень теплообмена в выпускной системе ПДВС.

На рисунке 8 показано влияние профилированных каналов на интенсивность теплоотдачи потоков в выпускной системе поршневого двигателя. Из рисунка видно, что использование профилированных каналов приводит к снижению коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в диапазоне 1-12 % (без учета увеличения площади стенок выпускной системы). При этом, большие величины снижения коэффициента  $\alpha$  характерны для выпускной системы с каналом с треугольным поперечным сечением. Особенности теплоотдачи в выпускной системе с профилированными каналами состоят в следующем: (1) площадь поверхности выпускного коллектора увеличивается; (2) отбор тепла от проходящих газов (интегральный уровень теплоотдачи) несколько возрастает, поскольку увеличения площади стенок профилированных каналов составляет 20-37 %, а величина уменьшения  $\alpha$  – не более 12 %.

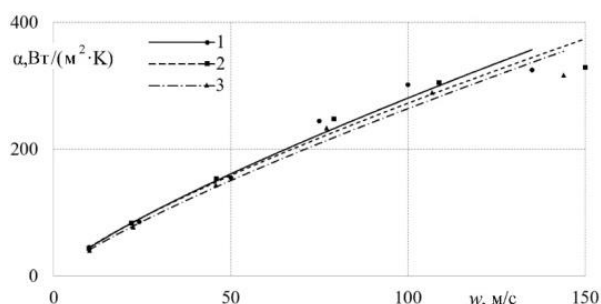


Рис. 8. Расчетная зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от средней скорости потока воздуха  $w$  в выпускном коллекторе с разными профилированными каналами: 1 – круг; 2 – квадрат; 3 – треугольник

Fig. 8. Design relationship of heat-transfer coefficient  $\alpha$  to the average air flow rate  $w$  in the exhaust manifold with different shaped channels: 1 - circle; 2 - square; 3 - triangle

Следует отметить, что подобные результаты были получены в экспериментальных исследованиях [23-25]. Установлено, что применение профилированных каналов в системе газообмена поршневого двигателя вызывает подавление интенсивности теплоотдачи на величину от 5 до 17 %. Соответственно, можно заключить, что полученные в данном исследовании данные о коэффициенте теплоотдачи являются достоверными. Таким образом, разработанная математическая модель может быть применена для дальнейших исследований.

Следует подчеркнуть, что данные о коэффициенте теплоотдачи в выпускной системе имеют важное прикладное значение для разработки подходов повышения эффективности поршневых двигателей. В частности, существуют технические решения по установке теплообменных аппаратов после выпускной системы для полезного использования тепла отработавших газов [26, 27]. Более того, данные о теплообмене в выпускной системе необходимы для оценки эффективности системы турбонаддува двигателя [28, 29].

Существует два направления дальнейших исследований по данной тематике. Во-первых, необходимо разработать математическую модель для исследования газодинамики и теплообмена процесса выпуска применительно к пульсирующим потокам газа. Во-вторых, необходима верификация результатов моделирования о структуре потока газа в цилиндре двигателя с помощью экспериментальных исследований. Разрабатывается лабораторный стенд для изучения структуры потока с помощью метода тепловизуализирующей съемки (рис. 9).

Развитие данного направления позволит получить уникальные данные о газодинамике и теплообмене, уточнить математические модели и инженерные методы расчета, а также установить новые физические закономерности, связанные с течением газов в гидравлических системах сложной конфигурации.



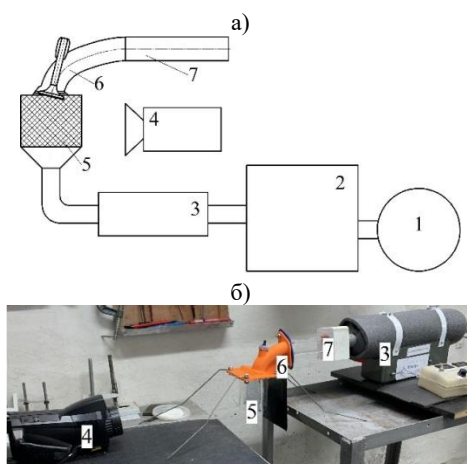


Рис. 9. Схема (а) и фотография (б) лабораторной установки для экспериментального исследования структуры потока в цилиндре и выпускной системы двигателя: 1 – нагнетающий насос; 2 – ресивер; 3 – нагреватель; 4 – тепловизор; 5 – цилиндр с визуализирующей сеткой; 6 – канал с клапаном; 7 – коллектор

Fig. 9. Diagram (a) and photograph (b) of the laboratory plant for the experimental study of the flow structure in the cylinder and the engine exhaust system: 1 - injection pump; 2 - receiver; 3 - heater; 4 - thermal imager; 5 - cylinder with visualization grid; 6 - channel with valve; 7 - manifold

### Выводы (Conclusions)

1. Разработаны расчетная схема и математическая модель для исследования газодинамических и теплообменных характеристик стационарных потоков в выпускной системе двигателя с каналами с разными поперечными сечениями.

2. Установлено, что существуют общие газодинамические эффекты при течении газа в разных элементах выпускной системы.

3. Показана эволюция структуры потока вдоль длины выпускной системы на базе изменения поля скоростей, изолиний одинаковых скоростей и касательных вектора скорости.

4. Выявлены вихревые структуры, образующиеся в клапанном узле и углах профилированных каналов.

5. Установлено, что использование профилированных каналов в выпускной системе приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на величину от 5 до 12 % (интегральный коэффициент теплоотдачи в выпускной системе возрастает).

6. Полученные данные могут быть использованы для:

- уточнения инженерных методик расчета процессов газообмена;
- поиска способов модернизации выпускной системы поршневого двигателя;
- расширения базы знаний о газодинамике и теплообмене стационарных, турбулентных потоков в системах сложной конфигурации.

7. Направления дальнейших исследований заключаются в следующем:

- изучение газодинамики и теплообмена применительно к пульсирующим потокам газа в гидравлических системах сложной конфигурации (системы газообмена поршневых двигателей);
- получение экспериментальных данных и их сравнение с результатами моделирования (корректировка математической модели).

### Литература

1. Reitz R.D., Ogawa H., Payri R., Fansler T., et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine // International Journal of Engine Research. 2020. V. 21(1). P. 3-10.
2. Makartchouk A. Diesel Engine Engineering: Thermodynamics, Dynamics, Design, and Control. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2002. 392 p.
3. Krastev V.K., d'Adamo A., Berni F., Fontanesi S. Validation of a zonal hybrid URANS/LES turbulence modeling method for multi-cycle engine flow simulation // International Journal of Engine Research. 2020. V. 21(4). P. 632-648.
4. Ko I., Rulli F., Fontanesi S., d'Adamo A., Min K. Methodology for the large-eddy simulation and particle image velocimetry analysis of large-scale flow structures on TCC-III

- engine under motored condition // International Journal of Engine Research. 2021. V. 22(8). P. 2709-2731.
5. Dias Ribeiro M., Mendonça Bimbato A., Araújo Zanardi M., Perrella Balestieri J.A., Schmidt D.P. Large-eddy simulation of the flow in a direct injection spark ignition engine using an open-source framework // International Journal of Engine Research. 2020. V. 22(4). P. 1064-1085.
6. Buhl S., Hain D., Hartmann F., Hasse C. A comparative study of intake and exhaust port modeling strategies for scale-resolving engine simulations // International Journal of Engine Research. 2018. V. 19(3). P. 282-292.
7. Bai S., Chen G., Sun Q., Wang G., Li G.-X. Influence of active control strategies on exhaust thermal management for diesel particulate filter active regeneration // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 119. P. 297-303.
8. Wu X., Chen J., Xie L. Optimal design of organic Rankine cycles for exhaust heat recovery from light-duty vehicles in view of various exhaust gas conditions and negative aspects of mobile vehicles // Applied Thermal Engineering. 2020. V. 179. Article number 115645.
9. Simonetti M., Caillol C., Higelin P., Dumand C., Revol E. Experimental investigation and 1D analytical approach on convective heat transfers in engine exhaust-type turbulent pulsating flows // Applied Thermal Engineering. 2020. V. 165. Article number 114548.
10. Cerdoun M., Khalfallah S., Beniaiche A., Carcasci C. Investigations on the heat transfer within intake and exhaust valves at various engine speeds // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 147. Article number 119005.
11. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine) // Thermal Science. 2022. V. 26(1A). P. 365-376.
12. Jang J., Woo Y., Jung Y., Cho C., Kim G., Pyo Y., Han M., Lee S. Research for intake and exhaust system parameterization of 2-cylinder gasoline engine for RE-EV // International journal of energy research, 2018. V. 42(13). P. 4256-4256.
13. Wang T.J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology // Journal of mechanical science and technology. 2018. V. 32(7). P. 3465-3472.
14. Bae M.W., Ku Y.J., Park H.S. A Study on Effects of Tuning Intake and Exhaust Systems Upon Exhaust Emissions in A Driving Car of Gasoline Engine // Transactions of the Korean society of mechanical engineers B. 2019. V. 43(5). P. 379-388.
15. Khairuddin U.B., Costall A.W. Aerodynamic optimization of the high pressure turbine and interstage duct in a two-stage air system for a heavy-duty diesel engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2018. V. 140(5). Article number 052801.
16. Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Бродов Ю.М. Влияние поперечного профилирования впускных и выпускных трубопроводов поршневых двигателей на тепломеханические характеристики потоков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 1/2. С. 119-126.
17. Ma C.-C., Sun L.-W., Fang N., Zhang H. Effects of the Exhaust System on the Performance of a Turbocharged Diesel Engine // Transaction of Beijing Institute of Technology. 2017. V. 37(9). P. 919-925.
18. Karabulut H., Solmaz H., Ipci D. 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. P. 750-760.
19. Albaladejo-Hernández D., García F.V., Hernández-Grau J. Influence of catalyst, exhaust systems and ECU configurations on the motorcycle pollutant emissions // Results in Engineering. 2020. V. 5. 100080.
20. Bordjane M., Chalet D. Analysis of the exchange process in ice using a moving mesh approach // International journal of fluid mechanics research. 2019. V. 46(1). P. 63-87.
21. Torregrosa A.J., Broatch A., Arnau F.J., Hernandez M. On the effect of different flux limiters on the performance of an engine gas exchange gas-dynamic model // International journal of mechanical sciences, 2017. V. 133. P. 740-751.
22. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). Москва: Машиностроение, 1983. 351 с.
23. Plotnikov L.V. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. V. 195. Article number 123144.
24. Plotnikov L., Grigoriev N., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. Stationary Gas Dynamics and Heat Transfer of Turbulent Flows in Straight Pipes at Different Turbulence Intensity // Energies. 2022. V. 15(19). Article number 7250.
25. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Осипов Л.Е., Десятов К.О. Спектральный анализ газодинамических характеристик пульсирующих потоков газа в

выпускной системе поршневого двигателя // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 1. С. 114-125.

26. Ravi R., Pachamuthu S., Kasinathan P. Computational and experimental investigation on effective utilization of waste heat from diesel engine exhaust using a fin protracted heat exchanger // Energy. 2020. V. 200. Article number 117489.

27. Zhao M., Wei M., Tian G., Song P. Simulation of effects of ORC system installation on heavy-duty truck // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 128. P. 1322-1330.

28. Mizythras P., Boulougouris E., Theotokatos G. A novel objective oriented methodology for marine engine-turbocharger matching // International Journal of Engine Research. 2022. V. 23(12). P. 2105-2127.

29. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Григорьев Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газозвушных трактах поршневых двигателей с турбонаддувом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 4. С.77-84.

#### Авторы публикации

**Плотников Леонид Валерьевич** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». E-mail: leonplot@mail.ru.

**Шурупов Владислав Александрович** – студент, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: iwan.logo2018@yandex.ru.

**Следнев Владимир Андреевич** – студент, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: iwan.logo2018@yandex.ru.

**Давыдов Данил Алексеевич** – студент, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: iwan.logo2018@yandex.ru.

**Красильников Дмитрий Николаевич** – студент, Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: iwan.logo2018@yandex.ru.

#### References

1. Reitz RD, Ogawa H, Payri R, Fansler T, et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*. 2020;21(1):3-10.

2. Makartchouk A. *Diesel Engine Engineering: Thermodynamics, Dynamics, Design, and Control*. New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 2002. 392 p.

3. Krastev VK, d'Adamo A, Berni F, et al. Validation of a zonal hybrid URANS/LES turbulence modeling method for multi-cycle engine flow simulation. *International Journal of Engine Research*. 2020;21(4):632-648.

4. Ko I, Rulli F, Fontanesi S, d'Adamo A, Min K. Methodology for the large-eddy simulation and particle image velocimetry analysis of large-scale flow structures on TCC-III engine under motored condition. *International Journal of Engine Research*. 2021;22(8):2709-2731.

5. Dias Ribeiro M, Mendonça Bimbato A, Araújo Zanardi M, et al. Large-eddy simulation of the flow in a direct injection spark ignition engine using an open-source framework. *International Journal of Engine Research*. 2020;22(4):1064-1085.

6. Buhl S, Hain D, Hartmann F, et al. A comparative study of intake and exhaust port modeling strategies for scale-resolving engine simulations. *International Journal of Engine Research*. 2018;19(3):282-292.

7. Bai S, Chen G, Sun Q, Wang G., Li G.-X. Influence of active control strategies on exhaust thermal management for diesel particulate filter active regeneration. *Applied Thermal Engineering*. 2017;119:297-303.

8. Wu X, Chen J, Xie L. Optimal design of organic Rankine cycles for exhaust heat recovery from light-duty vehicles in view of various exhaust gas conditions and negative aspects of mobile vehicles. *Applied Thermal Engineering*. 2020;179.

9. Simonetti M, Caillol C, Higelin P. Experimental investigation and 1D analytical approach on convective heat transfers in engine exhaust-type turbulent pulsating flows. *Applied Thermal Engineering*. 2020. V. 165. Article number 114548.

10. Cerdoun M, Khalfallah S, Beniaiche A. Investigations on the heat transfer within intake and exhaust valves at various engine speeds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 147. Article number 119005.

11. Plotnikov LV. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine). *Thermal Science*. 2022;26(1A):365-376.
12. Jang J, Woo Y, Jung Y, et al. Research for intake and exhaust system parameterization of 2-cylinder gasoline engine for RE-EV. *International journal of energy research*, 2018;42(13):4256-4256.
13. Wang TJ. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by using DFSS methodology. *Journal of mechanical science and technology*. 2018;32(7):3465-3472.
14. Bae MW, Ku YJ, Park HS. A Study on Effects of Tuning Intake and Exhaust Systems Upon Exhaust Emissions in A Driving Car of Gasoline Engine. *Transactions of the Korean society of mechanical engineers B*. 2019;43(5):379-388.
15. Khairuddin UB, Costall AW. Aerodynamic optimization of the high pressure turbine and interstage duct in a two-stage air system for a heavy-duty diesel engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018;140(5). Article number 052801.
16. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM. Influence of transverse profiling of intake and exhaust pipelines of piston engines on the thermal and mechanical characteristics of flows. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;1/2:119-126.
17. Ma C.-C, Sun L.-W, Fang N, et al. Effects of the Exhaust System on the Performance of a Turbocharged Diesel Engine. *Transaction of Beijing Institute of Technology*. 2017;37(9):919-925.
18. Karabulut H, Solmaz H, Ipci D. A 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.
19. Albaladejo-Hernández D, García FV, Hernández-Grau J. Influence of catalyst, exhaust systems and ECU configurations on the motorcycle pollutant emissions. *Results in Engineering*. 2020. V. 5. 100080.
20. Bordjane M, Chalet D. Analysis of the exchange process in ice using a moving mesh approach. *International journal of fluid mechanics research*. 2019;46(1):63-87.
21. Torregrosa AJ, Broatch A, Arnau FJ. On the effect of different flux limiters on the performance of an engine gas exchange gas-dynamic model. *International journal of mechanical sciences*, 2017;133:740-751.
22. Idelchik IE. Aerohydrodynamics of technological apparatuses (Inlet, outlet and distribution of the flow over the cross section of the devices); Mashinostroenie: Moscow, 1983. 351 p.
23. Plotnikov LV. Unsteady gas dynamics and local heat transfer of pulsating flows in profiled channels mainly to the intake system of a reciprocating engine. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. V. 195. Article number 123144.
24. Plotnikov L, Grigoriev N, Osipov L. Stationary Gas Dynamics and Heat Transfer of Turbulent Flows in Straight Pipes at Different Turbulence Intensity. *Energies*. 2022;15(19). Article number 7250.
25. Plotnikov LV, Brodov YuM, Zhilkin BP. Spectral analysis of gas-dynamic characteristics of pulsing gas flows in the exhaust system of a piston engine. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):114-125.
26. Ravi R, Pachamuthu S., Kasinathan P. Computational and experimental investigation on effective utilization of waste heat from diesel engine exhaust using a fin protracted heat exchanger. *Energy*. 2020. V. 200. Article number 117489.
27. Zhao M, Wei M, Tian G, et al. Simulation of effects of ORC system installation on heavy-duty truck. *Applied Thermal Engineering*. 2018;128:1322-1330.
28. Mzythras P, Boulougouris E, Theotokatos G. A novel objective oriented methodology for marine engine-turbocharger matching. *International Journal of Engine Research*. 2022;23(12):2105-2127.
29. Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, et al. Features of heat and mechanical characteristics of pulsating flows in gas-air paths of piston engines with turbocharging. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):77-84.

#### Authors of the publication

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

**Vladislav A. Shurupov** –Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

© Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н.

**Vladimir A. Slednev** –Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Danil A. Davydov** –Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Dmitry N. Krasilnikov** –Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

**Получено** **03.02.2023г.**

**Отредактировано** **17.02.2023г.**

**Принято** **17.02.2023г.**