



СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ГАЗА В ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Л.Е. Осипов, К.О. Десятов

Ю.М. Бродов

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: ЦЕЛЬ. На основе спектрального анализа оценить влияние установки турбины турбокомпрессора на аэромеханику пульсирующих потоков газа в выпускной системе двигателя и предложить способ управления аэродинамическими и теплообменными характеристиками нестационарных потоков газа за счет создания эффекта эжекции в выпускной системе. МЕТОДЫ. Лабораторный эксперимент на натурной модели поршневого двигателя был выбран для достижения поставленной цели. Спектральный анализ гармонических зависимостей использовался для оценки изменения структуры газовых потоков в выпускной системе. Математическое моделирование рабочего цикла дизельных двигателей применялся для оценки потенциальных положительных эффектов от применения системы эжекции в выпускном тракте дизеля. Системы трехмерного твердотельного моделирования применялись для эскизных (инженерных) проработок новых (модернизированных) конструкций систем выпуска. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описаны лабораторное оборудование, измерительная система и методы обработки данных. Приводится описание граничных условий в ходе проведения экспериментальных исследований. Производится сравнение аэромеханических и теплообменных характеристик нестационарных потоков в выпускной системе двигателя с турбокомпрессором и без него. Показаны качественные и количественные отличия в аэромеханике и теплофизике процессов. Предложен способ аэромеханического совершенствования выпускной системы за счет создания эжекции. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выявлено, что турбина турбокомпрессора оказывает значимое влияние на аэромеханические характеристики потоков в выпускной системе. Наблюдается значимое снижение максимальной скорости потока в выпускном тракте (до 3 раз) при установке турбокомпрессора. Происходит снижение расходных характеристик через выпускную систему с турбонаддувом (в пределах 30 %). Установлено, что эффект эжекции в выпускной системе двигателя приводит к стабилизации течения, росту расхода газа на 6-12 %, снижению удельного расхода топлива в среднем на 1 % и улучшению показателей надежности на 1,11-1,74 %.

Ключевые слова: двигатель; турбокомпрессор; аэромеханика потоков газа; система выпуска; спектры; аэромеханическое совершенствование.

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

Для цитирования: 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. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-114-125.

SPECTRAL ANALYSIS OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PULSING GAS FLOWS IN THE EXHAUST SYSTEM OF A PISTON ENGINE

LV. Plotnikov, BP. Zhilkin, LE. Osipov, KO. Desyatov,

Yu. M. Brodov.

**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: *THE PURPOSE. To On the basis of spectral analysis, to evaluate the effect of installing a turbocharger turbine on the aeromechanics of pulsating gas flows in the engine exhaust system and to propose a method for controlling the aerodynamic and heat transfer characteristics of unsteady gas flows by creating an ejection effect in the exhaust system. METHODS. A laboratory experiment on a full-scale piston engine model was chosen to achieve this goal. Spectral analysis of harmonic dependences was used to assess changes in the structure of gas flows in the exhaust system. Mathematical modeling of the operating cycle of diesel engines was used to assess the potential positive effects of the use of an ejection system in the exhaust tract of a diesel engine. Three-dimensional solid modeling systems were used for sketch (engineering) studies of new (modernized) exhaust system designs. RESULTS. The article describes laboratory equipment, measuring system and data processing methods. A description of the boundary conditions in the course of experimental research is given. Comparison of aeromechanical and heat exchange characteristics of unsteady flows in the exhaust system of an engine with and without a turbocharger is carried out in the article. The qualitative and quantitative differences in aeromechanics and thermal physics of processes are shown. The proposed method of aeromechanical improvement of the exhaust system by creating an ejection. CONCLUSION. It was revealed that the turbine of a turbocharger has a significant effect on the aeromechanical characteristics of flows in the exhaust system. A significant decrease in the maximum flow rate in the exhaust tract (up to 3 times) is observed when installing a turbocharger. There is a decrease in flow characteristics through the turbocharged exhaust system (within 30%). It was found that the ejection effect in the engine exhaust system leads to stabilization of the flow, an increase in gas consumption by 6-12%, a decrease in specific fuel consumption by an average of 1% and an improvement in reliability indicators by 1.11-1.74%.*

Keywords: engine; turbocharger; aeromechanics of gas flows; exhaust system; spectra; aeromechanical improvement.

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

For citation: Plotnikov LV, Brodov YuM, Zhilkin BP, Osipov LE, Desyatov KO. 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. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-114-125.

Введение

Эффективность рабочего цикла двигателей определяется аэромеханическим совершенством процессов в выпускной системе [1-3]. Например, в некоторых статьях приводятся результаты по настройке конструкции выпускных систем с целью улучшения экономичности и экологичности бензиновых и дизельных двигателей [4, 5]. Основная идея при доработке выпускных систем состоит в улучшении аэромеханики движения потоков с целью снижения гидравлического сопротивления и, соответственно, в улучшении расходных характеристик.

Отдельного внимания заслуживают научные работы по исследованию режимов работы ПДВС и параметров отработавших газов (ОГ) в выпускной системе на экологические и эксплуатационные показатели. Так, *Fernoaga V.* и др. [6] с помощью искусственного интеллекта исследуют влияние противодействия на выпуске на эффективность двигателя и токсичность его ОГ. В результате был предложен способ прогнозирования поведения ПДВС при разных значениях противодействия на выпуске. *Khoa N.X.* и др. [7] на основе экспериментальных исследований и математического моделирования оценивали степень влияния тепломеханических параметров потоков газа в выпускной системе на эффективность системы рециркуляции двигателя и, соответственно, на его экологические характеристики. *Aiello V.C.* и др. [8] проводили, анализировали влияние характеристик газовых потоков и уровень их загрязнения на эффективность теплообменных аппаратов и функционирование системы наддува. *Huang T.* и др. [9] разработали способ прогнозирования температуры ОГ двигателя при его работе на разных

режимах (в том числе на переходных режимах) с целью повышения эффективности работы сажевого фильтра (это повысит его надежность и экологическую безопасность). *Antanenkov I.S.* и др. [10] предложили оригинальные термодинамические системы для использования ОГ судовых двигателей с целью повышения их КПД, а также разработали методики расчета подобных систем. В некоторые научные работы направлены на разработку измерительных приборов для более точного определения параметров потоков в выпускной системе с целью разработки современных систем управления ПДВС [11, 12].

Дополнительно можно выделить ряд статей по созданию математических моделей течения газов в выпускных системах [13-15]. Например, *Kim K.-H.* и др. [16] предложил оригинальную одномерную математическую модель для расчета основных параметров потоков в системах газообмена ПДВС. В свою очередь, *Kong K.-J.* и др. [17] разработали комплексную 1D-3D физико-математическую модель также для изучения структуры и характеристик потоков газа во впускной и выпускной системах двигателей. Эти модели были созданы с целью изучения структуры потоков, а также для прогнозирования газодинамических, теплообменных, расходных и экологических характеристик потоков в системах газообмена для улучшения эксплуатационных показателей ПДВС и проектирования конкурентноспособных энергетических установок. Следует отметить, что исследование структуры пульсирующего потока в выпускной системе является довольно сложной и трудоемкой задачей, которая требует применения очень дорогостоящего оборудования [18, 19].

Отдельным направлением исследований является турбокомпрессор (ТК) для наддува двигателей. Известно, что ТК оказывает существенное влияние на рабочий цикл ПДВС [20-22]. При этом, следует отметить, что существует относительно небольшое количество работ по детальному изучению влияния лопаточного аппарата ТК на газодинамику и теплообмен в газодинамических системах двигателей.

Одним из самых известных и эффективных способов для оценки аэромеханики пульсирующих потоков в газодинамических системах сложной конфигурации является спектральный анализ [23, 24]. Он активно применяется во всех отраслях науки и техники, включая поршневое двигателестроение [25, 26]. Поэтому в данном исследовании этот метод был выбран за основу при обработке экспериментальных данных.

Таким образом, задачами данного исследования являлись: 1) на основе спектрального анализа оценить влияние установки турбины турбокомпрессора на аэромеханику пульсирующих потоков газа в выпускной системе двигателя; 2) предложить способ управления газодинамическими и теплообменными характеристиками потоков газа за счет создания эффекта эжекции в выпускной системе.

Материалы и методы

Исследования проводились на динамическом стенде, имитирующем процесс выпуска в ПДВС с турбонаддувом (рис. 1). Стенд включал источник сжатого воздуха, который подавал его в цилиндр с давлением от 50 до 250 кПа. Перед подачей воздуха в цилиндр осуществлялась его стабилизация (выравнивание давления) в специальном баке. Из цилиндра воздух подавался в головку блока со штатным клапанным механизмом. Впускные и выпускные клапана приводились во вращение с помощью электрического двигателя с системой автоматического управления. Частота вращения распределительного вала изменялась от 300 до 1500 мин⁻¹, что соответствует частоте вращения коленвала от 600 до 3000 мин⁻¹. Из головки блока воздух поступал в выпускной трубопровод длиной 400 мм с внутренним диаметром 30 мм. На выходе из выпускного трубопровода устанавливался турбокомпрессор. Общая длина системы выпуска составляла около 500 мм.

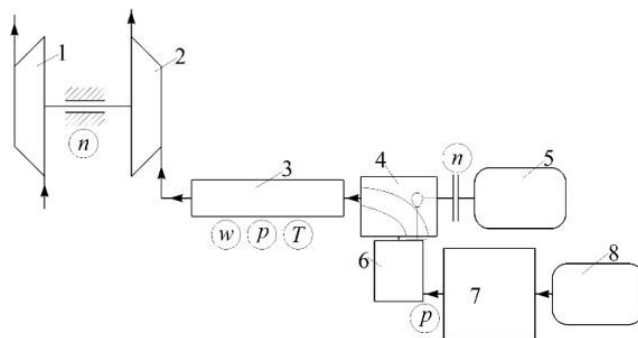


Рис. 1. Компоненка лабораторного стенда и места расположения датчиков: 1 – компрессор ТК; 2 – турбина ТК; 3 – выпускной коллектор; 4 – головка цилиндров; 5 – электрический привод распределителя; 6 – объем, имитирующий цилиндр

Fig. 1. Layout of the laboratory stand and sensor locations: 1 – TC compressor; 2 – TC turbine; 3 – exhaust manifold; 4 – cylinder head; 5 – camshaft electric drive; 6 – volume simulating engine cylinder; 7 – volume for flow

двигателя; 7 – объем для стабилизации потока;
8 – источник сжатого воздуха; p – датчик
давления; n – датчик частоты вращения; w –
датчик скорости потока газа; T – датчик
температуры

stabilization;

8 – compressed air source; p – pressure sensor; n –
speed sensor; w – gas flow velocity sensor; T –
temperature sensor

В выпускном трубопроводе измерялись следующие физические величины: скорость потока воздуха w_x , давление потока p_x , температура потока T и локальный коэффициент теплоотдачи α_x . Дополнительно измерялось давление на входе в цилиндр (давление на выпуске) p_{out} . Также определялись частоты вращения ротора турбокомпрессора и коленчатого вала двигателя. Измерение скорости потока воздуха производилось с помощью термоанемометра постоянной температуры, давление потока – быстродействующим датчиком давления, температура – термопарой. Локальный коэффициент теплоотдачи также определялась с помощью термоанемометра и специального датчика с чувствительным элементом в виде тонкой нити (так называемый, тепловой датчик). Для определения количественных значений коэффициента теплоотдачи применялся метод косвенной тарировки датчика на основе аналогии Рейнольдса. Система измерений, применяемая в данном исследовании, подробнее описана в [27].

В данной работе исследования проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялась оценка влияния наличия турбины ТК в выпускной системе ПДВС на аэродинамические характеристики течения, т.е. пульсационные составляющие скорости и давления потока. Очевидно, что лопатки турбины в выпускной системе оказывают механическое влияние на течение и одновременно турбина является источником аэродинамического сопротивления. В работе основной анализ осуществляется на основе сравнения графиков спектров для функций $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$.

На втором этапе исследования был предложен способ газодинамического совершенствования системы выпуска ДВС. В качестве метода для совершенствования аэромеханики потоков в выпускной системе использовался эффект эжекции [28]. Этот эффект обычно используется для выравнивания поля скоростей и увеличения расходных характеристик через исследуемую систему. В данном случае, проводилась оценка по влиянию эффекта эжекции на пульсационные составляющие потока в выпускной системе ПДВС с помощью спектрального анализа и на теплообменные характеристики течения газа.

На основе данных о аэромеханике течений в рассматриваемых системах спектральный анализ функций скорости и давления потока от времени проводился с помощью программы *PowerGraph* на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье. Основные показатели спектра при обработке были: 1) тип спектра был амплитудный; 2) число значений спектра во время быстрого преобразования Фурье было 1048576; 3) тип весовой функции был треугольным. Спектральный анализ гармонических функций скорости и давления потоков является классическим подходом для изучения характеристик потока при различных граничных условиях.

Результаты

Исходные данные об изменении скорости и давления потока, а также локального коэффициента теплоотдачи во времени в выпускной системе ПДВС с ТК и без него для одного из режимов представлены на рисунке 2.

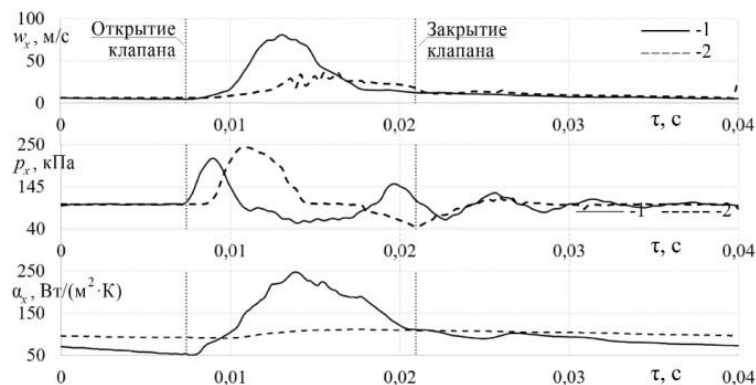


Рис. 2. Зависимости местной скорости w_x и давления p_x потока, а также локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени для выпускной системы без ТК (1) и системы с ТК (2) при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{out} = 200 \text{ kPa}$

Fig. 2. Dependences of the local velocity w_x and the pressure p_x of the flow, as well as the local heat transfer coefficient α_x in time for the exhaust system without TC (1) and the system with TC (2) at $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $p_{out} = 200 \text{ kPa}$

Из рисунка 2 видно, что оснащение ПДВС турбокомпрессором приводит к серьезным изменениям в аэромеханике пульсирующих потоков газа. Например, снижение максимальной скорости потока воздуха в случае наличия в системе ТК достигает 10-55 %. При этом, максимальная величина давления потока в выпускном канале, наоборот, возрастает (на 5-15 %), что, в частности, указывает на увеличение аэродинамического сопротивления системы. Коэффициент аэродинамического сопротивления ξ для базовой выпускной системы составлял в среднем 2,5, а при наличии ТК – $\xi \approx 4,4$ (также средняя величина). Можно отметить, более быстрое гашение колебательных явлений статического давления в выпускной системе при наличии ТК (рис. 2). Наибольшие визуальные отличия наблюдаются для функции $\alpha_x = f(\tau)$. Имеет место существенное сглаживание кривой $\alpha_x = f(\tau)$ в выпускной системе с ТК по сравнению с базовой системой. При этом, максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи снижаются более, чем в 2 раза.

Спектральный анализ первичных закономерностей $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$ также для одного из режимов работы лабораторного стенда приведен на рисунке 3. Из рисунка видно, что установка ТК в выпускную систему ПДВС оказывает заметное влияние на график амплитуд спектра скорости потока. Имеет место снижение значимых амплитуд пульсаций скорости до двух раз, что характерно как для низкочастотных пульсаций, так и для высокочастотных. При этом, кратность значимых частот остается неизменной для базовой выпускной системы и системы с ТК. Значимые частоты спектра скорости имеют значения: 12,6 Гц, 25,0 Гц, 37,5 Гц и т.д., т.е. кратность имеет величину $\sim 12,5$ Гц. При этом, значимые частоты спектра давления имеют почти аналогичные значения: 12,4 Гц, 24,8 Гц, 37,1 Гц и т.д., т.е. в данном случае кратность имеет величину $\sim 12,4$ Гц. Однако, амплитуды пульсаций значимых частот спектра закономерностей $p_x = f(\tau)$ для потоков в выпускной системе с ТК имеют величины в 1,2-1,5 раза выше, чем для базовой системы.

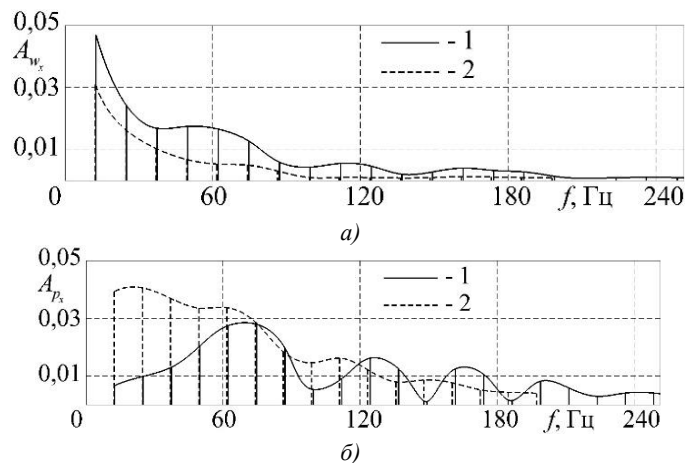


Рис. 3. Графики амплитуд спектра скорости w_x (а) и давления p_x (б) потока воздуха в выпускной системе двигателя без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{out} = 200 \text{ кПа}$

Fig. 3. Graphs of the amplitudes of the velocity spectrum w_x (a) and pressure p_x (b) of the air flow in the exhaust system of the engine without a turbocharger (1) and with TC (2) at $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ and $p_{out} = 200 \text{ kPa}$

Установленные столь значительные отличия в закономерностях изменения спектральных функций для аэромеханических характеристик потоков в выпускной системе с ТК и без него свидетельствуют о перестройке структуры потоков, наличии внешних возмущений и сложном пространственном развитии течения в зависимости от режимов работы ПДВС и ТК, а также о заметном влиянии лопаток турбины на газодинамические характеристики пульсирующих потоков. Можно предположить, что изменение газодинамики вызывает изменение интенсивности теплообмена, что необходимо учитывать в инженерных расчетах процессов газообмена ПДВС.

На втором этапе исследований изучались аэромеханические процессы в системе выпуска с эффектом эжекции. Исходные данные об изменении скорости потока и локального коэффициента теплоотдачи во времени в базовой выпускной системе и системе с эффектом эжекции представлены на рисунке 4. Графики спектров первичной функции $w_x = f(\tau)$ для разных частот вращения коленвала приведен на рисунке 5.

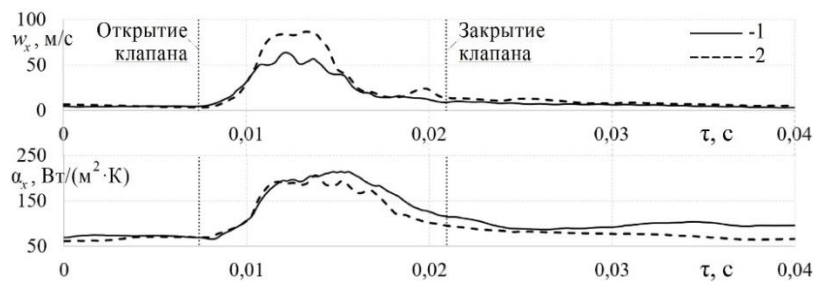


Рис. 4. Зависимости местной скорости потока w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени для выпускной системы с ТК (1) и системы выпуска с эжекцией (2) для $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{out} = 100 \text{ кПа}$

Fig. 4. Dependences of the local flow velocity w_x and the local heat transfer coefficient α_x in time for the exhaust system with TC (1) and the exhaust system with ejection (2) for $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $p_{out} = 100 \text{ kPa}$

Из рисунка 4 видно, что эжекция в выпускной системе приводит к незначительному росту максимальной скорости потока в пределах 5-25 % по сравнению с базовой системой. Также имеет место усиление некоторых колебательных явлений в процессе впуска и после закрытия клапана. Это может быть связано с отсутствием стабилизации потока через эжекционную трубку. Следует отметить, что расход воздуха через выпускную систему с эжекцией увеличивается примерно на 6-12 % (потенциально это свидетельствует о лучшей очистке цилиндра от ОГ). При этом, наблюдается снижение локального коэффициента теплоотдачи в диапазоне 3-15 % при создании в выпускной системе эффекта эжекции (рис. 4).

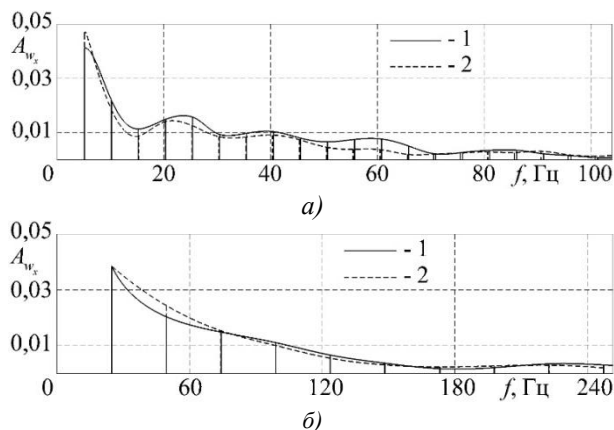


Рис. 5. Графики амплитуд спектра скорости w_x потока воздуха в выпускном тракте двигателя без системы эжекции (1) и с эжекцией (2) при $p_{out} = 100 \text{ кПа}$ и разных частотах n : а – $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; б – 3000 мин^{-1}

Fig. 5. Graphs of the amplitudes of the velocity spectrum w_x of the air flow in the exhaust tract of the engine without ejection system (1) and with ejection (2) at $p_{out} = 100 \text{ kPa}$ and different frequencies n : а – $n = 600 \text{ min}^{-1}$; б – 3000 min^{-1}

Наличие в выпускной системе эффекта эжекции не оказывает заметного влияния на графики амплитуд спектра скорости потока (рис. 5). Значимые частоты спектра при скорости вращения вала 600 мин^{-1} имеют значения: 5,1 Гц, 10,2 Гц, 15,3 Гц и т.д., т.е. кратность имеет величину 5,1 Гц. Значимые частоты спектра при скорости $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$: 24,9 Гц, 49,6 Гц, 74,3 Гц, т.е. кратность, имеет величину 24,7 Гц. Установлено, что при скоростях вращения коленвала до 1500 мин^{-1} амплитуды пульсаций значимых частот в выпускной системе с эжекцией снижаются до 9 % по сравнению с базовой системой. При частотах вала более 1500 мин^{-1} отличия в амплитудах не превышает 5 % (что находится в пределах неопределенности эксперимента).

Таким образом, можно констатировать, что система эжекции в выпускном тракте вызывает стабилизацию течения и приводит к подавлению теплоотдачи. В прикладном аспекте это может положительно сказаться на протекании рабочего цикла двигателя, поскольку потенциально будет улучшена очистка цилиндра от ОГ (это повысит мощность ПДВС) и снизится тепловая напряженность основных элементов выпускной системы (это повысит надежность двигателя).

Обсуждение

Рассмотрим прикладной аспект модернизации выпускной системы посредством создания в ней эффекта эжекции на примере различных двигателей внутреннего сгорания.

Один из возможных вариантов конструктивного исполнения системы эжекции в выпускном тракте ПДВС с турбонаддувом представлен на рисунке 6. Еще раз отметим, что научная идея создания эжекции в данном случае состоит в том, чтобы создать в выпускном тракте дополнительное разрежение, которое будет способствовать лучшей очистке цилиндра двигателя от ОГ. Для того, чтобы не создавать отдельную систему с сжатым воздухом наддувочный воздух после компрессора ТК можно перенаправлять в выпускной тракт поршневого двигателя с целью создания эффекта эжекции. Это позволит выровнять поле скоростей в выпускном тракте, а также снизить флуктуации (колебания) скорости и давления пульсирующего потока газа [29]. Следует подчеркнуть, что эффект эжекции может быть создан в выпускной системе двигателя без наддува – в этом случае необходим внешний источник сжатого воздуха (см. ниже примеры таких систем).

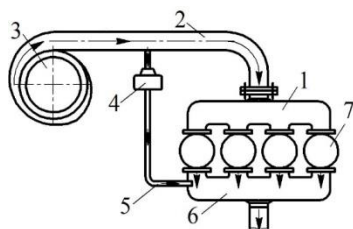


Рис. 6. Принципиальная схема газозвушной системы поршневого двигателя с турбонаддувом: 1 – впускной трубопровод; 2 – выходной патрубок компрессора; 3 – турбокомпрессор; 4 – электромагнитный клапан для сброса наддувочного воздуха; 5 – эжекционная трубка; 6 – выпускной трубопровод

Fig. 6. Schematic diagram of the gas-air system of a turbocharged piston engine: 1 – inlet pipe; 2 – compressor outlet pipe; 3 – turbocharger; 4 – solenoid valve for discharge of charge air; 5 – ejection tube; 6 – exhaust pipe

Для оценки потенциальных положительных эффектов от модернизации системы выпуска ПДВС в программном комплексе ACTUS (разработчик ABB Turbo Systems) проводилось математическое моделирование рабочего цикла дизельного двигателя 6ЧН 21/21 с учетом эжекции на выпуске. В результате установлено, что коэффициент остаточных газов максимально снижается до 10 % на частичных режимах работы дизеля за счет использования эффекта эжекции, что привело к падению удельного расхода топлива в среднем на 1,1 %. Следует отметить, что снижение удельного расхода топлива на 1 % для двигателя 6ЧН 21/21 позволит снизить общее потребление топлива конечным потребителям примерно на 2 кг/ч. Таким образом в эксплуатации ежегодно суммарные расходы на топливо уменьшатся на 700 тыс. руб. для одного двигателя.

Также была проработана конструкция выпускной системы с эжекцией для дизельного двигателя без турбокомпрессора 6Ч 13/14, а также эскиз установки эжекционных трубок в выпускной тракт (рис. 7 и 8). Подчеркнем, что данная система выпуска не содержит систему турбонаддува. В связи с этим для работы системы эжекции необходимы внешние источники сжатого воздуха (поз. 5 на рис. 7).

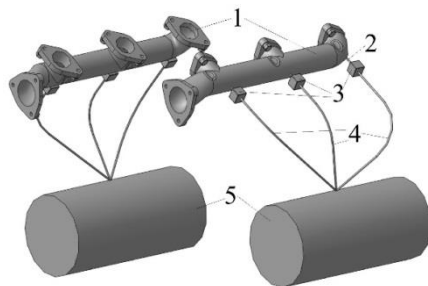


Рис. 7. Трехмерная модель выпускной системы с эжекцией дизеля 6Н 13/14: 1 – выпускной коллектор; 2 – эжекционная трубка; 3 – электромагнитные клапаны; 4 – трубопровод со сжатым воздухом; 5 – источник сжатого воздуха

Fig. 7. Three-dimensional model of the exhaust system with diesel ejection 6H 13/14: 1 – exhaust manifold; 2 – ejection tube; 3 – solenoid valves; 4 – compressed air pipeline; 5 – compressed air source

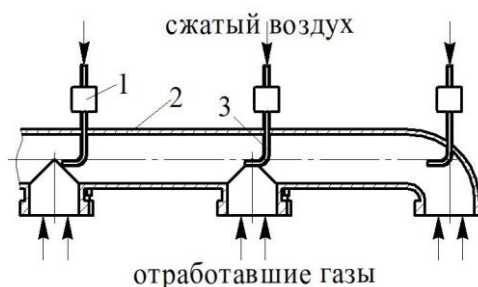


Рис. 8. Эскиз установки эжекционных трубок в выпускную систему дизеля 6Н 13/14: 1 – электромагнитный клапан; 2 – выпускной коллектор; 3 – эжекционная трубка

Fig. 8. Sketch of the installation of ejection tubes in the exhaust system of diesel 6H 13/14: 1 – solenoid valve; 2 – exhaust manifold; 3 – ejection tube

На рисунке 9 представлена еще одна конструкция выпускной системы с эффектом эжекции для дизеля с наддувом 6ЧН 10,5/13,5.

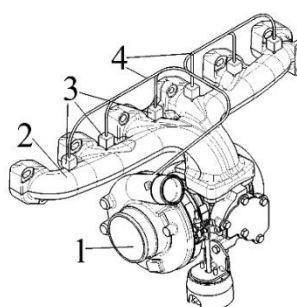


Рис. 9. Трехмерная модель выпускной системы с эжекцией для двигателя 6ЧН 10,5/13,5: 1 – турбокомпрессор; 2 – выпускной коллектор; 3 – электромагнитные клапаны; 4 – трубопроводы со сжатым воздухом

Fig. 9. Three-dimensional model of the exhaust system with ejection for the 6CHN 10.5/13.5 engine: 1 – turbocharger; 2 – exhaust manifold; 3 – solenoid valves; 4 – compressed air pipelines

Дополнительно была выполнена расчетно-аналитическая оценка положительных эффектов по улучшению надежности от подавления теплоотдачи в выпускной системе с эжекцией. Применительно к тепловозному двигателю 6ЧН 21,5/18,5 была рассчитана интенсивность отказов для базовой и модернизированной систем выпуска. Статистические данные для базовой модификации выпускной системы были предоставлены ООО «Уральский дизель-моторный завод». На основании этих данных была пересчитана вероятность безотказной работы для рассматриваемого дизеля при наработке 2000 часов, которая выросла в диапазоне 1,11-1,74 %.

Таким образом, инженерные проработки конструкций выпускных систем для разных дизелей показали, что все модификации поршневых ДВС могут быть оснащены системой эжекции без существенного увеличения затрат (материальных, технологических, эксплуатационных). При этом, данная система может быть применима для двигателей различного назначения, разных типов и мощностей, а также работающих на бензине или дизельном топливе. Одним из важнейших условий применения системы эжекции состоит в создании необходимого разрежения в выпускном тракте. Оно должно быть не сильно высоким, поскольку может вызвать заклинивание канала и ухудшение очистки цилиндра. Но и не слабым, чтобы наблюдалось выравнивание скоростей и изменение структуры пульсирующего потока.

Выводы

Можно сформулировать следующие основные выводы на основе анализа данных, представленных в статье.

1. Создана оригинальная лабораторная установка, позволяющая исследовать нестационарные процессы в аэродинамических системах, конфигурация которых характерна для выпускных систем поршневых двигателей. Используемая система измерений позволила получить уникальные экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в системе выпуска ПДВС. На основе спектрального анализа удалось сделать выводы о влиянии системы наддува (лопаток турбины турбокомпрессора) на структуру течения, а

также предложить способ газодинамического совершенствования выпускной системы двигателя.

2. Турбина турбокомпрессора оказывает значимое влияние на аэромеханические характеристики потоков в выпускной системе ПДВС. Наибольшее снижение максимальной скорости потока в выпускном канале при установке ТК достигает трех раз по сравнению со случаем без ТК. Также имеет место выраженное затухание флуктуаций статического давления потока $p_x = f(\tau)$ в выпускном канале с ТК. Происходит снижение расходных характеристик через рассматриваемую систему, что указывает на то, что турбина ТК воздействует на газодинамическую систему как мощное аэродинамическое сопротивление. При этом, спектральный анализ закономерностей $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$ показывает, что влияние турбокомпрессора на поток имеет более сложный физический механизм. Наблюдается заметное гашение пульсационных составляющих в закономерностях $w_x = f(\tau)$ (амплитуда спектра снижается до 2 раз) в случае наличия турбокомпрессора в системе выпуска. Однако, пульсационные составляющие в функции $p_x = f(\tau)$ возрастают в 2-3 раза, что особенно характерно для низкочастотных составляющих спектра. Это свидетельствует об изменении структуры потока, наличии возмущающих факторов и повышении общей аэромеханической динамики процесса выпуска в ПДВС.

3. Предложен способ управления аэромеханическими характеристиками потоков в выпускной системе ПДВС с ТК и без него. Показано, что создание эффекта эжекции в выпускной системе приводит к значимому изменению аэромеханики потоков. Рост максимальной скорости потока в выпускном канале достигает 20 % по сравнению с базовой системой выпуска. Расходные характеристики через модифицированную систему выпуска возрастают на 6-12 %. Спектральный анализ закономерностей $w_x = f(\tau)$ выявил, что эффект эжекции приводит к снижению пульсационных составляющих скорости потока при частотах вращения коленвала до 1500 мин⁻¹ (снижение составляет до 9 % по сравнению с базовой системой). Тогда, как высоких частотах ($n \approx 3000$ мин⁻¹) не наблюдается существенных отличий в графиках амплитуд спектра скорости (максимальные отличия $\pm 3,3$ %).

4. В прикладном аспекте исследования было установлено, что применение эффекта эжекции в дизеле размерность 21,5/18,5 повысит надежность элементов выпускной системы в среднем на 1,5 % по сравнению с базовым ПДВС.

5. Выполнена инженерная проработка установки системы эжекции в выпускные системы дизельных двигателей 6Н 13/14 и 6ЧН 10,5/13,5, которая показала, что любые ПДВС могут быть оснащены рассматриваемой системой без существенных изменений конструкций и материальных затрат. Также для дизеля 6ЧН 21/21 на основе численного моделирования рабочего процесса показано, что установка системы эжекции в выпускной тракт приводит к снижению коэффициента остаточных газов до 10 % на частичных режимах работы ПДВС, что вызывает уменьшение удельного расхода топлива в пределах 1,1 %.

6. Данные об аэромеханических процессах в газодинамических системах сложной конфигурации расширяют базу знаний в области механики жидкостей и газов, а также могут найти практическое применение при разработке уникальных систем газообмена двигателей с турбонаддувом и без него.

Литература

1. Breeze P. Piston Engine-Based Power Plants. UK: Academic Press, 2017. 102 p.
2. Flint M., Pirault J.P. Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications. USA: SAE International, 2009. 576 p.
3. Baechtel J. Performance Automotive Engine Math. USA: S-A Design, 2011. 160 p.
4. Liu Z.G., Swor T.A., Deilzen J.A., Severance C.L., Schauer J.J. A source dilution sampling system for characterization of engine emissions under transient or steady-state operation // Aerosol Science and Technology. 2008. V. 42. No 4. P. 270-280.
5. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer // Procedia Engineering, 2017. V. 206. P. 80-85.
6. Fernoaga V., Sandu V., Balan T. Artificial intelligence for the prediction of exhaust back pressure effect on the performance of diesel engines // Applied Sciences (Switzerland). 2020. V. 10. No 20. Article number 7370.
7. Khoa N.X., Quach Nhu Y., Lim O. Estimation of parameters affected in internal exhaust residual gases recirculation and the influence of exhaust residual gas on performance and emission of a spark ignition engine // Applied Energy. 2020. V. 278. Article number 115699.

8. Aiello V.C., Kini G., Staedter M.A., Garimella S. Investigation of fouling mechanisms for diesel engine exhaust heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2020. V. 181. Article number 115973.
9. Huang T., Hu G., Meng Z., Zeng D. Exhaust temperature control for safe and efficient thermal regeneration of diesel particulate filter // *Applied Thermal Engineering*. 2021. V. 189. Article number 116747.
10. Antanenkova I.S., Koroleva A.P., Frantsuzov M.S., Sukhikh A.A., Sytchev V.V. Designing the Main Heat-Transfer Equipment of an ORC-System for the Internal Combustion Engines of Shipboard Installations // *Thermal Engineering*. 2021. V. 68. No 1. P. 25-36.
11. Jiang W., Shen T. Nonlinear observer-based exhaust manifold pressure estimation and fault detection for gasoline engines with exhaust gas recirculation // *International Journal of Engine Research*. 2021. V. 22. No 4. P. 1377-1392.
12. Nyerges Á., Zöldy M. Verification and comparison of nine exhaust gas recirculation mass flow rate estimation methods // *Sensors (Switzerland)*. 2020. V. 20. No 24. Article number 7291.
13. Boulanger J., Liu F., Neill W.S., Smallwood G.J. An improved soot formation model for 3d diesel engine simulations // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. V. 129. No 3. P. 877-894.
14. Wang Q., Li Y., Hu H. Numerical simulation of remote infrared imaging for marine exhaust system using wide-band k-distribution model combined with a new grouping method for spectral sub-intervals // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 96. P. 276-290.
15. Ali S.M., Chakraborty A. Thermodynamic modelling and performance study of an engine waste heat driven adsorption cooling for automotive air-conditioning // *Applied Thermal Engineering*. 2015. V. 90. P. 54-63.
16. Kim K.-H., Kong K.-J. One-dimensional gas flow analysis of the intake and exhaust system of a single cylinder diesel engine // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. V. 8. No 12. Article number 1036.
17. Kong K.-J., Jung S.-H., Jeong T.-Y., Koh D.-K. 1D-3D coupling algorithm for unsteady gas flow analysis in pipe systems // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. V. 33. No 9. P. 4521-4528.
18. Nasir E.F., Sanders S.T. Laser absorption tomography for ammonia measurement in diesel engine exhaust // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2020. V. 126. No 11. Article number 178.
19. Kim H.-S. Effect of exhaust manifold geometry and engine parameters on flow pulsations inside the exhaust system with CCC under firing conditions // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. V. 35. No 2. P. 805-813.
20. Miller J. *Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems*. USA: S-A Design, 2008, 162 p.
21. Leufvén O., Eriksson L. Measurement, analysis and modeling of centrifugal compressor flow for low pressure ratios // *International Journal of Engine Research*. 2016. V. 17. No 2. P. 153-168.
22. Plotnikov L.V. Features of the gas dynamics and local heat transfer in intake system of piston engine with supercharging // *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017. V. 899. Article number 042008.
23. Pu R. *Hyperspectral remote sensing: fundamentals and practices*. USA: CRC Press, 2017. 466 p.
24. Budko A.Y., Nazarkin A.S., Medvedev M.Y. A study of shock wave processes in the combustion chamber and the estimation method of the knock intensity based on ion current signal analysis // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. V. 13. No 11. P. 3667-3672.
25. Demic M.D., Glisovic Ja.D. Contribution to research of thermal loads in commercial vehicles powertrain mounts // *Vojnotehnički glasnik*. 2017. V. 65. No 4. P. 882-903.
26. Danilov I., Popova I., Moiseev Yu. Analysis and validation of the dynamic method for diagnosing diesel engine connecting rod bearings // *Transport Problems*. 2018. V. 13. No 1. P. 123-133.
27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P. 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. Article number 114123.
28. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. Improvement of the thermal and mechanical flow characteristics in the exhaust system of piston engine through the use of ejection effect // *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017. V. 891. Article number 012154.

29. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. Improved cleaning of the engine cylinder from the exhaust gas using the active ejection in the exhaust tract // *Applied mechanics and materials*. 2015. V. 792. P. 553-558.

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.

Осипов Леонид Евгеньевич – аспирант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: klumbaa@outlook.com.

Десятов Константин Олегович – магистрант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: iwan.logo2018@yandex.ru.

References

1. Breeze P *Piston Engine-Based Power Plants*. UK: Academic Press, 2017. 102 p.
2. Flint M, Pirault JP *Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications*. USA: SAE International, 2009. 576 p.
3. Baechtel J. *Performance Automotive Engine Math*. USA: S-A Design, 2011. 160 p.
4. Liu ZG, Swor TA, Deilzen JA, et al. A source dilution sampling system for characterization of engine emissions under transient or steady-state operation. *Aerosol Science and Technology*. 2008;42(4):270-280.
5. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer. *Procedia Engineering*. 2017;206:80-85.
6. Fernoaga V, Sandu V, Balan T Artificial intelligence for the prediction of exhaust back pressure effect on the performance of diesel engines. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020;10(20):7370.
7. Khoa NX, Quach NY, Lim O Estimation of parameters affected in internal exhaust residual gases recirculation and the influence of exhaust residual gas on performance and emission of a spark ignition engine. *Applied Energy*. 2020;278:115699.
8. Aiello VC, Kini G, Staedter MA, et al. Investigation of fouling mechanisms for diesel engine exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2020;181:115973.
9. Huang T, Hu G, Meng Z, et al. Exhaust temperature control for safe and efficient thermal regeneration of diesel particulate filter. *Applied Thermal Engineering*. 2021;189:116747.
10. Antanenkova IS, Koroleva AP, Frantsuzov MS, et al. Designing the Main Heat-Transfer Equipment of an ORC-System for the Internal Combustion Engines of Shipboard Installations. *Thermal Engineering*. 2021;68(1):25-36.
11. Jiang W, Shen T Nonlinear observer-based exhaust manifold pressure estimation and fault detection for gasoline engines with exhaust gas recirculation. *International Journal of Engine Research*. 2021;22(4):1377-1392.
12. Nyerges Á, Zöldy M Verification and comparison of nine exhaust gas recirculation mass flow rate estimation methods. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(24):7291.
13. Boulanger J, Liu F, Neill WS, et al. An improved soot formation model for 3d diesel engine simulations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007;129(3):877-894.
14. Wang Q, Li Y, Hu H Numerical simulation of remote infrared imaging for marine exhaust system using wide-band k-distribution model combined with a new grouping method for spectral sub-intervals. *Infrared Physics & Technology*. 2019;96:276-290.

15. Ali SM, Chakraborty A Thermodynamic modelling and performance study of an engine waste heat driven adsorption cooling for automotive air-conditioning. *Applied Thermal Engineering*. 2015;90:54-63.
16. Kim K-H, Kong K-J One-dimensional gas flow analysis of the intake and exhaust system of a single cylinder diesel engine. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(12):1036.
17. Kong K-J, Jung S-H, Jeong T-Y, et al. 1D-3D coupling algorithm for unsteady gas flow analysis in pipe systems. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019;33(9):4521-4528.
18. Nasir EF, Sanders ST Laser absorption tomography for ammonia measurement in diesel engine exhaust. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2020;126(11):178.
19. Kim H-S Effect of exhaust manifold geometry and engine parameters on flow pulsations inside the exhaust system with CCC under firing conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021;35(2):805-813.
20. Miller J Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems. USA: S-A Design, 2008, 162 p.
21. Leufvén O, Eriksson L Measurement, analysis and modeling of centrifugal compressor flow for low pressure ratios. *International Journal of Engine Research*. 2016;17(2):153-168.
22. Plotnikov LV Features of the gas dynamics and local heat transfer in intake system of piston engine with supercharging. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017;899:042008.
23. Pu R Hyperspectral remote sensing: fundamentals and practices. USA: CRC Press, 2017. 466 p.
24. Budko AY, Nazarkin AS, Medvedev MY A study of shock wave processes in the combustion chamber and the estimation method of the knock intensity based on ion current signal analysis. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(11):3667-3672.
25. Demic MD, Glisovic JaD Contribution to research of thermal loads in commercial vehicles powertrain mounts. *Vojnotehnički glasnik*. 2017;65(4):882-903.
26. Danilov I, Popova I, Moiseev Y Analysis and validation of the dynamic method for diagnosing diesel engine connecting rod bearings. *Transport Problems*. 2018;13(1):123-133.
27. Plotnikov LV, Zhilkin BP 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;160:114123.
28. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM Improvement of the thermal and mechanical flow characteristics in the exhaust system of piston engine through the use of ejection effect. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017;891:012154.
29. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM Improved cleaning of the engine cylinder from the exhaust gas using the active ejection in the exhaust tract. *Applied mechanics and materials*. 2015;792:553-558.

Authors of the publication

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

Boris P. Zhilkin – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

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

Leonid E. Osipov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Konstantin O. Desyatov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Получено 28.01.2022г.

Отредактировано 18.02.2022г.

Принято 25.02.2022г.