



СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВО ВПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТУРБОНАДДУВОМ

Л.В. Плотников, Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Д.С. Шестаков, Л.Е. Осипов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

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

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Провести спектральный анализ газодинамических характеристик нестационарных потоков во впускных системах поршневых двигателей с турбонаддувом и без него, оценить уровень влияния механического воздействия лопаток компрессора на структуру течения, а также разработать метод совершенствования газодинамических процессов в системе впуска. *МЕТОДЫ.* Лабораторный эксперимент был выбран для решения поставленных задач. Была создана натурная модель одноцилиндрового двигателя с турбонаддувом. Также была возможность изменять скорости вращения коленвала и ротора турбокомпрессора в широком диапазоне. Система сбора и обработки экспериментальных данных на основе аналого-цифрового преобразователя использовалась в исследовании. Данные об изменении локальных значений скорости и статического давления потоков во впускной системе в течении рабочего цикла двигателя были получены с помощью термоанемометра постоянной температуры и быстродействующего датчика давления. Спектральный анализ функций скорости и давления потока от времени проводился на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье представлен сравнительный анализ спектров амплитуд пульсаций скорости и давления потока в системе впуска двигателя с турбонаддувом и без него. Также предложен метод стабилизации нестационарного течения воздуха в системе впуска путем установки выравнивающей решетки в канал компрессора турбокомпрессора. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Выявлено, установка турбокомпрессора приводит к существенному изменению структуры газовых потоков в системе впуска двигателя. Установлено, что наличие выравнивающей решетки в системе впуска двигателя с турбонаддувом приводит к снижению низкочастотных амплитуд пульсаций скорости и давления нестационарного потока до 40 %. Показано, что вероятность безотказной работы двигателя 2ЧН 8,2/7,1 возрастает почти на 1 % при использовании в системе впуска выравнивающей решетки.

Ключевые слова: поршневой двигатель; турбонаддув; система впуска; газодинамика; пульсирующие потоки; спектральный анализ.

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., Шестаков Д.С., Осипов Л.Е. Спектральный анализ газодинамических процессов во впускной системе поршневого двигателя с турбонаддувом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 43-54. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-43-54.

SPECTRAL ANALYSIS OF GAS DYNAMIC PROCESSES IN THE INLET SYSTEM OF A PISTON ENGINE WITH TURBOCHARGER

LV. Plotnikov, YM. Brodov, BP. Zhilkin, DS. Shestakov, LE. Osipov

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 carry out a comparative analysis of the spectra of gas-dynamic characteristics of flows in the intake systems of piston engines with and without turbocharging,

to assess the degree of influence of the turbocharger on the flow structure in such systems, and also to propose a method for the gas-dynamic improvement of processes in the system under consideration. **METHODS.** Due to the complexity of the object of research, an experimental approach was taken as a basis. The experiments were carried out on a single-cylinder piston engine model, which could be equipped with a turbocharger. A system for collecting and processing experimental data based on an analog-to-digital converter was used in the study. Data on changes in local values of velocity and static pressure of pulsating flows in the intake system during the engine's operating cycle were obtained using a constant temperature hot-wire anemometer and a fast-acting pressure sensor. Spectral analysis of functions of flow velocity and pressure versus time was carried out on the basis of the fast Fourier transform algorithm. **RESULTS.** The article presents a comparative analysis of the spectra of the amplitudes of the velocity and pressure pulsations in the intake system of an engine with and without turbocharging. Also proposed is a method for stabilizing the pulsating flow in the intake system by installing a leveling grid in the outlet channel of the turbocharger compressor. **CONCLUSION.** It is shown that the installation of a turbocharger leads to a significant change in the structure of gas flows in the intake system of the engine. It has been established that the presence of a leveling grid in the intake system of a turbocharged piston engine leads to a decrease in the low-frequency amplitudes of the flow velocity and pressure pulsations up to 30%. It is shown that the probability of failure-free operation of an automobile engine (cylinder diameter – 82 mm, piston stroke – 71 mm) increases by almost 1% when a leveling grille is used in the intake system.

Keywords: piston engine; turbocharging; intake system; gas dynamics; pulsating flows; spectral analysis.

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

For citation: Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, Shestakov DS, Osipov LE. Spectral analysis of gas dynamic processes in the inlet system of a piston engine with turbocharger. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(4):43-54. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-43-54.

Введение

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) являются самими распространенными тепловыми двигателями в мире. Известно, что совершенство газодинамических процессов в системах впуска и выпуска ПДВС во многом определяет эффективность рабочего цикла вследствие влияния на качество процессов газообмена, а также протекание процессов смесеобразования и сгорания [1-3]. Так, наличие турбулентных структур разного масштаба в системе впуска влияет на ее гидродинамическое сопротивление, а их наличие в цилиндре ПДВС определяет условия и степень перемешивания воздуха и топлива [4-6]. Многие научно-технические исследования посвящены изучению структуры течений в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом и без него на основе численного моделирования потоков [7-11]. Эти исследования показывают, что за счет изменения конструкции систем газообмена, в частности, впускной системы можно улучшить эффективность поршневых двигателей, т.е. снизить расход топлива вплоть до 6 %, а также повысить удельную мощность ПДВС на 1,5-5%. Следует отметить, что в большинстве случаев результаты численного моделирования рабочего процесса и процессов газообмена подтверждаются экспериментально на основе стендовых и эксплуатационных испытаний. Физико-математическое моделирование выполняется обычно для стационарных потоков газа, но можно найти исследования и для пульсирующих течений газов в системах газообмена [12-14]. Эти исследования направлены на совершенствование математического аппарата, применяемого в инженерных расчетах с целью повышения их точности, а также для разработки математических моделей, которые более достоверно описывают нестационарные физические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом и без него. Многие результаты моделирования также подтверждаются экспериментальными данными, что подтверждает достоверность и адекватность, предлагаемых математических моделей. Отдельно можно выделить экспериментальные научно-технические исследования направленных на улучшение эффективности поршневых

двигателей за счет настройки (доводки) конструкций впускной и выпускной систем [15-18]. В рассматриваемых статьях показано влияние конструкции систем газообмена на шумовые и экологические характеристики двигателя, на технико-экономические показатели, а также влияние условий на впуске на КПД, мощность и приемистость ПДВС. И как показывают результаты исследований, газодинамическое совершенствование процессов во впускной системе поршневого двигателя это действенный способ улучшить его эксплуатационные показатели. В последние годы также появились экспериментальные исследования структуры потоков в рассматриваемых системах с помощью оптических методов (в частности, посредством быстродействующего PIV-метода) [19-21]. Однако, следует отметить, что в большинстве случаев эти исследования дают только визуальную картину структуры потоков, на основе которой можно лишь предполагать о масштабе турбулентности в трубопроводах и цилиндре двигателя. При этом, известно, что установка турбокомпрессора (ТК) приводит к существенному изменению газодинамических процессов в системах впуска и выпуска тепловых двигателей [22, 23]. Оценка степени влияния лопаточного аппарата компрессора ТК на структуру и масштаб турбулентности нестационарных потоков в системе впуска ПДВС является актуальной задачей. Не менее важной задачей является поиск способов управления газодинамикой и теплообменом потоков в системах газообмена энергетических машин и установок на базе поршневых двигателей.

Спрогнозировать уровень турбулентных вихрей в газоздушных системах на этапе проектирования поршневых двигателей можно на основе спектрального анализа периодических функций скорости и давления потоков. Таким образом, основными задачами этого исследования являются: (1) провести спектральный анализ газодинамических характеристик нестационарных потоков во впускных системах ПДВС с турбонаддувом и без него, (2) оценить уровень влияния механического воздействия лопаток компрессора турбокомпрессора на структуру течения, а также (3) разработать метод совершенствования газодинамических процессов в системе впуска.

Материалы и методы

Натурная модель поршневого двигателя (диаметр цилиндра – 82 мм, ход поршня – 71 мм) с турбокомпрессором ТКР6 использовалась для изучения газодинамических процессов в системе впуска. Сгорание топливно-воздушной смеси в цилиндре ПДВС не осуществлялось. Асинхронный электродвигатель и преобразователь частоты применялись для вращения коленчатого вала ПДВС. Диапазон изменения скорости вращения коленвала ПДВС составлял от 600 до 3000 мин⁻¹. Ротор турбокомпрессора приводился во вращение путем подачи сжатого воздуха от внешнего источника на лопатки турбины ТК. То есть в турбокомпрессоре отсутствовал внутренний теплообмен, характерный для реальной работы турбонаддува на ПДВС. Это позволило сконцентрироваться на газодинамических явлениях в системе впуска. Скорость вращения ротора ТК изменялась от 20000 до 60000 мин⁻¹. Режимы работы двигателя и турбокомпрессора были выбраны исходя из согласования расхода воздуха через цилиндры ПДВС и производительности ТК. В дальнейших исследованиях планируется расширить диапазон частот вращения. Конфигурация впускной системы была следующей: длина впускного трубопровода составляла 300 мм, длина выходного канала компрессора – 150 мм, внутренний диаметр каналов – 32 мм. Исследуемая система впуска была без охладителя наддувочного воздуха. Контрольное сечение с датчиками располагалось на расстоянии 150 мм до входного окна головки цилиндра. В качестве рабочей среды использовался воздух с температурой 20-25 °С (двигатель без ТК) и с температурой 35-45 °С (ПДВС с ТК).

В данной работе исследования газовых потоков во впускной системе поршневых двигателей проводились с учетом газодинамической нестационарности [24], т.е. определялись газодинамические параметры пульсирующих потоков газа. На первом этапе исследований изучалась газодинамика течений в системе впуска двигателя без турбокомпрессора. Физический механизм движения воздуха в данном случае состоит в создании волн разрежения в цилиндре двигателя. На втором этапе изучалась газодинамика потоков в системе впуска ПДВС с ТК. В этом случае физический механизм движения воздуха меняется: источником движения уже являются волны сжатия после турбокомпрессора (избыточное давление). Более того, на нестационарный поток воздуха оказывает механическое воздействие лопатки центробежного компрессора ТК. При этом уровень воздействия зависит от скорости вращения ротора турбокомпрессора (определяет амплитуду и частоту возмущений). По мнению авторов, это должно привести к существенному изменению структуры и газодинамических параметров потока воздуха. На третьем этапе был предложен способ стабилизации пульсирующих потоков газа в системе впуска путем установки выравнивающей решетки (ВР) по принципу хонейкомба в выходном канале компрессора ТК. Научная гипотеза применения ВР в системе впуска

двигателя основывается на том, что различные стабилизирующие устройства направлены на выравнивание поля скоростей в газодинамических системах и на снижение пульсационных составляющих скорости потока [25, 26]. Это может положительно сказаться на работе компрессора турбокомпрессора в системе впуска ПДВС с ТК, что приведет к росту КПД.

В ходе проведения опытов определялись мгновенные значения средней по сечению скорости потока воздуха w_x и мгновенные значения статического давления p_x во впускном трубопроводе ПДВС. Для определения w_x использовался термоанемометр постоянной температуры. Быстродействие термоанемометра составляло 2 мс. Для определения p_x использовался датчик давления фирмы WIKA (быстродействие составляло 1 мс). Подробный метод определения газодинамических параметров пульсирующих потоков описан в [27].

На основе данных о газодинамических характеристиках 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 [28, 29].

Результаты

На рисунке 1 показано изменение скорости w_x и давления p_x потока во времени во впускной системе за один рабочий цикл ПДВС с турбокомпрессором и без него. Данные представлены для разных режимов работы ТК и разных конструкций системы впуска (с ВР и без нее). Из рисунка 1 видно, что наличие турбокомпрессора в системе впуска теплового двигателя приводит к заметным изменениям в функции $w_x = f(\tau)$ как в процессе впуска, так и в период закрытого впускного клапана (рис. 1, а). В частности, можно отметить, что максимальные значения скорости потока увеличиваются в пределах 10-15 %, а также имеют место более выраженные флуктуации скорости потока воздуха во впускном трубопроводе. Примечательно, что эти колебания нестационарного потока наблюдаются в течении всего рабочего цикла ПДВС. Можно предположить, что они связаны с обратными волнами давления в системе впуска и влиянием лопаток компрессора ТК, которые воздействуют на основное течение и являются источником турбулентности. Следует отметить, что рассматриваемые колебания потока снижают КПД ТК, создают дополнительное гидравлическое сопротивление и, соответственно, снижают эффективность двигателя в целом. При этом, вид кривой $p_x = f(\tau)$ существенно зависит от наличия или отсутствия турбокомпрессора во впускной системе (рис. 1, б). В частности, наблюдается сглаживание пульсаций давления во впускной системе, а также рост средней величины давления за рабочий цикл.

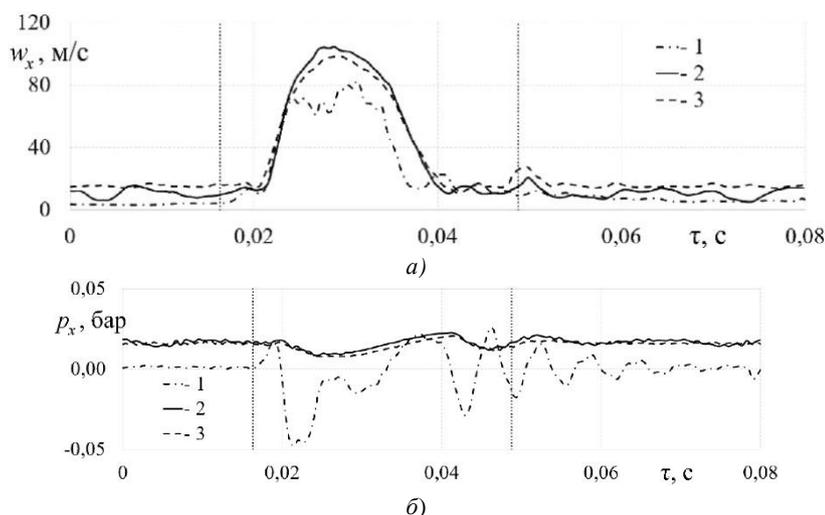


Рис. 1. Зависимости местной скорости w_x (а) и давления p_x (б) потоков воздуха от времени в системах впуска двигателей при разных условиях: 1 – двигатель без наддува при $n = 1500$ мин⁻¹; 2 – ПДВС с ТК при $n = 1500$ мин⁻¹ и $n_{TC} = 46000$ мин⁻¹; 3 – ПДВС с ТК с системой впуска с ВР ($n = 1500$ мин⁻¹ и $n_{TC} = 46000$ мин⁻¹)

Fig. 1. Dependences of local velocity w_x (a) and pressure p_x (b) of air flows on time in engine intake systems under different conditions: 1-engine without supercharging at $n = 1500$ min⁻¹; 2 – PDVS with TC at $n = 1500$ min⁻¹ and $n_{TC} = 46000$ min⁻¹; 3 – PDVS with TC with an intake system with BP ($n = 1500$ min⁻¹ and $n_{TC} = 46000$ min⁻¹)

На рисунке 2 представлены графики амплитуд спектра для функции $w_x = f(\tau)$ применительно к двигателям с турбонаддувом и без него. Данные получены для разных скоростей вращения коленвала ПДВС и ротора ТК. На рисунке 2 вертикальными линиями показаны значения амплитуд пульсаций для значимых частот спектра.

Из рисунка 2 видно, что установка турбокомпрессора приводит к существенному изменению структуры потока в системе впуска двигателя. Во-первых, изменяются значения значимых частот амплитуд пульсаций скорости потока воздуха. Значения значимых частот для атмосферного двигателя: 25,5 Гц, 50,6 Гц, 75,7 Гц и т.д. (кратность – 25,1). Значения частот для турбированного двигателя: 12 Гц, 24 Гц, 36 Гц и т.д. (кратность – 12). Это подтверждает серьезную перестройку структуры течения. Во-вторых, изменяется закономерность изменения амплитуд спектра функции $w_x = f(\tau)$. В одном случае закономерность является линейной, в другом – сложной, криволинейной. Это дополнительное доказательство заметной трансформации газодинамической структуры нестационарных потоков в системе впуска с ТК и без него. Из рисунка 2 видно, что график амплитуд спектра скорости потока воздуха во впускной системе двигателя без турбонаддува имеет практически линейный вид. Установка турбокомпрессора приводит к появлению значимой частоты в районе 15 Гц, а также к более сложному виду функции $A_w = f(f)$. Эти данные подтверждают предположение о влиянии внешней турбулентности на структуру нестационарного потока газа в рассматриваемой гидравлической системе.

На рисунке 3 представлены графики амплитуд спектра скорости потока воздуха в системе впуска ПДВС с турбокомпрессором для разных скоростей вращения ротора ТК. Представленные данные дают возможность оценить уровень перестройки газодинамической структуры течения в системе впуска в зависимости от эксплуатационного режима работы энергомашины на базе поршневого двигателя.

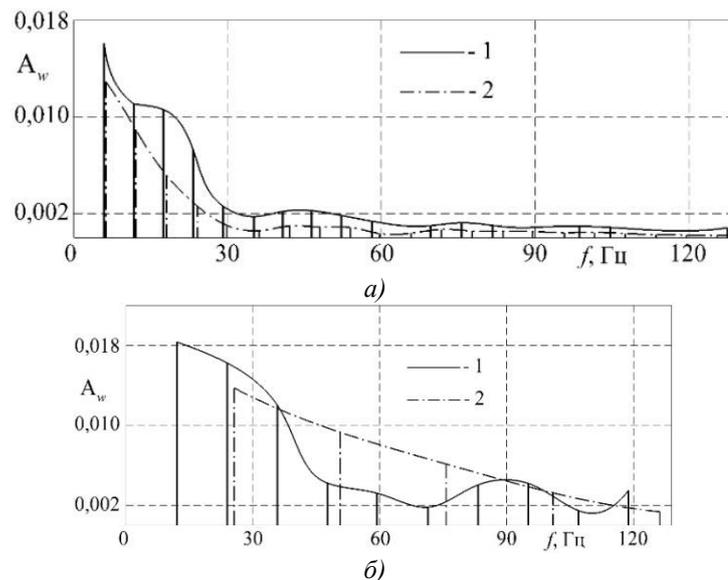


Рис. 2. Графики амплитуд спектра скорости потока воздуха w_x в системе впуска ПДВС с турбонаддувом (1) и без него (2) при разных условиях: а – $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{\text{TC}} = 46000 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{\text{TC}} = 46000 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 2. Graphs of the amplitude spectrum of air flow rate w_x into the intake system of the internal combustion engine with a turbocharger (1) and without (2) under different conditions: а – $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ and $PTS = 46000 \text{ min}^{-1}$; б – $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $PTS = 46000 \text{ min}^{-1}$

Из рисунка 3 видно, что скорость вращения ротора ТК оказывает заметное влияние на газодинамическую структуру течения воздуха в системе впуска ПДВС. При этом, можно отметить, что значимые амплитуды составляющих пульсаций имеют одинаковые частоты при всех значения n_{TC} : 12,1 Гц, 22,8 Гц, 33,5 Гц, 44,2 Гц и т.д. вплоть до 150 Гц. Кратность значимых частот составляет 10,7 Гц. Наибольшие отличия в амплитудах пульсаций скорости потока воздуха наблюдаются для первых трех значимых частот. Максимальная величина отличий может достигать 33 %. Это указывает на то, что уровень турбулентности течения воздуха в системе впуска в основном зависит от режима работы ПДВС и ТК. При этом, повышенная турбулентность потока может снизить КПД ТК, а также уменьшает степень наполнения цилиндра воздухом, поскольку в этом случае возрастает гидравлическое сопротивление рассматриваемой системы. Поэтому необходимо разрабатывать способы стабилизации нестационарных потоков в системе впуска поршневого двигателя, что особенно актуально для энергомашин на базе ПДВС с ТК.

Напомним, что в данной работе в качестве способа стабилизации пульсирующего потока воздуха применялась ВР по принципу хонейкомба, которая помещалась в выходной патрубок компрессора перед впускным трубопроводом ПДВС.

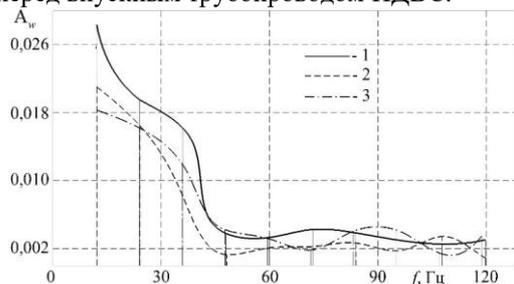


Рис. 3. Графики амплитуд спектра скорости потока воздуха w_x в системе впуска ПДВС с турбонаддувом при частоте вращения коленчатого вала $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и для разных частот вращения ротора ТК: 1 – $n_{тс} = 30000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_{тс} = 40000 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n_{тс} = 46000 \text{ мин}^{-1}$

Fig.3. Graphs of the amplitude spectrum of high-speed air flows w_x of the intake VAT system with turbocharging at a speed of rotation of the crankshaft $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and for various parts of the rotation of the TC rotor: 1-pts = 30000 min-1; 2-pts = 40000 min-1; 3-pts = 46000 min-1

На рисунке 4 представлены спектры функции $w_x = f(\tau)$ в базовой впускной системе и в системе впуска с ВР для фиксированного режима работы двигателя с турбонаддувом.

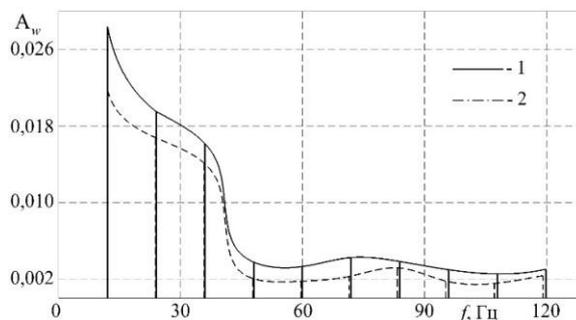


Рис. 4. Графики амплитуд спектра скорости потока воздуха w_x в базовой впускной системе (1) и в системе впуска с ВР (2) двигателей с турбонаддувом при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{тс} = 40000 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 4. Graphs of the amplitudes of the spectrum of the air flow velocity w_x in the basic intake system (1) and in the intake system with BP (2) of turbocharged engines at $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $n_{тс} = 40000 \text{ min}^{-1}$

Из рисунка 4 видно, что установка ВР не вызывает перестройку газодинамической структуры течения, поскольку вид кривой $A_w = f(f)$ не изменяется, а также не изменяются значимые частоты и их кратность. Однако, следует подчеркнуть, что амплитуды пульсаций скорости потока воздуха в системе впуска с ВР снижаются в пределах 5-15 % (в сравнении с базой). Это указывает на стабилизацию нестационарного течения, что потенциально может улучшить наполнение цилиндра воздухом (рабочим телом), вследствие снижения гидравлического сопротивления рассматриваемой системы. Более того, обнаруженная стабилизация течения в перспективе также может улучшить показатели надежности деталей и узлов системы впуска ПДВС с ТК, поскольку известно, что стабилизация пульсирующих потоков приводит к подавлению уровня теплоотдачи и, соответственно, снижению термических напряжений [30].

На рисунке 5 показаны графики амплитуд пульсаций спектра давления потока воздуха в системе впуска для разных скоростей вращения ротора ТК.

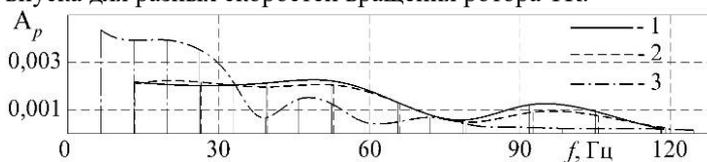


Рис. 5. Графики амплитуд спектра давления потока воздуха p_x в системе впуска ПДВС с турбонаддувом при скорости вращения коленвала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и для разных скоростей вращения ротора ТК: 1 – $n_{тс} = 30000 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_{тс} = 40000 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $n_{тс} = 46000 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 5. Graphs of the amplitude of the air flow pressure spectrum p_x of the turbocharged VAT intake system at the speed of rotation of the crankshaft $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ and for different speeds of rotation of the rotor TC: 1-pts = 30000 min-1; 2-pts = 40000 min-1; 3-pts = 46000 min-1

Из рисунка 5 видно, что для исследуемого типоразмера двигателя и турбокомпрессора заметные изменения в структуре потока воздуха наблюдаются при скоростях вращения ротора ТК выше 46000 мин^{-1} . Например, кратность значимых частот уменьшается в два раза (с 12 до 6 Гц) при $n_{тс} > 46000 \text{ мин}^{-1}$. Также возрастают амплитуды пульсаций давлений на величину до 40 % при частотах не более 30 Гц по сравнению с низкими скоростями вращения ротора ТК ($20000 < n_{тс} < 40000 \text{ мин}^{-1}$). По мнению авторов, это связано с тем, что при высоких скоростях вращения $n_{тс}$ турбокомпрессор имеет избыточную производительность по отношению к поршневому двигателю. Вследствие этого возрастают возвратно-поступательные колебания потока воздуха в системе впуска с высокой степенью турбулентности потока.

На рисунке 6 для сравнения показаны графики амплитуд спектра давления потока воздуха в базовой впускной системе и в системе впуска с ВР для скоростей вращения коленвала ПДВС и ротора ТК.

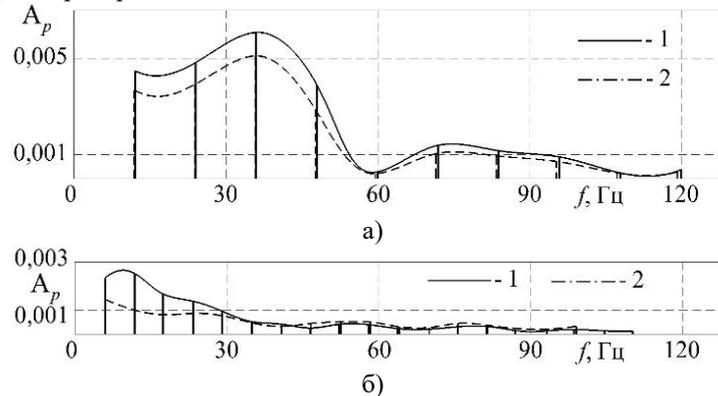


Рис. 6. Графики амплитуд спектра давления потока воздуха p_x в базовой впускной системе (1) и в системе впуска с ВР (2) для двигателей с турбонаддувом при разных скоростях вращения коленвала ПДВС и ротора ТК: а – $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{тс} = 40000 \text{ мин}^{-1}$; б – $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ и $n_{тс} = 46000 \text{ мин}^{-1}$

Fig. 6. Graphs of the amplitude spectrum of the pressure of the air flow in the base p_x intake system (1) and in the intake with VR (2) for propulsion turbo at different rotation speed of the crankshaft VAT and rotor TK – a – $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $VTS = 40000 \text{ min}^{-1}$; b – $n = 600 \text{ min}^{-1}$ and $VTS = 46000 \text{ min}^{-1}$

Из рисунка 6 видно, что установка ВР не вызывает изменения амплитуд значимых частоты и их кратности. Можно отметить, что амплитуды пульсаций давления потока воздуха в системе впуска с ВР снижаются в среднем на 10-12 %, что характерно для частот до 60 Гц. Это указывает на выравнивание поля скоростей и давлений в трубопроводе, что потенциально может привести к более полному заполнению цилиндра воздухом (рабочим телом), а также улучшению процессов смесеобразования и сгорания в ПДВС.

Обсуждение

Рассмотрим прикладное значение полученных результатов в области поршневого двигателестроения. Схема (с геометрическими размерами) и фотография ВР для системы впуска автомобильного двигателя 2ЧН 8,2/7,1 с турбонаддувом представлены на рисунке 7 в качестве примера конструкторской реализации способа газодинамического совершенствования процессов в системе впуска.

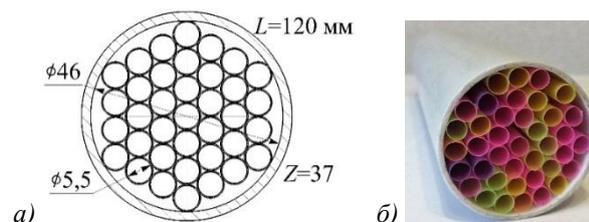


Рис. 7. Геометрические размеры (а) и фотография (б) выравнивающей решетки, устанавливаемой во впускную систему выходной канал компрессора

Fig. 7. Geometric dimensions (a) and photo (b) of the leveling grid installed in the intake system of the compressor output channel

Проводилась расчетная оценка потенциальных положительных эффектов в области поршневого двигателестроения от применения впускных систем с выравнивающей решеткой. Так, подавление уровня теплоотдачи между потоком и стенками трубопровода в системе впуска с ВР вызывает снижение термических напряжений в деталях и узлах тепловых двигателей, что улучшает их надежность, а именно, показатели безотказности. Для поршневого двигателя 2ЧН 8,2/7,1 проведен расчет интенсивность отказов для базовой и модернизированной системы впуска (рис. 7, а). Исходные данные для расчета были взяты из статистических данных по отказам впускных систем для различных автомобильных двигателей и усреднены. На основе изменения интенсивности отказов была пересчитана вероятность безотказной работы для рассматриваемого дизеля при наработке 3000 часов (средний период прохождения технического обслуживания автомобильного ПДВС), которая выросла на 0,8 % (рис. 7, б).

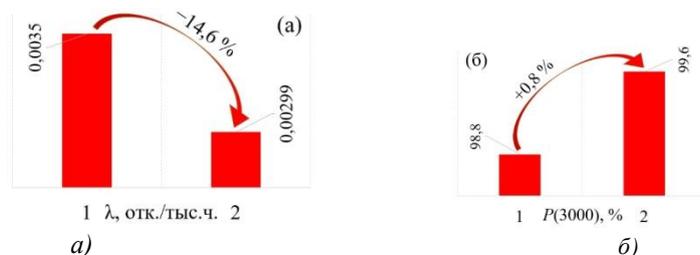


Рис. 8. Диаграммы изменения интенсивности отказов головок цилиндра λ (а) и вероятности их безотказной работы P (б) для дизеля 2ЧН 8,2/7,1 с базовой впускной системой (1) и впускной системой с выравнивающей решеткой (2)

Fig. 8. Diagrams of changes in the failure rate of cylinder heads λ (a) and the probability of their trouble-free operation P (b) for a 2CHN 8,2/7,1 diesel engine with a basic intake system (1) and an intake system with a leveling grid (2)

Следует отметить, что применение выравнивающей решетки в системах впуска поршневых двигателей не потребует существенных экономических и технологических затрат. Потенциальные положительные эффекты могут заключаться, как в увеличении КПД турбокомпрессора (за счет газодинамической стабилизации течения в системе впуска), так и в повышении надежности (безотказности) систем и агрегатов двигателя с турбонаддувом. По предварительным оценкам стабилизация нестационарных потоков в системе впуска ПДВС с ТК вызовет рост КПД турбокомпрессора в среднем на 2,5 %, что приведет к увеличению КПД теплового двигателя в пределах 0,1-0,3 %.

Выводы

На основе проведенных опытов и спектрального анализа газодинамических зависимостей нестационарных потоков воздуха во системе впуска ПДВС можно сформулировать ключевые выводы:

- ввиду сложности объекта исследования, изучение газодинамики нестационарных потоков воздуха лучше проводить на натурных моделях, которые с достаточной точностью воспроизводят физические и геометрические характеристики реальных объектов;
- спектральный анализ является действенным методом для мониторинга изменения газодинамической структуры нестационарных потоков в системе впуска ПДВС;
- наличие компрессора турбокомпрессора в системе впуска ПДВС вызывает заметные изменения газодинамической структуры нестационарных потоков, а именно, (1) имеет место рост амплитуд пульсаций скорости потока (от 25 до 45 % по сравнению с базовой гидравлической системой) при неизменности кратности значимых частот; (2) скорость вращения ротора турбокомпрессора обуславливает изменение графиков спектров функций скорости и давления нестационарного потока в области низкочастотных пульсаций (до 40-55 Гц) при неизменности кратности значимых частот;
- разработан метод снижения амплитуд пульсаций скорости и давления нестационарного потока в системе впуска до 30 % (по сравнению с базовой системой) с помощью установки выравнивающей решетки в выходной канал компрессора; это также приводит к подавлению интенсивности теплоотдачи в пределах 15 %;
- показано, что вероятность безотказной работы поршневого двигателя 2ЧН 8,2/7,1 возрастает почти на 1 % при использовании во впускной системе с каналом с выравнивающей решеткой.

Полученные данные о стабилизации пульсирующих потоков воздуха позволят увеличить расходные характеристики впускных системы поршневых двигателей с ТК, повысить их надежность, а также улучшить процессы смесеобразования и сгорания.

Литература

1. Busch M.D. Mike Busch on Engines. New York: Savvy Aviation, 2018, 508 p.
2. Watson N., Janota M.S. Turbocharging the Internal Combustion Engine. London: Palgrave Macmillan Press, 1982. 608 p.
3. Breeze P. Piston Engine-Based Power Plants. India: Academic Press, 2017, 182 p.
4. Zhuang H., Hung D.L.S., Yang J., Tian S. Investigation of swirl ratio impact on in-cylinder flow in an SIDI optical engine // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2016. V. 138. No 8.
5. Lee K., Bae C., Kang K. The effects of tumble and swirl flows on flame propagation in a four-valve S.I. engine // Applied Thermal Engineering. 2007. V. 27. No 11-12. pp. 2122-2130.
6. Wahono B., Setiawan A., Lim O. Effect of the intake port flow direction on the stability and characteristics of the in-cylinder flow field of a small motorcycle engine // Applied Energy. 2021. V. 288.
7. Perini F., Zha K., Busch S., et al. Comparison of Linear, Non-Linear and Generalized RNG-Based k-epsilon Models for Turbulent Diesel Engine Flows // SAE Technical Papers. 2017.
8. Janas P., Wlokas I., Böhm B., et al. On the Evolution of the Flow Field in a Spark Ignition Engine // Flow, Turbulence and Combustion. 2017. V. 98. No 1. pp. 237-264.
9. Plotnikov L., Nevolin A., Nikolaev D. The flows structure in unsteady gas flow in pipes with different cross-sections // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 159. Article number 00035.
10. Souza GRD., Pellegrini C.D.C., Ferreira S.L., et al. Study of intake manifolds of an internal combustion engine: A new geometry based on experimental results and numerical simulations // Thermal Science and Engineering Progress. 2019. V. 9. pp. 248-258.
11. 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 (12).
12. Grishin Y.A., Zenkin V.A., Khmelev R.N. Boundary conditions for numerical calculation of gas exchange in piston engines // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. V. 90. No 4. pp. 965-970.
13. Bondar V., Aliukov S., Malozemov A., et al. Mathematical model of thermodynamic processes in the intake manifold of a diesel engine with fuel and water injection // Energies. 2020. V. 13 (17).
14. Zholobov L.A., Medvedev A.V., Pasin A.V., et al. Estimation of gas exchange parameters in the engine by numerical simulation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1679 (4).
15. Guo H., Fu B., Huang Z., et al. Design and optimization of air intake system based on FSC // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1600 (1).
16. Li Z., Zhang Y., Huang G., et al. Control of intake boundary conditions for enabling clean combustion in variable engine conditions under intelligent charge compression ignition (ICCI) mode // Applied Energy. 2020. V. 274.
17. Bae M.-W., Ku Y.J., Park H.-S. A study on effects of tuning intake and exhaust systems upon exhaust noises in a driving car of gasoline engine // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B. 2021. V. 45 (1). pp. 31-40.
18. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. Thermomechanical improvement of gas-air systems of turbocharged piston internal-combustion engines // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020. V. 93. No. 6. pp. 1557-1566.
19. Zhu Z., Lin R., Du A., Zhu P., Yuan Z. PIV Steady State Air Intake Experiment and Tumble Ratio Calculation of Gasoline Engines // Chinese Internal Combustion Engine Engineering. 2017. V. 38. No 4. pp. 121-127.
20. Li J., Wang T., Li W., Wang, et al. Experiment on tumble ratio measurement in a gasoline engine using 3D-PIV // Chinese Society for Internal Combustion Engines. 2017. V. 35, No 1. pp. 25-31.

21. Zhang X., Wang T., Jia M., et al. The Interactions of In-Cylinder Flow and Fuel Spray in a Gasoline Direct Injection Engine with Variable Tumble // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2015. V. 137, No 7.
22. Baines N.C. *Fundamentals of turbocharging*. Vermont: CONcepts NREC, 2005. 264 p.
23. Romagnoli A., Manivannan A., Rajoo S., et al. A review of heat transfer in turbochargers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 79. pp 1442-1460.
24. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P. Influence of gas-dynamical nonstationarity on local heat transfer in the gas–air passages of piston internal-combustion engines // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018. V. 91, No. 6. pp. 1444-1451.
25. Fransson J. H. M., Talamelli A., Brandt L., Cossu C. Delaying transition to turbulence by a passive mechanism // *Physical Review Letters*. 2006. V. 96 (6).
26. Choi H., Moin P., Kim J. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows // *Journal of Fluid Mechanics*. 1994. V. 262 (A). pp. 75-110.
27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P. The gas-dynamic unsteadiness effects on heat transfer in the intake and exhaust systems of piston internal combustion engines // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. V. 115. pp. 1182-1191.
28. Hashimoto K., Badarla V.R., Ideguchi T. High-Speed Fourier-Transform Infrared Spectroscopy with Phase-Controlled Delay Line // *Laser and Photonics Reviews*. 2021. V. 15 (1).
29. Bordbar H., Hostikka S., Boulet P., Parent G. Numerically resolved line by line radiation spectrum of large kerosene pool fires // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. V. 254.
30. Brodov Y.M., Grigoryev N.I., Zhilkin B.P., et al. Increasing Reliability of Gas–Air Systems of Piston and Combined Internal Combustion Engines by Improving Thermal and Mechanic Flow Characteristics // *Thermal Engineering*, 2015. V. 62. № 14. pp. 1038-1042.

Авторы публикации

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

Шестаков Дмитрий Сергеевич – доцент кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: dmshes@mail.ru.

Осинов Леонид Евгеньевич – магистрант, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: gerebola3@mail.ru.

References

1. Busch MD. *Mike Busch on Engines*. New York: Savvy Aviation. 2018, 508 p.
2. Watson N, Janota MS. *Turbocharging the Internal Combustion Engine*. London: Palgrave Macmillan Press. 1982. 608 p.
3. Breeze P. *Piston Engine-Based Power Plants*. India: Academic Press. 2017, 182 p.

4. Zhuang H, Hung DLS, Yang J, et al. Investigation of swirl ratio impact on in-cylinder flow in an SIDI optical engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016;138(8).
5. Lee K, Bae C, Kang K. The effects of tumble and swirl flows on flame propagation in a four-valve S.I. engine. *Applied Thermal Engineering*. 2007;27(11-12):2122-2130.
6. Wahono B, Setiawan A, Lim O. Effect of the intake port flow direction on the stability and characteristics of the in-cylinder flow field of a small motorcycle engine. *Applied Energy*. 2021;288.
7. Perini F, Zha K, Busch S, et al. *Comparison of Linear, Non-Linear and Generalized RNG-Based k-epsilon Models for Turbulent Diesel Engine Flows*. SAE Technical Papers. 2017.
8. Janas P, Wlokas I, Böhm B, et al. On the Evolution of the Flow Field in a Spark Ignition Engine // Flow, Turbulence and Combustion. 2017;98(1):237-264.
9. Plotnikov L, Nevolin A, Nikolaev D. *The flows structure in unsteady gas flow in pipes with different cross-sections*. EPJ Web of Conferences. 2017;159.
10. Souza GRD, Pellegrini C.C, Ferreira SL, et al. Study of intake manifolds of an internal combustion engine: A new geometry based on experimental results and numerical simulations. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019;9:248-258.
11. 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).
12. Grishin YA, Zenkin VA, Khmelev RN. Boundary conditions for numerical calculation of gas exchange in piston engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2017;90(4):965-970.
13. Bondar V, Aliukov S, Malozemov A, et al. Mathematical model of thermodynamic processes in the intake manifold of a diesel engine with fuel and water injection. *Energies*. 2020;13(17).
14. Zholobov LA, Medvedev AV, Pasin AV, et al. Estimation of gas exchange parameters in the engine by numerical simulation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1679(4).
15. Guo H, Fu B, Huang Z, et al. Design and optimization of air intake system based on FSC. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1600(1).
16. Li Z, Zhang Y, Huang G, Zhao W, et al. Control of intake boundary conditions for enabling clean combustion in variable engine conditions under intelligent charge compression ignition (ICCI) mode. *Applied Energy*. 2020;274.
17. Bae M.-W, Ku Y.J, Park H.-S. A study on effects of tuning intake and exhaust systems upon exhaust noises in a driving car of gasoline engine. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B*. 2021;45(1):31-40.
18. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM. Thermomechanical improvement of gas-air systems of turbocharged piston internal-combustion engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020;93(6):1557-1566.
19. Zhu Z, Lin R, Du A, et al. PIV Steady State Air Intake Experiment and Tumble Ratio Calculation of Gasoline Engines. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*. 2017;38(4):121-127.
20. Li J, Wang T, Li W, et al. Experiment on tumble ratio measurement in a gasoline engine using 3D-PIV. *Chinese Society for Internal Combustion Engines*. 2017;35(1):25-31.
21. Zhang X, Wang T, Jia M, et al. The Interactions of In-Cylinder Flow and Fuel Spray in a Gasoline Direct Injection Engine with Variable Tumble. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2015;137(7).
22. Baines NC. *Fundamentals of turbocharging*. Vermont: CONcepts NREC, 2005. 264 p.
23. Romagnoli A, Manivannan A, Rajoo S, et al. A review of heat transfer in turbochargers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;79:1442-1460.
24. Plotnikov LV, Zhilkin BP. Influence of gas-dynamical nonstationarity on local heat transfer in the gas-air passages of piston internal-combustion engines. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018;91(6):1444-1451.

25. Fransson JHM, Talamelli A, Brandt L, et al. Delaying transition to turbulence by a passive mechanism. *Physical Review Letters*. 2006;96 (6).

26. Choi H, Moin P, Kim J. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows. *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;262 (A):75-110.

27. Plotnikov LV, Zhilkin BP. The gas-dynamic unsteadiness effects on heat transfer in the intake and exhaust systems of piston internal combustion engines. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;115:1182-1191.

28. Hashimoto K, Badarla VR, Ideguchi T. High-Speed Fourier-Transform Infrared Spectroscopy with Phase-Controlled Delay Line. *Laser and Photonics Reviews*. 2021;15 (1).

29. Bordbar H, Hostikka S, Boulet P., Parent G. Numerically resolved line by line radiation spectrum of large kerosene pool fires. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2020. V. 254.

30. Brodov YM, Grigoryev NI, Zhilkin BP, et al. Increasing Reliability of Gas-Air Systems of Piston and Combined Internal Combustion Engines by Improving Thermal and Mechanic Flow Characteristics. *Thermal Engineering*. 2015;62(14):1038-1042.

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.

Dmitry S. Shestakov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

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

Получено

29 июля 2021 г.

Отредактировано

13 августа 2021 г.

Принято

20 августа 2021 г.