



ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ В ГАЗОВОЗДУШНЫХ ТРАКТАХ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ТУРБОНАДДУВОМ

Л.В. Плотников, Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Н.И. Григорьев

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: Известно, что поршневые двигатели с турбокомпрессором имеют лучшие показатели по удельной мощности, экологичности и экономичности, по сравнению с атмосферными двигателями. В настоящей статье производится сравнительный анализ нестационарной газодинамики и мгновенной локальной теплоотдачи пульсирующих потоков во впускных и выхлопных системах поршневых двигателей внутреннего сгорания в случае установки турбокомпрессора и без него на основе результатов экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились на натурных лабораторных стендах в условиях газодинамической нестационарности. Опыты проводились на одноцилиндровом двигателе размерности 8,2/7,1, оснащенным турбокомпрессором ТКР-6. В статье приводится оригинальная методика определения мгновенных значений локального коэффициента теплоотдачи в трубах, а также описывается процедура проведения исследований. Установлено, что наличие турбокомпрессора в газозоообменнй системе двигателя приводит к значительным отличиям в закономерностях изменения газодинамических и теплообменных характеристик пульсирующих потоков. В частности, показано, что наличие в выхлопной системе турбокомпрессора происходит к подавлению теплоотдачи, а во впускной системе – к интенсификации теплообмена. Полученные новые данные могут использоваться для совершенствования инженерных методик расчета показателей качества процессов газообмена, для доводки рабочих процессов двигателя при установке турбокомпрессора, а также для разработки перспективных газозоообменнй систем ДВС с турбонаддувом.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, система впуска и выхлопа, пульсирующие потоки, внешняя турбулентность, термомеханика потоков

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., Григорьев Н.И. Особенности тепломеханических характеристик пульсирующих потоков в газозоообменнй трактах поршневых двигателей с турбонаддувом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т.21. №4. С.77-84. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-77-84.

FEATURES OF HEAT AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PULSATING FLOWS IN GAS-AIR PATHS OF PISTON ENGINES WITH TURBOCHARGING

LV. Plotnikov, YM. Brodov, BP. Zhilkin, NI. Grigoriev

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: This article provides a comparative analysis of unsteady gas dynamics and instantaneous local heat transfer of pulsating flows in the intake and exhaust systems of reciprocating internal combustion engines in the case of a turbo-compressor installed without it and based on the results of experimental studies. Experimental studies were carried out on full-

scale laboratory stands under the conditions of gas-dynamic nonstationarity. The article provides an original method for determining the instantaneous values of the local heat transfer coefficient in pipes, and describes the procedure for conducting experiments. It has been established that the presence of a turbo compressor in the gas-air system of a piston engine leads to significant differences in the patterns of changes in the gas-dynamic and heat exchange characteristics of pulsating flows. The obtained new data can be used to improve engineering methods for calculating the quality indicators of gas exchange processes, to refine the working processes of the engine when installing a turbocharger, as well as to develop advanced gas-air ICE systems with turbocharging.

Keywords: internal combustion engine, turbocharger, intake and exhaust system, pulsating flows, external turbulence, flow thermomechanics

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

For citation: Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, Grigoriev NI. 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. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-77-84.

Введение

Оснащение двигателей внутреннего сгорания (ДВС) системой турбонаддува является основной тенденцией развития поршневого двигателестроения. Это связано с рядом положительных эффектов, таких как улучшение удельной мощности, экологичности и экономичности ДВС. Анализ литературы показывает, что многие специалисты рассматривают установку турбокомпрессора (ТК) в газоздушную систему ДВС исключительно как метод увеличения расхода рабочего тела через цилиндры двигателя и, соответственно, улучшения его эксплуатационных показателей [1–3]. Однако в публикациях по этой тематике уделяется недостаточно внимания вопросу влияния ТК на тепломеханические характеристики пульсирующих потоков в газоздушных системах ДВС. Однако, можно предположить, что лопаточный аппарат ТК будет оказывать механическое воздействие на течение, являясь источником внешней турбулентности, что может привести к существенному изменению тепломеханических характеристик потока газов во впускной и выхлопной системах ДВС. Обзор современных исследований в области термомеханики газовых потоков в системах турбонаддува свидетельствует о большом интересе специалистов к данной тематике. Существуют работы, которые посвящены анализу эффективности разных систем наддува [4], исследованию процессов теплообмена и газодинамики в ТК с учетом нестационарности течения газов [5], разработке методов прогнозирования параметров газов в ТК [6, 7], изучению влияния конфигурации каналов турбокомпрессора на эффективность работы двигателя с турбонаддувом [8–10].

В данной статье представлен сравнительный анализ экспериментальных данных о тепломеханических характеристиках пульсирующих потоков в системах впуска и выхлопа поршневого двигателя при установке турбокомпрессора и без него. Исследования проводились с учетом газодинамической нестационарности и влияния внешней турбулентности (механического воздействия на течение).

Материалы и методы

Для изучения закономерностей изменения газодинамики и локального теплообмена пульсирующих потоков во впускных и выхлопных системах использовались экспериментальные стенды, состоящие из одноцилиндрового поршневого двигателя (диаметр цилиндра – 82 мм, ход поршня – 71 мм) и системы турбонаддува. Привод коленвала осуществлялся с помощью электрического асинхронного двигателя с возможностью регулирования его скорости вращения частотным преобразователем в диапазоне от 600 до 3000 мин⁻¹. Стенд оснащался турбокомпрессором ТКР-6. Скорость вращения ротора ТК $n_{\text{ТК}}$ регулировалась в диапазоне от 35 000 до 46 000 мин⁻¹ за счет изменения расхода сжатого воздуха, поступающего на лопатки турбины ТК. Подробное описание экспериментальных стендов представлено в работе [11].

Для измерения физических величин в ходе проведения опытов использовалась автоматизированная система сбора и обработки экспериментальных данных. Сбор данных осуществлялся одновременно по четырем каналам аналого-цифрового преобразователя

(скорость, давление, локальный коэффициент теплоотдачи и скорость вращения). Метод термоанемометрирования (термоанемометр постоянной температуры) использовался как для определения мгновенных величин скорости потока воздуха w_x , так и локального коэффициента теплоотдачи α_x . Подробней метод определения скорости потока и локального коэффициента теплоотдачи применительно к данному исследованию описан в работе [12]. Определение скоростей вращения коленвала n и ротора турбокомпрессора $n_{\text{ТК}}$ производились тахометрами. Быстродействующие датчики давления использовались для определения мгновенных значений статического давления потока с погрешностью 0,5 %. Максимальная систематическая погрешность экспериментов при измерении w_x составляла 5,4 %, а при определении α_x – 10,0 %.

Исследования проводились в круглой прямой трубе (длиной 300 мм). Внутренний диаметр впускной трубы составлял 32 мм, выхлопной – 30 мм. Контрольное сечение с датчиками располагалось на расстоянии 150 мм от окна в головке цилиндров.

Результаты и обсуждение

Сначала рассмотрим особенности газодинамики и теплоотдачи пульсирующих потоков во впускной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором. На рис. 1 и 2 показаны закономерности изменения местных скорости и давления потока воздуха во впускных трубах поршневого ДВС с турбокомпрессором и без него (атмосферный двигатель) от угла поворота коленвала φ при разных скоростях вращения n .

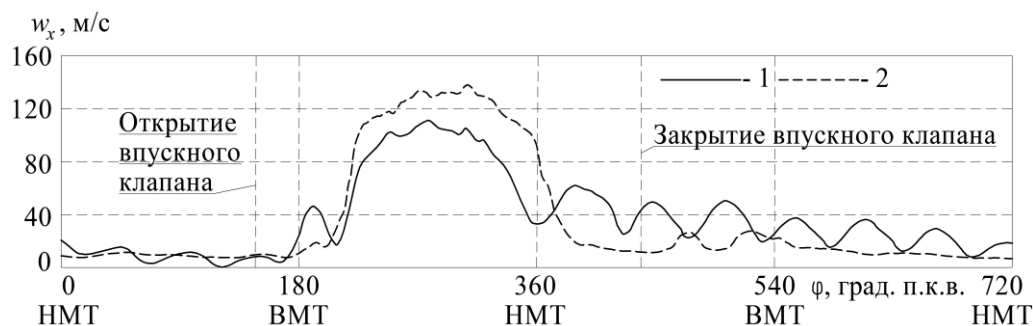


Рис. 1. Зависимость местной ($l_x = 140$ мм) скорости воздуха w_x во впускной трубе двигателя без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при скорости вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{ТК}} = 35000 \text{ мин}^{-1}$ и скорости вращения коленвала $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Из рис. 1 видно, что на зависимостях $w_x = f(\varphi)$ в двигателе с ТК после открытия впускного клапана отсутствует единичное колебание воздуха сразу после открытия впускного клапана, а процесс наполнения является более плавным (без флуктуаций). По мнению авторов, это объясняется тем, что турбокомпрессор создает избыточное давление во впускной трубе, которое превышает барометрическое и внутрицилиндровое давление. Поэтому в этом случае поле скоростей в трубе в основном определяется работой лопаточного аппарата компрессора ТК. Максимальные значения скорости потока воздуха во впускной трубе в двигателе с турбокомпрессором выше на 15–25 %, чем в атмосферном ДВС. С ростом скорости вращения ротора ТК отличия в максимальных значениях скорости потока воздуха также увеличиваются и достигают 50 % при $n_{\text{ТК}} = 45000 \text{ мин}^{-1}$.

Следует отметить, что скорость потока воздуха во впускной трубе не становится равной нулю после закрытия впускного клапана, а имеют место затухающие колебательные пульсации w_x . Эти пульсации особенно характерны для впускной трубы атмосферного двигателя, тогда как в ДВС с ТК данные колебания фактически отсутствуют.

Аналогичные затухающие колебания пульсаций давления потока после закрытия клапана обнаружены во впускной трубе (рис. 2), которые также наиболее характерны для атмосферных двигателей. При этом во впускной трубе двигателя с турбокомпрессором наблюдаются небольшие флуктуации давления потока в течение всего рабочего цикла, вызванные работой лопаточного аппарата ТК [13, 14]. Можно отметить наличие общей закономерности изменения функции $p_x = f(\varphi)$ во впускной системе для двигателей с турбокомпрессором и без него во время процесса впуска.

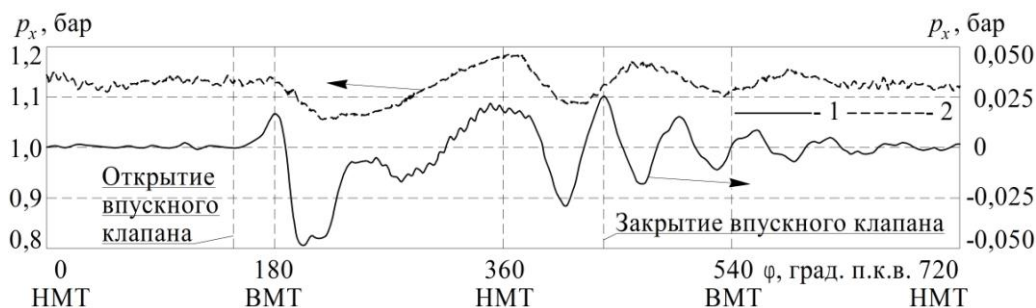


Рис. 2. Зависимость местного ($l_x = 140$ мм) давления воздуха p_x во впускной трубе двигателя без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при скорости вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{тк}} = 35000 \text{ мин}^{-1}$ и скорости вращения коленвала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Установлено, что во впускной трубе поршневого ДВС с турбокомпрессором, в отличие от атмосферного двигателя, при всех скоростях вращения ротора ТК возрастают как максимальные значения α_x , так и средние его значения (рис. 3).

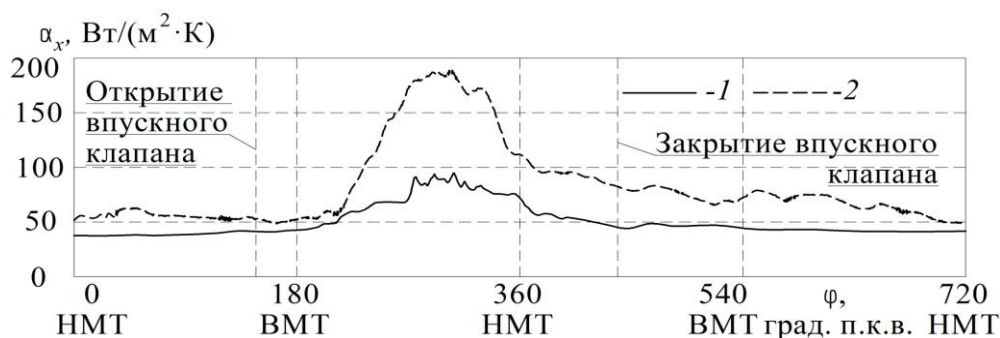


Рис. 3. Зависимость локальных ($l_x = 150$ мм) коэффициентов теплоотдачи α_x во впускной трубе ДВС без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при скорости вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{тк}} = 35000 \text{ мин}^{-1}$ и скорости вращения коленвала $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

Например, при скорости вращения коленвала 600 мин^{-1} максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи во впускной трубе ДВС с ТК почти в 2 раза выше, чем в атмосферном двигателе, а при скорости $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ отличие достигает 75 %. По мнению авторов, рост интенсивности теплоотдачи во впускной трубе, связан не только с увеличением скорости потока, но и с влиянием механического воздействия лопаточного аппарата на основное течение. Известно, что повышение α_x может привести к росту термической напряженности деталей и узлов впускной системы ДВС [11].

Следует отметить, что во впускной трубе ДВС с турбокомпрессором при всех n и $n_{\text{тк}}$ имеют место пульсации локального коэффициента теплоотдачи в течение всего рабочего цикла. При этом они имеют большую амплитуду, чем в атмосферном двигателе (без ТК). Обнаружено, что при наличии ТК, по сравнению с атмосферным двигателем, максимум локальной теплоотдачи во впускной трубе наступает раньше на угол $\Delta\varphi = 10^\circ$ при скорости $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, при этом увеличивается до угла $\Delta\varphi = 40^\circ$ при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Далее рассмотрим особенности газодинамики и теплоотдачи пульсирующих потоков в выхлопной системе поршневого двигателя с турбокомпрессором. Зависимости локальной скорости w_x и давления p_x потока в выхлопной системе ДВС (с ТК и без) от угла поворота коленвала φ при разных n показаны на рис. 4 и 5.

Установлено, что значения максимальной скорости потока воздуха в выхлопной трубе с ТК меньше, чем в трубе атмосферного ДВС. Наибольшие отличия имеют место при избыточном давлении на выходе p_b равном 0,1 МПа – они достигают 40 %. При этом в обоих случаях (системах с турбокомпрессором и без) присутствуют пульсации скорости потока воздуха, которые имеют большие амплитуды при низких скоростях вращения коленвала. Также можно отметить наличие смещения максимума характеристики $w_x = f(\varphi)$ для системы выхлопа с ТК в сторону увеличения угла поворота коленвала.

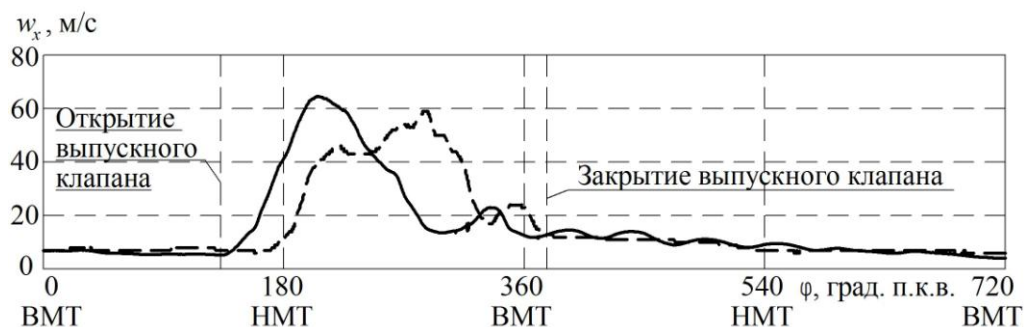


Рис. 4. Зависимость местной ($l_x = 140$ мм) скорости воздуха w_x в выхлопной трубе ДВС без турбокомпрессора (1) и с ТК от угла поворота коленвала φ при давлении выхлопа $p_b = 0,1$ МПа для скорости вращения коленвала $n = 3000$ мин⁻¹

Аналогичные отличия имеют место и в закономерностях изменения давления пульсирующего потока в системе выхлопа с ТК (рис. 5), а именно: 1) максимальные значения давления потока воздуха выше вплоть до 3 раз при наличии ТК, чем в системе выхлопа атмосферного двигателя; 2) наблюдается смещение пика максимума давления по углу в сторону закрытия клапана на $\Delta\varphi$ от 30 до 50 градусов поворота коленвала.

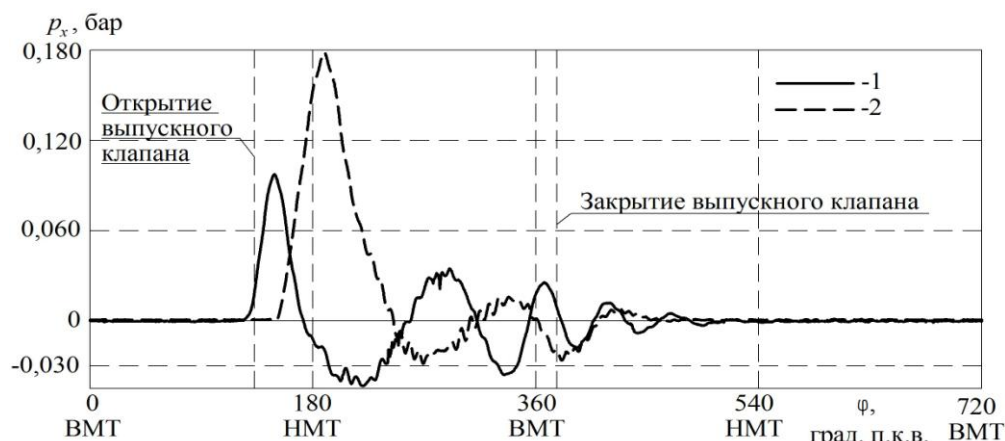


Рис. 5. Зависимость местного ($l_x = 140$ мм) давления воздуха p_x в выхлопной трубе ДВС без ТК (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при давлении выхлопа $p_b = 0,2$ МПа для скорости вращения коленвала $n = 1500$ мин⁻¹

Установлено, что после закрытия клапана скорость воздуха в выхлопной трубе не обращается в нуль, а имеют место затухающие колебания пульсаций w_x . При этом наличие турбокомпрессора в системе выхлопа приводит к некоторому сглаживанию амплитуд пульсаций скорости потока в течение всего рабочего процесса двигателя.

Также в системе выхлопа были обнаружены затухающие колебания пульсаций p_x после закрытия выхлопного клапана, которые имели значительно меньшую амплитуду (вплоть до 50 %) при наличии в системе ТК. Подобные затухающие процессы были получены ранее для систем впуска и выхлопа (ДВС без турбокомпрессора) с разными гидравлическими сопротивлениями [15].

По мнению авторов столь существенные изменения в газодинамике потока воздуха в выхлопной трубе связаны с механическим воздействием лопаточного аппарата центробежного компрессора на пульсирующий поток, что вызывает изменение структуры потока по сечению трубы, деформацию пограничного слоя и перестройку газодинамической структуры потока. Эти явления должны привести к изменениям в теплообменных характеристиках пульсирующего потока.

Установлено (рис. 6), что при наличии турбокомпрессора в системе выхлопа происходит снижение максимальных значений локального коэффициента теплоотдачи α_x в выхлопной трубе на величину от 10 до 30 % по сравнению с атмосферным двигателем. При установке турбокомпрессора наблюдается также снижение средних значений локального коэффициента теплоотдачи в трубе в диапазоне от 10 до 20 % в сравнении с ДВС без ТК.

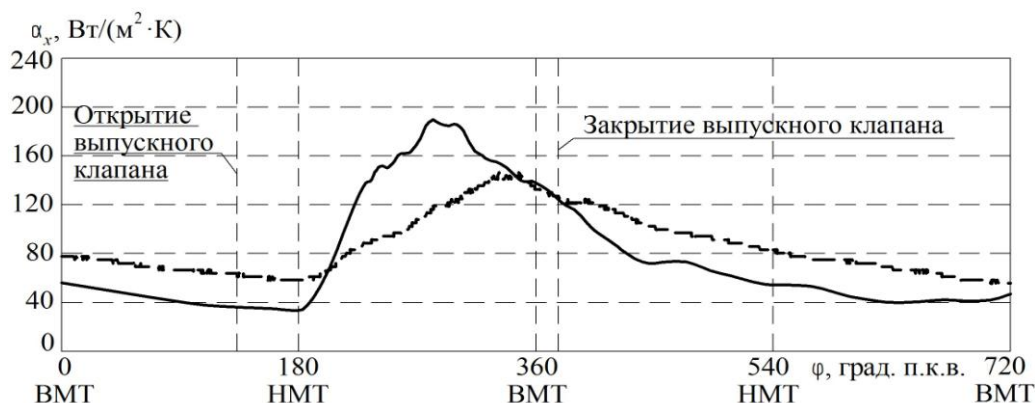


Рис. 6. Зависимость локальных ($l_x = 150$ мм) коэффициентов теплоотдачи α_x в выхлопной трубе двигателя без ТК (1) и с ТК (2) от угла поворота коленвала φ при давлении выхлопа $p_b = 0,2$ МПа для скорости вращения коленвала $n = 3000$ мин⁻¹

Снижение интенсивности локальной теплоотдачи в двигателе с ТК должно привести к уменьшению термических напряжений в деталях и узлах системы выхлопа, а также повышению эффективности работы турбокомпрессора.

Закключение

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы.

1. Установлено, что наличие ТК в газозоудушной системе поршневого ДВС приводит к значительным изменениям газодинамики пульсирующих потоков, а именно:

- максимальные значения скорости потока воздуха во впускной трубе в двигателе с турбокомпрессором выше на величину 10–50 %, чем в атмосферном ДВС (w_x достигает значений до 180 м/с в случае установки ТК);

- в выхлопной системе с ТК значения максимальной скорости потока воздуха, наоборот, меньше, чем в трубе без него, – наибольшее падение w_x достигает 40 %.

2. Показано, что при наличии в выхлопной системе турбокомпрессора происходит к снижению интенсивности теплоотдачи в трубе на величину до 20 %. Во впускной трубе ДВС с ТК, в отличие от атмосферного двигателя, возрастают как максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи (до 2 раз), так и его средние значения (до 45 %).

3. Полученные новые данные могут использоваться для уточнения инженерных методик расчета показателей качества газообмена ДВС, а также для разработки перспективных систем впуска и выхлопа для двигателей с турбонаддувом.

Литература

1. Байков Б.П., Бордуков В.Г. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. Ленинград: Машиностроение, 1982. 200 с.
2. Круглов М.Г., Дехович Д.А., Иванов Г.И. Агрегаты для воздухообеспечения комбинированных двигателей внутреннего сгорания. Москва: Машиностроение, 1973. 296 с.
3. Хак Г. Турбодвигатели и компрессоры. Москва: ООО Издательство «Астрель – АСТ», 2003. 351 с.
4. Comparison and analysis of the effects of various improved turbocharging approaches on gasoline engine transient performances // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 93, pp. 797-812.
5. Lee J., Tan C.S., Sirakov B.T., et al. Performance metric for turbine stage under unsteady pulsating flow environment // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2017. V. 139, N 7.
6. An extended calculation approach of exhaust thermocouple temperatures in one-dimensional gas exchange simulation for turbocharged gasoline direct-injection engines // International Journal of Engine Research. 2018. V. 19. N 4. pp. 449-460.
7. Huang L., Ma C., Li Y., Gao J., Qi M. Applying neural networks (NN) to the improvement of gasoline turbocharger heat transfer modeling // Applied Thermal Engineering. 2018. V. 141. pp. 1080-1091.
8. Galindo J., Tiseira A., Navarro R., Tari D., Meano C.M. Effect of the inlet geometry on performance, surge margin and noise emission of an automotive turbocharger compressor // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 110. pp. 875-882.
9. Шестаков Д.С. Доводка рабочего процесса тепловозных дизелей 8ДМ21/21 с

турбокомпрессорами типоразмера TCR // Двигателестроение. 2017. № 3. С. 9-13.

10. Wang T.J. Optimum design for intake and exhaust system of a heavy-duty diesel engine by // Journal of Mechanical Science and Technology. 2018. V. 32. N 7. pp. 3465-3472.

11. Жилкин Б.П., Лашманов В.В., Плотников Л.В., Шестаков Д.С. Совершенствование процессов в газоздушных трактах поршневых двигателей внутреннего сгорания: монография; под общ. ред. Ю. М. Бродова. Екатеринбург: Издательство Уральского . университета, 2015. 228 с.

12. Plotnikov L.V. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 160.

13. Д.С. Шестаков, Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Н.И. Григорьев Снижение пульсации потока во впускной системе поршневого ДВС с наддувом // Двигателестроение. 2013. № 1. С. 24-27.

14. Жилкин Б.П. Некоторые особенности газодинамики процесса выпуска при наддуве поршневых ДВС // Тяжелое машиностроение. 2012. № 2. С. 48-51.

15. Плотников Л.В., Жилкин Б.П., Крестовских А.В, Падаляк Д.Л. Об изменении газодинамики процесса выпуска в поршневых ДВС при установке глушителя // Вестник академии военных наук. 2011. № 2. С. 267-270.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета 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 Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: tot@ustu.ru.

Григорьев Никита Игоревич – доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ). E-mail: gepebola3@mail.ru.

References

1. Bajkov BP., Bordukov V.G. *Turbochargers for supercharged diesel engines: a reference guide*. Leningrad: Mechanical Engineering. 1982.

2. Kruglov MG., Dekhovich DA., Ivanov GI. Air supply units for combined internal combustion engines. Moscow: Mechanical Engineering. 1973.

3. Hak G. *Turbo engines and compressors: reference manual*. Moscow: Publishing house «Astrel – AST». 2003.

4. Tang Q., Fu J., Liu J., et al. Comparison and analysis of the effects of various improved turbocharging approaches on gasoline engine transient performances. *Applied Thermal Engineering*. 2016;93:797-812.

5. Lee J., Tan CS., Sirakov BT., et al. Performance metric for turbine stage under unsteady pulsating flow environment. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2017;139(7).

6. Franzke B., Adomeit P, Uhlmann T., et al. An extended calculation approach of exhaust thermocouple temperatures in one-dimensional gas exchange simulation for turbocharged gasoline direct-injection engines. *International Journal of Engine Research*. 2018;19(4):449-460.

7. L. Huang C. Ma ., Li Y., Gao J., Qi M. Applying neural networks (NN) to the improvement of gasoline turbocharger heat transfer modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2018;(141):1080-1091.

8. Galindo J., Tiseira A., Navarro R., Tarí D., Meano C.M. Effect of the inlet geometry on performance, surge margin and noise emission of an automotive turbocharger compressor. *Applied Thermal Engineering*. 2017;110:875-882.

9. Shestakov DS. Fine-tuning of the working process of diesel engines 8DM21/21 with turbochargers size TCR . *Dvigatelistroyeniye*. 2017;3:9-13.

10. 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.

11. Zhilkin BP., Lashmanov VV., Plotnikov LV., et al. *Improvement of processes in gas-air paths of internal combustion piston engines*: monograph. Ekaterinburg: Publishing House 2015. 228 p.

12. Plotnikov LV. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas

flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 160.

13. Shestakov DS., Plotnikov LV., Zhilkin BP., Grigoriev NI. Reduction of flow pulsation in the intake system of the supercharged piston ICE. *Dvigatelsestroyeniye*, 2013;1:24-27.

14. Zhilkin BP. Some features of the gas dynamics of the intake process in a piston engine with supercharging. *Heavy engineering*. 2012;2:48-51.

15. Plotnikov LV., Zhilkin BP., Krestovskih AV., Padalyak D.L. On the change in the gas dynamics of the exhaust process in piston ICEs when installing a silencer. *Bulletin of the Academy of military Sciences*. 2011;2:267-270.

Authors of the publication

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

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

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

Nikita I. Grigoriev – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Поступила в редакцию

22 июля 2019 г.