

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-108-114>

УДК 62-144.3

# Тепломеханическое совершенствование системы воздухо-снабжения поршневого двигателя с турбонаддувом

**Бродов Ю. М., Плотников Л. В.\*, Десятов К. О.**

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
ул. Мира, 19, 620002, г. Екатеринбург, Россия

Поступила / Received 01.06.2021

Принята к печати / Accepted for publication 22.06.2021

Описан способ тепломеханического совершенствования пульсирующих потоков воздуха во впускной системе поршневого двигателя с турбонаддувом. Основная цель данного исследования состоит в разработке способа подавления интенсивности теплоотдачи для улучшения показателей безотказности поршневого двигателя с турбонаддувом. Приведен краткий обзор литературы по улучшению показателей надежности поршневых двигателей разного назначения. Научно-технические результаты получены на основе экспериментальных исследований на натурной модели поршневого двигателя. Для получения газодинамических и теплообменных характеристик потоков газа использовался метод термоанемометрирования. Описаны лабораторные стенды и приборно-измерительная база. Представлены данные о газодинамике и теплообмене стационарных и пульсирующих потоков воздуха в газодинамических системах разных конфигураций применительно к системе воздухообеспечения поршневого двигателя с турбонаддувом. Предложен способ тепломеханического совершенствования потоков во впускной системе двигателя на основе хонейкомба с целью стабилизации пульсирующего потока и подавления интенсивности теплоотдачи. Получены данные о мгновенных значениях скорости потока воздуха и локального коэффициента теплоотдачи как в выпускном канале компрессора турбокомпрессора (т. е. без поршневого двигателя), так и во впускной системе двигателя с наддувом. Проведен сравнительный анализ полученных данных. Выявлено, что установка выравнивающей решетки в выпускном канале турбокомпрессора приводит к интенсификации теплоотдачи в среднем на 9%. Установлено, что наличие выравнивающей решетки в системе впуска поршневого двигателя вызывает подавление теплоотдачи в пределах 15% в сравнении с базовыми значениями. Показано, что применение модернизированной впускной системы в дизельном двигателе повышает его вероятность безотказной работы на 0,8%. Полученные данные могут быть распространены на другие типы и конструкции систем воздухообеспечения тепловых двигателей.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** поршневой двигатель, турбокомпрессор, впускная система, стационарные и пульсирующие потоки, газодинамика и теплообмен, вероятность безотказной работы

### Благодарности

Результаты работы, представленные в статье, получены при поддержке РФФИ в рамках научного проекта 18-79-10003.

### Адрес для переписки:

Плотников Л. В.  
ФГАОУ ВО «УрФУ», кафедра турбин и двигателей  
ул. Мира, 19, 620002, г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: leonplot@mail.ru

### Address for correspondence:

Plotnikov L. V.  
Ural Federal University, Department Turbines and engines  
19 Mira str., 620002, Ekaterinburg, Russia  
e-mail: leonplot@mail.ru

### Для цитирования:

Бродов Ю. М., Плотников Л. В., Десятов К. О. Тепломеханическое совершенствование системы воздухообеспечения поршневого двигателя с турбонаддувом. Надежность и безопасность энергетики. 2021. – Т. 14, №2. – С. 108 – 114. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-108-114>

### For citation:

Brodov Y. M., Plotnikov L. V., Desyatov K. O. [Thermal and mechanical improvement of the air supply system of a turbocharged piston engine]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2021, vol. 14, no. 2, pp. 108 – 114 (in Russian). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-2-108-114>

## Thermal and mechanical improvement of the air supply system of a turbocharged piston engine

**Brodiv Y. M., Plotnikov L. V.\*, Desyatov K. O.**

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
19 Mira str., 620002, Ekaterinburg, Russia

A method of thermomechanical improvement of pulsating air flows in the intake system of a turbocharged piston engine is described. The main objective of this study is to develop a method for suppressing the rate of heat transfer to improve the reliability of a piston turbocharged engine. A brief review of the literature on improving the reliability of piston engines is given. Scientific and technical results were obtained on the basis of experimental studies on a full-scale model of a piston engine. The hot-wire anemometer method was used to obtain gas-dynamic and heat-exchange characteristics of gas flows. Laboratory stands and instrumentation facilities are described in the article. The data on gas dynamics and heat exchange of stationary and pulsating air flows in gas-dynamic systems of various configurations as applied to the air supply system of a turbocharged piston engine are presented. A method of thermomechanical improvement of flows in the intake system of an engine based on a honeycomb is proposed in order to stabilize the pulsating flow and suppress the intensity of heat transfer. Data were obtained on the air flow rate and the local heat transfer coefficient both in the exhaust duct of the turbocharger compressor (i.e., without a piston engine) and in the intake system of a supercharged engine. A comparative analysis of the data has been carried out. It was found that the installation of a leveling grid in the exhaust channel of a turbocharger leads to an intensification of heat transfer by an average of 9%. It was found that the presence of a leveling grid in the intake system of a piston engine causes the suppression of heat transfer within 15% in comparison with the baseline values. It is shown that the use of a modernized intake system in a diesel engine increases its probability of failure-free operation by 0.8%. The data obtained can be extended to other types and designs of air supply systems for heat engines.

**KEYWORDS:** piston engine, turbocharger, intake system, stationary and pulsating flows, gas dynamics and heat exchange, probability of failure-free operation

### Acknowledgments

The results of the work presented in the article were obtained during the implementation of the Russian Science Foundation (grant No. 18-79-10003).

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) активно применяются во многих областях науки и техники, включая транспортное машиностроение, малую (распределенную) энергетику (в том числе аварийное энергоснабжение) и военно-морское приложение. Известно, что ПДВС вырабатывают около 25% энергии в Мире [1]. Соответственно, совершенствование поршневых двигателей направлено не только на повышение технико-экономическими и экологическими характеристиками, но и улучшение их показателей надежности [2].

Кратко рассмотрим современные исследования по анализу и прогнозированию надежности ПДВС. Можно выделить несколько разнонаправленных научных работ, которые посвящены повышению надежности судовых двигателей [3–5]. Abaei M. M. и др. [3] предложили авторскую стратегию улучшения надежности для энергетических установок на базе поршневых двигателей для морских автономных, надводных кораблей. A Knežević V. и др. [4] выполнили детальный анализ влияния деталей и узлов турбокомпрессора на надежность судового двигателя. Так, Vera-García F. и др. [5] провели классическое исследование по анализу отказов ПДВС с помощью современных информационных технологий, и на этой основе разра-

ботали оригинальную систему диагностики, которая повышает показатели надежности судовых двигателей. Полученные результаты позволят улучшить план технического обслуживания, надежность ПДВС и оптимизировать работу энергетических установок во время эксплуатации.

Также повышение показателей надежности актуально и в других областях, таких как авиация [6], тепловозы [7] и другие. Например, Wang M. и др. [6] разработали метод диагностики неисправностей ПДВС по состоянию моторного масла с использованием искусственного интеллекта и машинного обучения. В свою очередь, Szkoda M. и др. [7] выполнили оценку влияния технического обслуживания на показатели надежности тепловозного дизеля.

Многие ученые и инженеры занимаются совершенствованием отдельных деталей, узлов, процессов в поршневых двигателях с целью улучшения их надежности. Среди подобных исследований можно выделить статьи посвященные оптимизации продолжительности испытаний для проверки надежности технических изделий [8], выбор материала поршня для улучшения показателей безотказности сопряжения цилиндр-кольца-поршень [9], разработка способа обработки различных отказов для создания новой системы

технической диагностики с целью улучшения показателей надежности ПДВС.

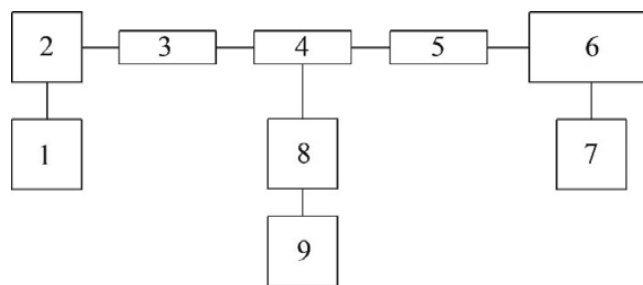
Отдельно можно выделить работы по оценке влияния теплообмена (тепловых напряжений) на надежность тех или иных элементов двигателей [10–12]. В этих исследованиях специалисты изучают уровень теплопередачи в цилиндре и его воздействие на надежность основных деталей и узлов ПДВС [10], разрабатывают улучшенную систему теплового управления двигателем [11], создают математическую модель термодинамических отказов для судовых двигателей, так называемый, имитатор отказов, который служит для прогнозирования отказов и улучшения надежности [12], а также проводят оценку интенсивности теплоотдачи в системах газообмена на показатели надежности поршневых двигателей разного назначения [13, 14].

Таким образом, следует отметить, что в исследованиях других авторов уделяется недостаточно внимания влиянию термомеханики газовых потоков во впускных и выпускных системах на показатели надежности поршневых двигателей с турбокомпрессором (ТК). Соответственно, основные цели данного исследования состоят в получении новых данных о термомеханических процессах потоков газа в выпускном канале компрессора турбокомпрессора и впускной системе ПДВС с наддувом, и на их основе разработать способ подавления интенсивности теплоотдачи для улучшения показателей безотказности поршневого двигателя.

Данное исследование состояло из двух этапов. На первом из них изучались термомеханические процессы стационарных потоков воздуха в выпускных каналах компрессора ТК, имеющих разную конфигурацию. На втором этапе исследовались газодинамика и теплообмен пульсирующих потоков воздуха во впускной системе с каналами разной конфигурации применительно к ПДВС с ТК.

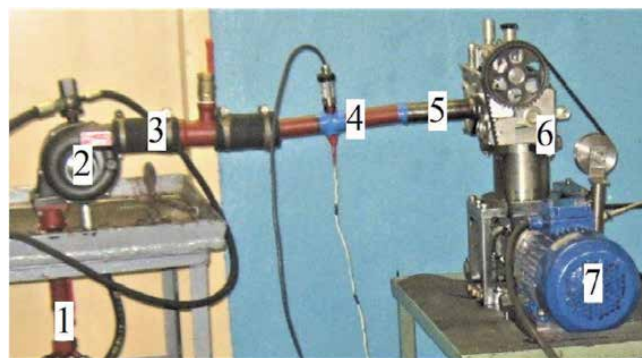
Ввиду сложности изучаемых процессов, за основу был принят экспериментальный подход. Соответственно, было разработано два лабораторных стенда. Один из них представлял собой автономный турбокомпрессор (ТКР-6), т. е. он функционировал без влияния поршневого двигателя. Привод ТК осуществлялся посредством подачи сжатого воздуха на лопатки турбины от постороннего источника. Частота вращения ротора ТК  $n_{тс}$  составляла от 20 000 мин<sup>-1</sup> до 60 000 мин<sup>-1</sup>. Датчики устанавливались в выпускном канале компрессора ТК (описание измерительной системы см. ниже).

Структурная схема другой экспериментальной установки на базе одноцилиндрового поршневого двигателя с ТК представлена на рисунке 1, а ее фотография на рисунке 2. Как видно из рисунков 1 и 2, лабораторный стенд представлял собой одноцилиндровую модель поршневого двигателя (диаметр цилиндра — 82 мм, ход поршня — 71 мм), который оснащался турбокомпрессором (ТКР-6). Привод коленчатого вала ПДВС осуществлялся с помощью асинхронного электрического двигателя и регулировался посредством преобразова-



**Рисунок 1.** Структурная схема экспериментального стенда для исследования термомеханических характеристик пульсирующих потоков газа в системе воздухообеспечения: 1 — пневмопривод ротора турбокомпрессора; 2 — турбокомпрессор; 3 — выпускной канал компрессора; 4 — исследовательский канал; 5 — впускной коллектор двигателя; 6 — модель поршневого двигателя; 7 — электропривод коленвала двигателя; 8 — приборно-измерительная система; 9 — персональный компьютер

**Figure 1.** Block diagram of the experimental stand for the study of thermal-mechanical characteristics of pulsating gas flows in the air supply system: 1 — pneumatic drive of the turbocharger rotor; 2 — turbocharger; 3 — compressor outlet channel; 4 — research channel; 5 — engine intake manifold; 6 — piston engine model; 7 — electric drive of the engine crankshaft; 8 — instrumentation and measuring system; 9 — personal computer

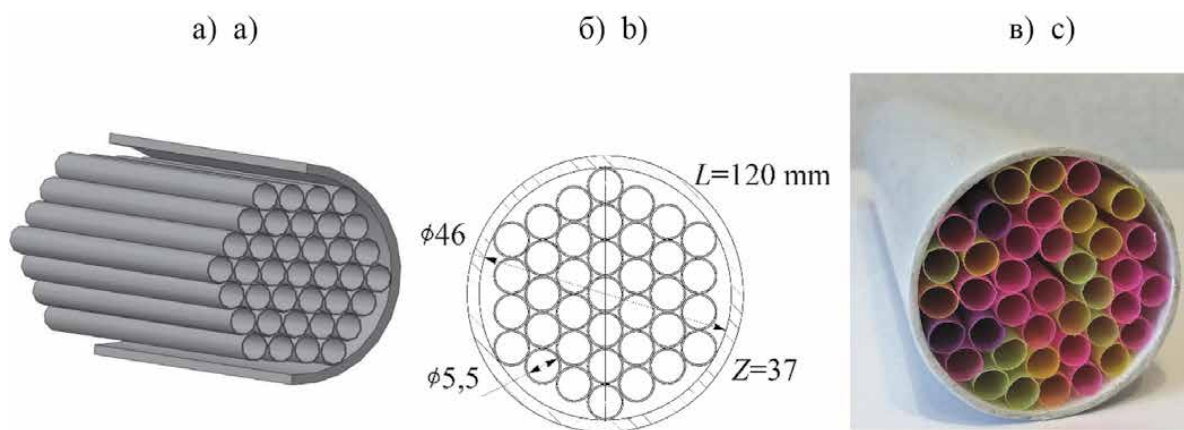


**Рисунок 2.** Фотография экспериментального стенда: 1 — трубопроводы для подвода сжатого воздуха (пневмопривод); 2 — турбокомпрессор; 3 — выпускной канал компрессора; 4 — исследуемый канал; 5 — впускной коллектор; 6 — модель ПДВС; 7 — электрический двигатель

**Figure 2.** Photo of the experimental stand: 1 — pipelines for supplying compressed air (pneumatic drive); 2 — turbocharger; 3 — compressor outlet channel; 4 — investigated channel; 5 — intake manifold; 6 — model of a piston internal combustion engine; 7 — electric motor

теля частоты в диапазоне скоростей вращения  $n$  от 600 до 3 000 мин<sup>-1</sup>. Более подробное описание экспериментальных установок представлено в [15].

Исследуемая газодинамическая система состояла из выпускного канала компрессора (разной конфигурации), исследовательского канала (для установки датчиков), впускного коллектора двигателя и канала в головке цилиндра с клапанным механизмом (создающим пульсирующее течение воздуха). Общая длина газодинамической системы составляла около 750 мм.



**Рисунок 3.** Трехмерная модель выравнивающей решетки (а), ее основные геометрические размеры (б) и фотография (в)  
**Figure 3.** A three-dimensional model of the leveling grid (a), its main geometric dimensions (b) and a photo (c)

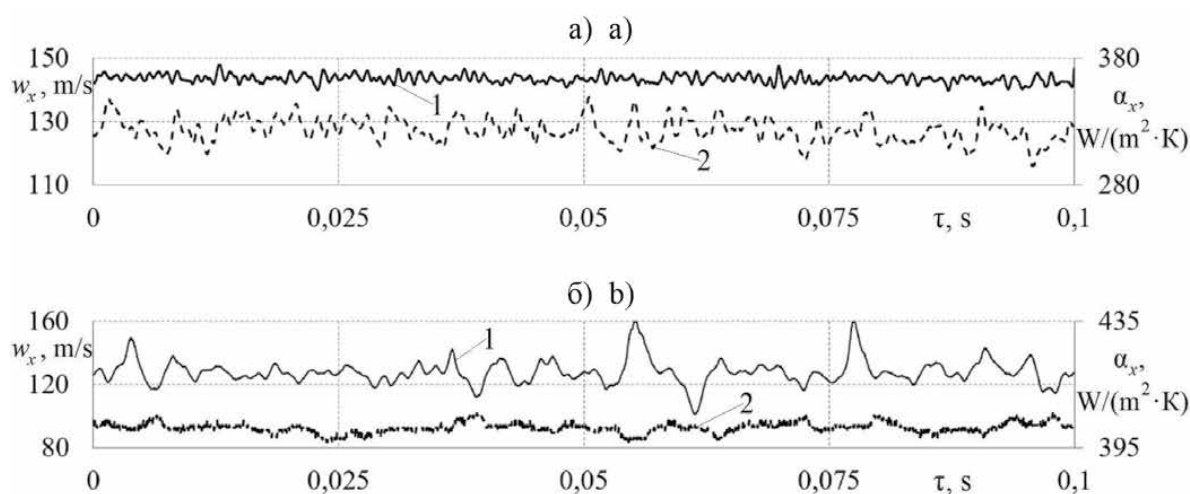
Контрольное сечение в исследовательском канале находилось на расстоянии 150 мм от выпускного канала компрессора ТК. Внутренний диаметр всех трубопроводов составлял 32 мм. Рабочей средой в опытах являлся воздух с температурой 40–45°C.

Модернизация конструкции впускной системы заключалась в установке выравнивающей решетки в выпускной канал компрессора ТК (рисунок 3). Известно, что стабилизация течения (выравнивание поля скоростей в канале, снижение пульсационных составляющих средней скорости потока) в большинстве случаев приводят к подавлению теплоотдачи в газодинамической системе, а соответственно, и снижению температурных напряжений в ней.

В ходе проведения экспериментальных исследований определялись следующие физические величины: мгновенные значения средней скорости в поперечном сечении  $w_x$  (термоанемометр постоянной температуры), локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_x$  (тепловой датчик и термоанемометр), температура потока воз-

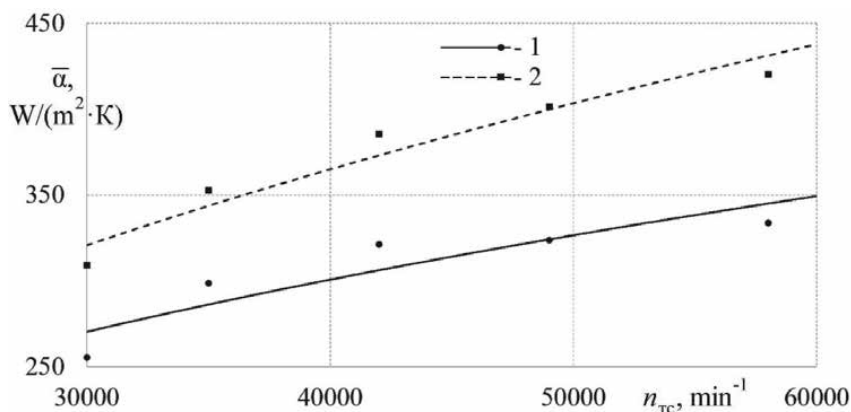
духа (термопара), скорости вращения ротора ТК  $n_{TC}$  и коленвала ПДВС  $n$  (цифровой и аналоговый тахометры, соответственно). Все аналоговые сигналы с датчиков поступали в аналого-цифровой преобразователь для передачи в специализированное программное обеспечение и дальнейшей обработки. Методики и особенности проведения экспериментов подробнее описаны в монографии [15].

На рисунке 4 показаны первичные данные о газодинамике и теплоотдаче стационарных потоков в базовом выпускном канале компрессора ТК и канале с выравнивающей решеткой. Из рисунка видно, что установка выравнивающей решетки приводит к незначительному падению средней скорости потока (в среднем на 5–10%) по сравнению с базовым выпускным каналом. Также снижается частота пульсаций мгновенных значений скорости потока, но увеличивается их амплитуда. Такое неоднозначное влияние выравнивающей решетки на газодинамику стационарного потока воздуха можно объяснить наличием дополнительного возму-



**Рисунок 4.** Зависимости локальных ( $l_x = 150$  мм) скорости потока воздуха  $w_x$  (1) и коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  (2) от времени  $\tau$  в базовом выпускном канале компрессора (а) и канале с выравнивающей решеткой (б) при частоте вращения ротора турбокомпрессора  $n_{TC} = 45\,000$  мин<sup>-1</sup>

**Figure 4.** Dependences of the local ( $l_x = 150$  mm) air flow velocity  $w_x$  (1) and the heat transfer coefficient  $\alpha_x$  (2) on time  $\tau$  in the base exhaust duct of the compressor (a) and in the duct with the equalizing grid (b) at the turbocharger rotor speed  $n_{TC} = 45,000$  min<sup>-1</sup>



**Рисунок 5.** Зависимость осредненного коэффициента теплоотдачи от частоты вращения ротора турбокомпрессора для выпускных каналов разной конфигурации: 1 — базовый канал; 2 — канал с выравнивающей решеткой

**Figure 5.** Dependence of the averaged heat transfer coefficient on the rotational speed of the turbocharger rotor for exhaust channels of different configurations: 1 — base channel; 2 — channel with a leveling grid

щающего фактора в рассматриваемой газодинамической системе, а именно, лопаток компрессора. Лопатки оказывают механическое воздействие на течение, которое существенно зависит от частоты вращения ротора турбокомпрессора. В свою очередь, мгновенные значения локального коэффициента теплоотдачи в выпускном канале с выравнивающей решеткой, наоборот, несколько увеличиваются. При этом имеет место снижение амплитуд пульсаций  $\alpha_x$ .

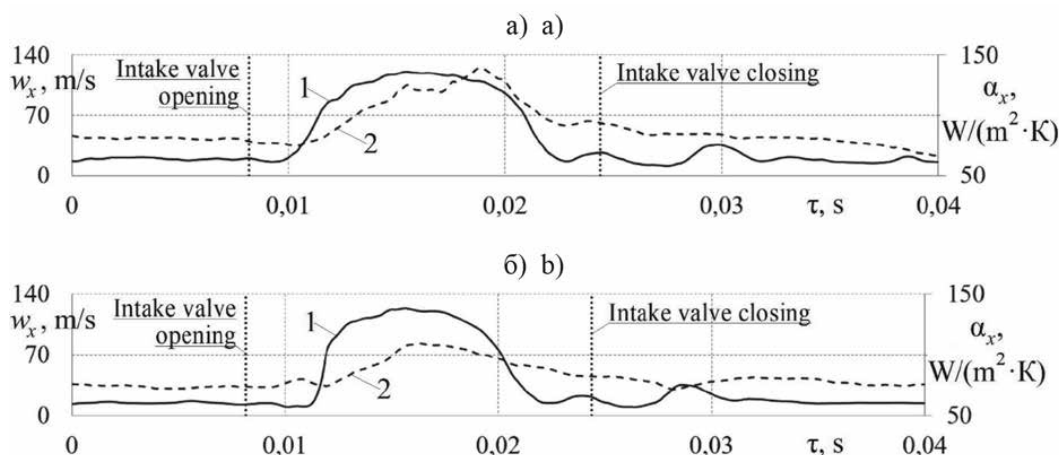
На рисунке 5 показаны зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи от частоты вращения ротора турбокомпрессора для выпускных каналов разной конфигурации. Из рисунка 5 видно, что установка выравнивающей решетки приводит к росту средних значений локального коэффициента теплоотдачи в выпускном канале компрессора (в среднем на 9%) по сравнению с базовым каналом.

Таким образом, по результатам первого этапа исследований, можно заключить, что установка выравнивающей решетки не может рассматриваться как способ тепломеханического совершенствования процессов в выпускном канале компрессора ТК с целью подавления интенсивности теплоотдачи и уменьшения термических напряжений.

На втором этапе исследований изучались газодинамика и теплообмен пульсирующих потоков воздуха во впускных системах разной конфигурации применительно к ПДВС с ТК. Первичные экспериментальные данные этого этапа представлены на рисунке 6.

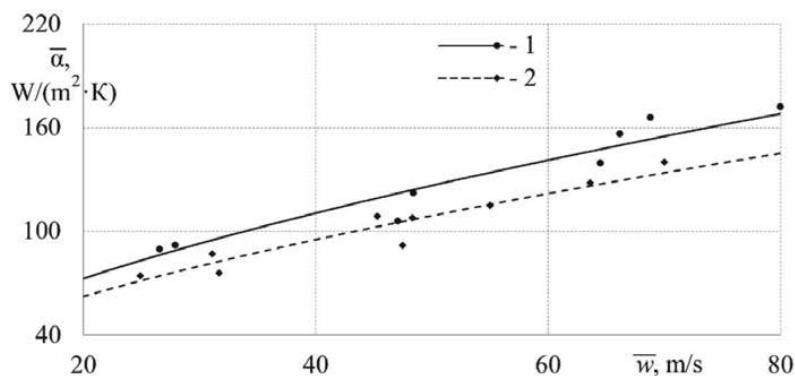
Из рисунка 6 видно, что установка выравнивающей решетки во впускную систему приводит к незначитель-

ному сглаживанию колебаний мгновенных значений скорости потока воздуха после закрытия впускного клапана по сравнению с базовой системой. При этом максимальные значения скорости потока воздуха практически не изменяются (что свидетельствует о незначительном росте гидравлического сопротивления системы). На некоторую стабилизацию пульсирующего течения указывает снижение степени турбулентности потока в среднем на 20% во впускной системе с выравнивающей решеткой. Более заметное влияние оказывает выравнивающая решетка на зависимость  $\alpha_x = f(\tau)$ : мгновенные значения локального коэффициента теплоотдачи существенно уменьшаются (до 2 раз по сравнению с базовой системой впуска). Вероятно, снижение интенсивности теплоотдачи во впускной системе с решеткой можно объяснить стабилизацией пульсирующего течения, вследствие чего в потоке



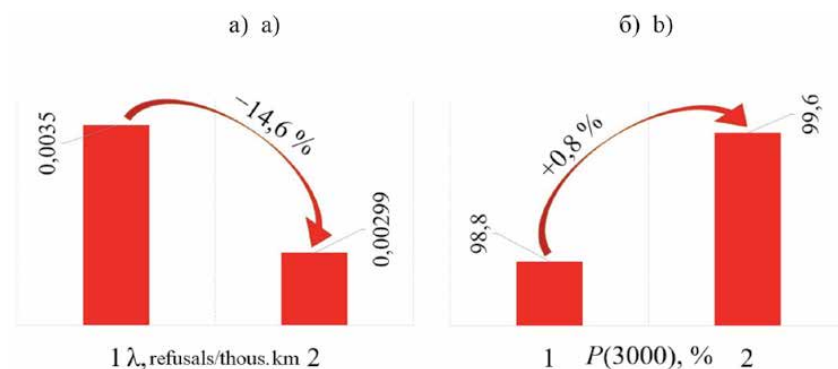
**Рисунок 6.** Зависимости местной ( $l_x = 150$  мм) скорости потока воздуха  $w_x$  (1) и локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  (2) от времени  $\tau$  в базовой впускной системе (а) и системе с выравнивающей решеткой (б) при частоте вращения коленвала двигателя  $n = 3000$   $min^{-1}$  и скорости вращения ротора турбокомпрессора  $n_{TC} = 42\,000$   $min^{-1}$

**Figure 6.** Dependences of the local ( $l_x = 150$  mm) air flow velocity  $w_x$  (1) and the local heat transfer coefficient  $\alpha_x$  (2) on time  $\tau$  in the base intake system (a) and the system with a leveling grid (b) at the engine crankshaft speed  $n = 3000$   $min^{-1}$  and the rotational speed of the turbocharger rotor  $n_{TC} = 42,000$   $min^{-1}$



**Рисунок 7.** Зависимость осредненного коэффициента теплоотдачи от среднерасходной скорости потока во впускной системе разной конфигурации: 1 — базовая система впуска; 2 — система с выравнивающей решеткой

**Figure 7.** Dependence of the averaged heat transfer coefficient on the average flow rate in the intake system of various configurations: 1 — basic intake system; 2 — system with a leveling grid



**Рисунок 8.** Диаграммы изменения интенсивности отказов  $\lambda$  (а) впускной системы дизеля 6ЧН 21/21 и вероятности ее безотказной работы  $P$  (б) для базовой системы (1) и системы с выравнивающей решеткой (2)

**Figure 8.** Diagrams of changes in the failure rate  $\lambda$  (a) of the diesel intake system (dimension 21/21) and the probability of its failure-free operation  $P$  (b) for the basic system (1) and the system with a leveling grid (2)

формируется более устойчивый пограничный слой, который препятствует теплообмену между ядром потока и стенками канала.

На рисунке 7 представлены зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи в выпускных системах разной конфигурации. Осреднение  $\alpha_x$  осуществлялось за период процесса впуска, т. е. за период времени, когда открыт впускной клапан. Из рисунка видно, что установка выравнивающей решетки во впускную систему ПДВС с ТК приводит к подавлению теплоотдачи (на 5–15%) во всем исследованном диапазоне скоростей потока воздуха. Это снизит тепловые нагрузки на основные элементы газодинамической системы и потенциально повысит надежность поршневого двигателя в целом.

На основе результатов экспериментальных исследований проводилась расчетная оценка потенциальных положительных эффектов от применения впускной системы с выравнивающей решеткой. Известно, что снижение интенсивности теплоотдачи между потоком и стенками трубопровода приводит к уменьшению тепловых напряжений в деталях и узлах поршневых

двигателей, что положительно сказывается на их показателях надежности [14]. В данном случае применительно к дизелю 6ЧН 21/21 (производство ООО «Уральский дизель-моторный завод») для работы в составе аварийной электростанции была рассчитана интенсивность отказов для базовой системы впуска и системы с выравнивающей решеткой (рисунок 8). На основании этих данных была пересчитана вероятность безотказной работы для рассматриваемого дизеля при наработке 3000 часов, которая выросла на 0,8%.

## Выводы

1. Разработаны и изготовлены экспериментальные установки для исследования тепломеханических характеристик стационарных и пульсирующих потоков в выпускном канале компрессора турбокомпрессора и впускной системе поршневого двигателя с наддувом, оснащенные измерительной аппаратурой с необходимым быстродействием;

2. Получены данные о газодинамике и теплообмене стационарных потоков в выпускном канале компрессора турбокомпрессора; выявлено, что установка выравнивающей решетки в данный канал приводит к интенсификации теплоотдачи в среднем на 9% по сравнению с базой;

3. Представлены данные о тепломеханических характеристиках пульсирующих потоков во впускной системе поршневого двигателя с турбонаддувом; установлено, что наличие выравнивающей решетки в системе впуска вызывает подавление теплоотдачи в пределах 15% в сравнении с базовыми значениями;

4. Показано, что применение модернизированной впускной системы в дизеле (6ЧН 21/21) повысит ее вероятность безотказной работы на 0,8%;

5. Описанные результаты расширяют базу знаний о теплофизических процессах потоков воздуха в газодинамических системах сложной конфигурации и могут иметь практическое применение в области поршневого двигателестроения при модернизации систем газообмена.

## Список использованных источников

1. Reitz R. D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. [et al.] IJER editorial: The future of the internal combustion engine. International Journal of Engine Research 2020; 21(1): 3–10.
2. Nahim H. M., Younes R., Shraim H., Ouladsine M. Oriented review to potential simulator for faults modeling in diesel engine. Journal

of Marine Science and Technology (Japan) 2016; 21(3): 533–551.

3. Abaei M. M., Hekkenberg R., BahooToroody A. A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships. *Reliability Engineering and System Safety* 2021; 210: 107484.
4. Knežević V., Orović J., Stazić L., Čulin J. Fault tree analysis and failure diagnosis of marine diesel engine turbocharger system. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020; 8(12): 1004.
5. Vera-García F., Rubio J. A. P., Grau J. H., Hernández D. A. Improvements of a failure database for marine diesel engines using the RCM and simulations. *Energies* 2019; 13(1): 107.
6. Wang M., Ge Q., Jiang H., Yao G. Wear fault diagnosis of aeroengines based on broad learning system and ensemble learning. *Energies* 2019; 12(24): 4750.
7. Szkoda M., Kaczor G., Pilch R., Smolnik M., Konieczek Z. Assessment of the influence of preventive maintenance on the reliability and availability indexes of diesel locomotives. *Transport Problems* 2021; 16(1): 5–18.
8. Fernández A. J. Optimal durations of Weibull reliability tests based on failure counts. *Computers and Industrial Engineering* 2021; 156: 107247.
9. Mechalikh M., Benhammou A., Zidane I., Bettahar A. Study of piston thermo-elastic behaviour under thermomechanical solicitations. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 2019; 16(4): 7287–7298.
10. Berni F., Cicalese G., Borghi M., Fontanesi S. Towards grid-independent 3D-CFD wall-function-based heat transfer models for complex industrial flows with focus on in-cylinder simulations. *Applied Thermal Engineering* 2021; 190: 116838.
11. Liu H., Wen M., Yang H., Yue Z., Yao M. A Review of Thermal Management System and Control Strategy for Automotive Engines. *Journal of Energy Engineering* 2021; 147(2): 03121001.
12. Pagán Rubio J. A., Vera-García F., Hernandez Grau J., Muñoz Cámara J., Albaladejo Hernandez D. Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model. *Applied Thermal Engineering* 2018; 144: 982–995.
13. Brodov Y. M., Grigoryev N. I., Zhilkin B. P., Plotnikov L. V., Shestakov D. S. 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.
14. Бродов Ю. М., Жилкин Б. П., Плотников Л. В. Снижение тепловой напряженности впускных и выпускных систем двигателей внутреннего сгорания с наддувом. *Надежность и безопасность энергетики* 2016; 1(32): 19–23.
15. Плотников Л. В. Нестационарные тепломеханические процессы в системах газообмена поршневых двигателей с турбонаддувом: монография / под общ. ред. Б. П. Жилкина, Ю. М. Бродова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та 2020;: 204.

## References

1. Reitz R. D., Ogawa H., Payri R., Fansler T. [et al.] *IJER* editorial: The future of the internal combustion engine.

2. Nahim H. M., Younes R., Shraim H., Ouladsine M. Oriented review to potential simulator for faults modeling in diesel engine. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)* 2016; 21(3): 533–551.
3. Abaei M. M., Hekkenberg R., BahooToroody A. A multinomial process tree for reliability assessment of machinery in autonomous ships. *Reliability Engineering and System Safety* 2021; 210: 107484.
4. Knežević V., Orović J., Stazić L., Čulin J. Fault tree analysis and failure diagnosis of marine diesel engine turbocharger system. *Journal of Marine Science and Engineering* 2020; 8(12): 1004.
5. Vera-García F., Rubio J. A. P., Grau J. H., Hernández D. A. Improvements of a failure database for marine diesel engines using the RCM and simulations. *Energies* 2019; 13(1): 107.
6. Wang M., Ge Q., Jiang H., Yao G. Wear fault diagnosis of aeroengines based on broad learning system and ensemble learning. *Energies* 2019; 12(24): 4750.
7. Szkoda M., Kaczor G., Pilch R., Smolnik M., Konieczek Z. Assessment of the influence of preventive maintenance on the reliability and availability indexes of diesel locomotives. *Transport Problems* 2021; 16(1): 5–18.
8. Fernández A. J. Optimal durations of Weibull reliability tests based on failure counts. *Computers and Industrial Engineering* 2021; 156: 107247.
9. Mechalikh M., Benhammou A., Zidane I., Bettahar A. Study of piston thermo-elastic behaviour under thermomechanical solicitations. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering* 2019; 16(4): 7287–7298.
10. Berni F., Cicalese G., Borghi M., Fontanesi S. Towards grid-independent 3D-CFD wall-function-based heat transfer models for complex industrial flows with focus on in-cylinder simulations. *Applied Thermal Engineering* 2021; 190: 116838.
11. Liu H., Wen M., Yang H., Yue Z., Yao M. A Review of Thermal Management System and Control Strategy for Automotive Engines. *Journal of Energy Engineering* 2021; 147(2): 03121001.
12. Pagán Rubio J. A., Vera-García F., Hernandez Grau J., Muñoz Cámara J., Albaladejo Hernandez D. Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model. *Applied Thermal Engineering* 2018; 144: 982–995.
13. Brodov Y. M., Grigoryev N. I., Zhilkin B. P., Plotnikov L. V., Shestakov D. S. 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.
14. Brodov Yu. M., Zhilkin B. P., Plotnikov L. V. Reducing the thermal stress of the intake and exhaust systems of supercharged internal combustion engines. *Safety and Reliability of Power Industry* 2016; 1(32): 19–23. (In Russ.)
15. Plotnikov L. V. Non-stationary thermomechanical processes in gas exchange systems of piston engines with turbocharging: monograph / under total. ed. B. P. Zhilkina, Yu. M. Brodov. Yekaterinburg: Ural University Publishing House 2020;: 204 p. (In Russ.)

