

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 5. С. 231–239
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 5, pp. 231–239

Научная статья
УДК 62-144.3

Стационарная газодинамика и теплоотдача потока в выпускных трубопроводах с разными формами поперечного сечения (применительно к поршневым двигателям)

Л.В. Плотников¹✉, О.В. Комаров¹, Т.А. Недошивина¹, М.А. Савин²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Екатеринбург, Россия

✉leonplot@mail.ru

Аннотация. Рассматривается влияние формы поперечного сечения трубопровода на аэродинамику, газодинамическую структуру и теплоотдачу стационарных потоков в цилиндре и выпускной системе поршневого двигателя при разных расходах воздуха. Установлено, что форма поперечного сечения выпускного трубопровода практически не оказывает влияния на распределение потока внутри цилиндра. Структура потока в квадратном и треугольном трубопроводах имеет существенные отличия от круглой конфигурации. Выявлено, что имеет место снижение степени турбулентности потока в выпускной системе на 36 % при использовании профилированных труб. Определено, что применение квадратных и треугольных труб вызывает уменьшение коэффициента теплоотдачи в выпускной системе до 34 %.

Ключевые слова: поршневой двигатель, система выпуска, структура потока, газодинамика и теплоотдача, квадратный и треугольный каналы, экспериментальный стенд

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-29-00022.

Для цитирования. Плотников Л.В., Комаров О.В., Недошивина Т.А., Савин М.А. Стационарная газодинамика и теплоотдача потока в выпускных трубопроводах с разными формами поперечного сечения (применительно к поршневым двигателям) // Тепловые процессы в технике. 2024. Т.16. № 5. С. 231–239. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182010>

Original article

Stationary gas dynamics and heat transfer of flow in exhaust pipelines with different cross section shape (applied to piston engines)

L.V. Plotnikov¹✉, O.V. Komarov¹, T.A. Nedoshivina¹, M.A. Savin²¹Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia²Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergency Situations and Disaster Relief, Yekaterinburg, Russia

✉leonplot@mail.ru

Abstract. The article considers the influence of the pipeline cross-sectional shape impact on the stationary flows aerodynamics, gas-dynamic structure and heat transfer of in the cylinder and exhaust system of a piston engine at various air flow rates. It has been found that the cross-sectional shape of the exhaust pipeline has virtually no effect on the flow distribution inside the cylinder. The flow structure in both square and triangular pipelines has significant differences from the circular configuration. The authors revealed reduction in the flow turbulence degree occurrence in the exhaust system by 36 % while profiled pipes application, and determined that application of the square and triangular pipes causes the heat transfer coefficient decrease in the exhaust system by up to 34 %.

Keywords: piston engine, exhaust system, flow structure, gas dynamics and heat transfer, square and triangular channels, experimental test bench

Funding. The work was financed by the Russian Science Foundation (grant No. 23-29-00022).

For citation. Plotnikov L.V., Komarov O.V., Nedoshivina T.A., Savin M.A. Stationary gas dynamics and heat transfer of flow in exhaust pipelines with different cross section shape (applied to piston engines). *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 5, pp. 231–239. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182010>

Введение

Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) являются самыми распространенными преобразователями энергии среди тепловых двигателей. Поршневые ДВС применяются практически во всех областях экономики по всему миру (автомобили, мобильные электрические станции, самолеты, тепловозы, корабли и т. д.). Поэтому повышение эффективности и экологичности поршневых двигателей остается актуальной задачей для устойчивого развития науки и технологий [1]. Решение этой задачи заключается в настройке параметров рабочего цикла и модернизации конструкции основных систем поршневых ДВС. Например, совершенство газодинамики и теплообмена в процессе выпуска отработавших газов из цилиндра и осо-

бенности конструкции выпускной системы значительно определяют эксплуатационные показатели двигателей внутреннего сгорания [2].

Существует большое количество современных исследований, связанных с изучением и совершенствованием процессов в выпускной системе с целью улучшения технических, экономических и экологических показателей поршневых ДВС. Многие ученые и специалисты занимались детальным анализом газодинамических характеристик потока в процессе выпуска [3, 4]. Так, Ф. Хи и др. разработали комплекс математических моделей для анализа скорости, давления и вихревых структур потока в выпускной системе [3]. Цель работы заключалась в оптимизации структуры течения в коллекторе. Л.С. Мозес и др. предложили оригинальную конструк-

цию выпускного коллектора для гоночного автомобиля, которая обладает улучшенными газодинамическими характеристиками [4]. Ю. Калита и др. занимались снижением газодинамического шума отработавших газов посредством совершенствования газодинамики в выпускной системе [5].

Величина гидравлического сопротивления выпускной системы существенно влияет на мощность и КПД поршневого двигателя, поэтому данной тематике уделяется большое внимание [6, 7]. Н.А. Азиз и др. исследовали влияние величины диаметра, длины и наличия различных изгибов выпускного коллектора на уровень гидравлического сопротивления выпускной системы гоночного автомобиля на основе математического моделирования [6]. Наименьшая величина потери давления составила 12,24 кПа. Х. Сапра и др. проводили оценку влияния гидравлического сопротивления выпускной системы на технико-экономические показатели судового дизельного двигателя [7]. Установлено, что снижение величины сопротивления на выпуске приводит к росту мощности ДВС.

Существуют исследования по оценке геометрических размеров элементов выпускной системы на технико-экономические показатели поршневых двигателей [8, 9]. П. Савант и др. изучали влияние диаметра выпускного коллектора на величину крутящего момента ДВС [8]. Установлено, что имеет место рост крутящего момента на 4,23 % в случае оптимизации диаметра трубопровода. Дж. Ким и др. изучали влияние нескольких геометрических параметров выпускной системы на показатели поршневого двигателя: диаметр, длина и объем коллектора [9]. В результате доводки геометрии выпускной системы крутящий момент увеличился до 15 %, расход топлива снизился на 2,4 %, мощность возросла до 1,4 %.

Исследователи проводят детальное изучение газодинамических и теплообменных характеристик пульсирующих потоков отработавших газов [10]. Эти данные необходимы для более глубокого понимания физических особенностей протекания процесса выпуска в ДВС. М.А.С.М. Хассан и др. сконцентрировались на определении уровня теплообмена в выпускном коллекторе и канале в головке блока цилиндров [11]. Известно, что интенсивность теплоот-

дачи значительно определяет уровень тепловых напряжений в деталях различных технических устройств [12]. Поэтому исследование и оптимизация теплообменных характеристик потока в выпускном коллекторе являются актуальной задачей для повышения прочности и надежности двигателей. При этом известно, что определение и управление величины теплообмена в выпускной системе являются ключевым фактором для обеспечения экологической безопасности поршневых ДВС [13]. Существуют современные и эффективные способы повторного использования тепловой энергии выпускных газов [14].

Таким образом, основная цель данной работы состоит в изучении структуры потока в цилиндре и выпускных трубопроводах в процессе выпуска, а также получении данных о степени турбулентности и локальном коэффициенте теплоотдаче стационарных потоков в трубопроводах с разными формами поперечного сечения на основе экспериментальных исследований.

Описание методик исследования

В рамках данного исследования было создано две экспериментальные установка с соответствующими измерительными системами.

Исследование структуры потока в цилиндре и выпускном трубопроводе осуществлялось на основе метода тепловизуализирующей съемки [15]. Для этого была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 1).

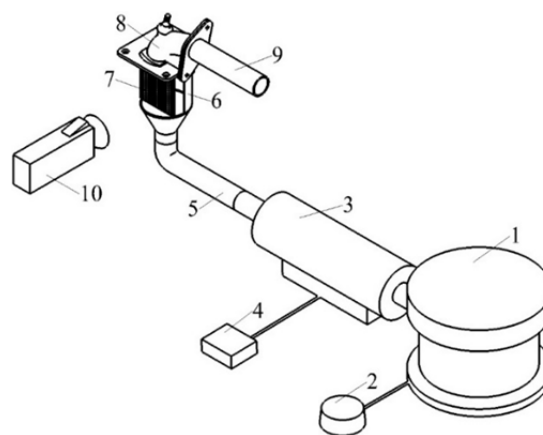


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда для исследования структуры потока в цилиндре и выпускном трубопроводе: 1 – насос, 2 – блок регулирования расхода воздуха, 3 – электрический нагреватель, 4 – блок регулирования температуры нагрева воздуха, 5 – соединительный трубопровод, 6 – цилиндр, 7 – сетка, 8 – головка блока цилиндров с клапаном, 9 – выпускной трубопровод, 10 – тепловизор

Для визуализации течения и получения термограмм воздух нагревался до температуры 64 ± 1 °С с помощью нагревателя мощностью 3,2 кВт. Рабочей средой в экспериментах являлся воздух. Исследования проводились при стандартном атмосферном давлении. Опыты выполнялись на разных режимах. Расход воздуха через выпускную систему составлял от 0,008 до 0,015 м³/с. Средняя скорость потока в выпускном трубопроводе составляла от 5,5 до 60 м/с (число Рейнольдса составляло от 11000 до 120000, то есть режим течения был турбулентным).

Для получения термограмм (теплового поля в цилиндре и выпускном трубопроводе) использовался тепловизор модели Testo 890-2 (Германия). Дополнительный контроль температуры в выпускном трубопроводе осуществлялся с помощью термопар. Скорость потока воздуха w и объемный расход воздуха V в выпускной системе определялся посредством термоанемометра постоянной температуры.

Исследование газодинамических и теплообменных характеристик в выпускном трубопроводе осуществлялось на основе классического метода тепловой анемометрии. Для этого была разработана и изготовлена еще одна экспериментальная установка (рис. 2).

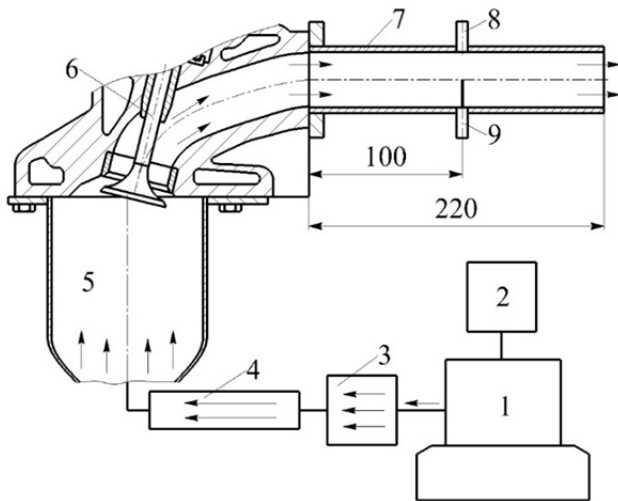


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для исследования газодинамики и локальной теплоотдачи в выпускном трубопроводе модели поршневого двигателя: 1 – насос, 2 – система регулирования расхода воздуха, 3 – ресивер, 4 – соединительный трубопровод, 5 – цилиндр, 6 – головка блока цилиндров с клапаном, 7 – выпускной трубопровод, 8 – датчик термоанемометра для определения локального коэффициента теплоотдачи, 9 – датчик термоанемометра для определения местной скорости потока

Рабочей средой в данных опытах также являлся воздух. Эксперименты проводились при стандартном атмосферном давлении. Температура воздуха составляла 21 ± 1 °С. В данном случае опыты также выполнялись для разных скоростей потока в выпускной системе. Расход воздуха через выпускную систему составлял от 0,008 до 0,015 м³/с. Средняя скорость потока в выпускном трубопроводе составляла от 5,5 до 60 м/с (число Рейнольдса составляло от 11000 до 120000, то есть режим течения был турбулентным на всех исследуемых w).

Средняя скорость потока воздуха w измерялась с помощью термоанемометра постоянной температуры (патент № 81338 RU) и ниточного датчика. Локальный коэффициент теплоотдачи α_x определялся с помощью метода косвенного метода также на основе термоанемометра постоянной температуры и другого типа датчика [16]. Данные о w и α_x поступали в аналого-цифровой преобразователь фирмы LCard (Россия) и далее обрабатывались в специализированном программном обеспечении LGraph2 (Россия).

Степень турбулентности Tu использовалась для оценки уровня пульсационной составляющей для потока в выпускной системе. Tu определялась как отношение среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к средней скорости исследуемого потока в трубе. Осредненный коэффициент теплоотдачи α определялся как среднее арифметическое данных о α_x вдоль выпускного трубопровода.

Научная идея совершенствования газодинамики и теплообмена потока в выпускной системе состояла в использовании профилированных трубопроводов с поперечными сечениями в форме квадрата и треугольника. Известно, что в таких трубопроводах возникают вторичные (продольные, турбулентные) течения, которые оказывают существенное влияние на газодинамику и теплообмен потоков [17].

Базовая конфигурация выпускного трубопровода имела круглое поперечное сечение с внутренним диаметром 30 мм. Профилированные трубопроводы имели квадратное и треугольные поперечные сечения. Квадрат имел сторону 32 мм, треугольник – 52 мм. Длина всех выпускных трубопроводов равнялась 220 мм. Основные геометрические размеры трубопроводов представлены на рис. 3.

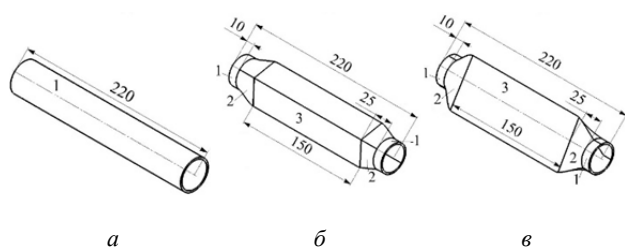


Рис. 3. Геометрические размеры базового выпускного трубопровода (а), трубопровода с квадратным участком (б) и трубопровода с треугольным участком (в): 1 – участок с круглым поперечным сечением; 2 – участок перехода; 3 – профилированный участок

Исследования проводились в три этапа: 1 – изучение структуры потока в цилиндре для разных конфигураций выпускного трубопровода; 2 – получение данных о структуре потока в выпускных трубопроводах с разными формами поперечного сечения; 3 – изучение газодинамики и теплообмена в выпускных трубопроводах разных конфигураций.

Результаты экспериментальных исследований

Структура потока в цилиндре двигателя при истечении через выпускные трубопроводы с разными поперечными сечениями показана на рис. 4.

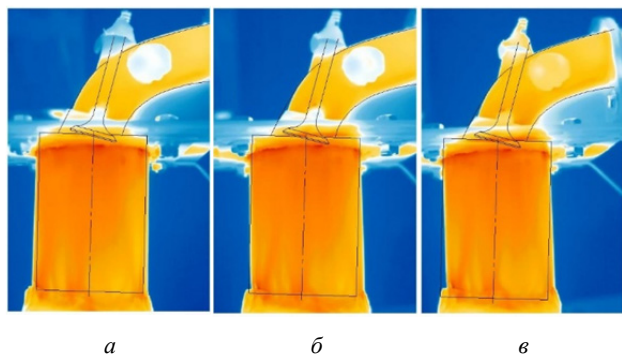


Рис. 4. Термограммы структуры потока воздуха в цилиндре в процессе выпуска через тарельчатый клапан и выпускной трубопровод с разными формами поперечного сечения для $V = 0,008 \text{ м}^3/\text{с}$: а – круг, б – квадрат, в – треугольник

Из рис. 4 видно, что конфигурация выпускного трубопровода фактически не оказывает влияния на структуру потока в цилиндре двигателя при небольшом расходе воздуха через систему. Термограммы являются фактически одинаковыми для всех исследуемых конфигураций

выпускного трубопровода. Структура потока имеет практически равномерное распределение по всему объему цилиндра. Также наблюдается небольшая интенсификация движения в верхней части цилиндра, что определяется наличием выпускного клапана. При этом в нижнем левом углу наблюдается более слабое движение потока, что особенно характерно для базовой выпускной системы с круглым трубопроводом (рис. 4 а). Следует отметить, что данная физическая картина (экспериментальные данные) хорошо совпадает с результатами моделирования [18]. Моделирование также показало, что поле скоростей в цилиндре остается фактически неизменным при использовании выпускных трубопроводов с поперечным сечением в форме круга, квадрата и треугольника.

Увеличение расхода воздуха через выпускную систему не оказывает заметного влияния на структуру потока в цилиндре (рис. 5).

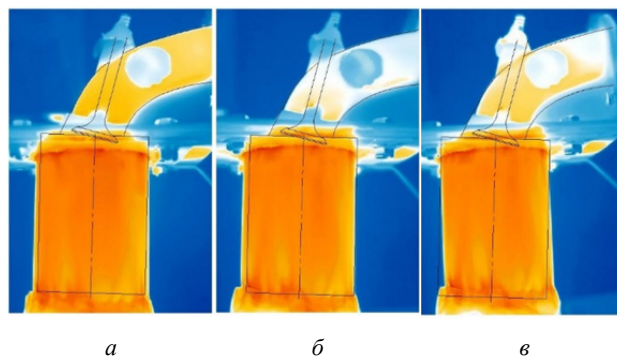


Рис. 5. Термограммы структуры потока воздуха в цилиндре в процессе выпуска через тарельчатый клапан и выпускной трубопровод с разными формами поперечного сечения для $V = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$: а – круг, б – квадрат, в – треугольник

Из рис. 5 видно, что распределение потока по объему цилиндра остается практически равномерным для всех исследуемых конфигураций выпускного трубопровода. Другими словами, в цилиндре отсутствуют застойные или вихревые зоны. При этом в нижнем левом углу не наблюдается слабое движение воздуха, что относится ко всем конструкциям выпускной системы. Эти экспериментальные данные также хорошо согласуются с результатами моделирования процесса выпуска в поршневом двигателе [18].

Структура потока в профилированных выпускных трубопроводах для разных расходов воздуха через систему показана на рис. 6 и 7.

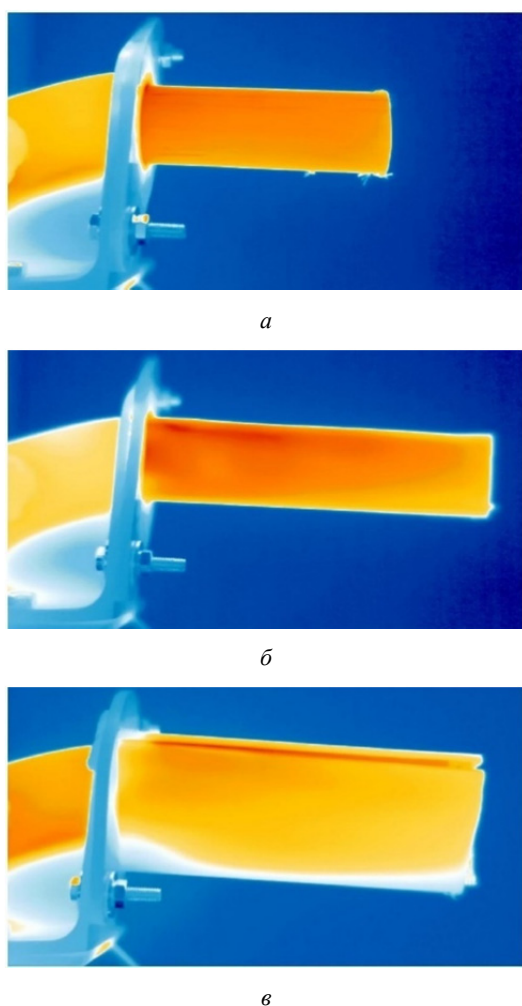


Рис. 6. Термограммы структуры потока воздуха в выпускном трубопроводе с разными формами поперечного сечения для $V = 0,008 \text{ м}^3/\text{с}$: *а* – круг, *б* – квадрат, *в* – треугольник

Установлено, что в базовом выпускном трубопроводе с круглым поперечным сечением структура потока имеет равномерное распределение по всей длине для малого расхода воздуха (рис. 6 *а*). Использование квадратного поперечного сечения вызывает более интенсивное движение воздуха в средней и верхней части выпускного трубопровода (рис. 6 *б*). Это должно оказать положительное влияние на очистку цилиндра от отработавших газов. В свою очередь установка треугольного поперечного сечения приводит к формированию застойных зон в начале и конце трубопровода (в углах треугольника) (рис. 6 *в*). Следует отметить, что форма поперечного сечения трубопровода оказывает заметное влияние на структуру потока. Это может привести к улучшению качества газообмена в поршневых ДВС. Эксперименталь-

ные данные о структуре потока в профилированных выпускных трубопроводах также имеют хорошее совпадение с результатами моделирования [18].

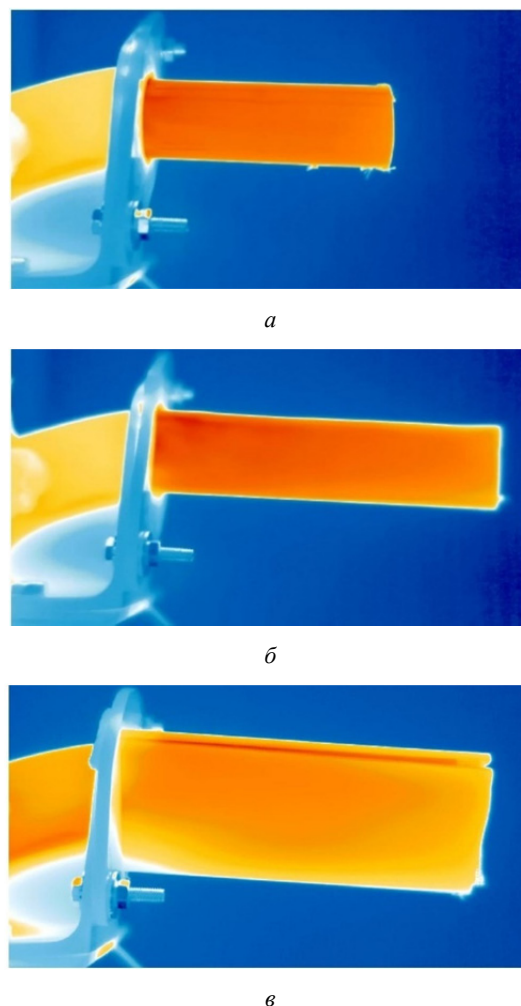


Рис. 7. Термограммы структуры потока воздуха в выпускном трубопроводе с разными формами поперечного сечения для $V = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$: *а* – круг, *б* – квадрат, *в* – треугольник

Увеличение расхода воздуха через систему приводит к изменениям в структуре потока в профилированных выпускных трубопроводах (рис. 7). Структура потока в квадратном трубопроводе становится практически равномерной при большом расходе воздуха через систему (рис. 7 *б*). При этом застойные зоны в треугольном трубопроводе становятся значительно меньше (рис. 7 *в*).

Выявлено, что применение профилированных трубопроводов приводит к снижению степени турбулентности Tu стационарного потока в выпускной системе (рис. 8).

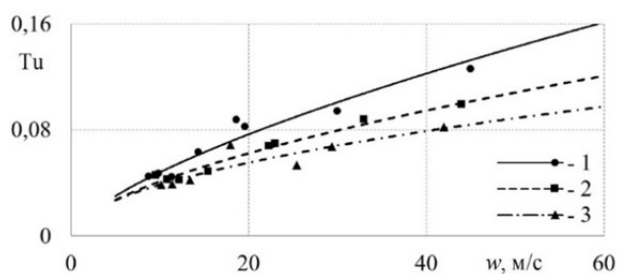


Рис. 8. Зависимость степени турбулентности Tu от средней скорости потока w в выпускном трубопроводе с разными формами поперечного сечения: 1 – круг, 2 – квадрат, 3 – треугольник

Так, величина Tu в системе с квадратным трубопроводом снижается на 5–23 % по сравнению с базовой выпускной системой. При этом использование треугольного трубопровода вызывает уменьшение степени турбулентности вплоть до 36 % по сравнению с базовой системой. Снижение значений Tu означает уменьшение пульсационной составляющей скорости потока в выпускной системе. Это также косвенно свидетельствует о стабилизации течения в ядре потока. Потенциально стабилизация потока должна привести к улучшению очистки цилиндра от выхлопных газов.

Установлено, что снижение степени турбулентности вызывает уменьшение интенсивности теплоотдачи стационарного потока воздуха в выпускной системе (рис. 9).

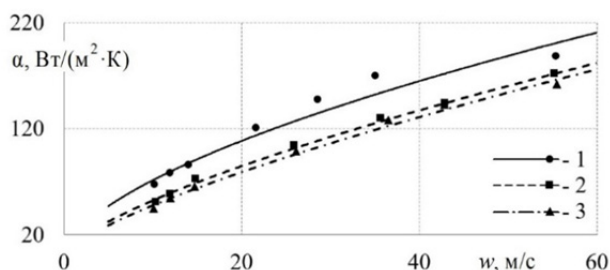


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от средней скорости потока w в выпускном трубопроводе с разными формами поперечного сечения: 1 – круг, 2 – квадрат, 3 – треугольник

Применение квадратного трубопровода приводит к снижению коэффициента теплоотдачи α стационарного потока воздуха в выпускной системе на 8–25 % по сравнению с базовой системой. При этом значения α уменьшаются на 12–34 % в выпускной системе с треугольным трубопроводом. Следует отметить, что в данном случае выполняется хорошо известная законо-

мерность: интенсивность теплоотдачи является обратно пропорциональной величине степени турбулентности [19].

Снижение коэффициента теплоотдачи в выпускной системе окажет положительное влияние на температурные напряжения в трубопроводе. Также это должно привести к повышению тепловой энергии, которая поступает в турбину в случае двигателя с турбокомпрессором.

Заключение

В данной работе была изучена структура потока в цилиндре и профилированных выпускных трубопроводах, а также получены данные о газодинамических и теплообменных характеристиках стационарных потоков воздуха в круглом, квадратном и треугольном каналах на основе метода тепловизуализирующей съемки и метода тепловой анемометрии.

Показано, что форма поперечного сечения выпускного трубопровода фактически не оказывает влияния на структуру потока в цилиндре.

Установлено, что структура потока в круглом выпускном трубопроводе является практически равномерной; в квадратном трубопроводе наблюдается более интенсивное движение воздуха в верхней части; в треугольной трубе формируются застойные зоны в начале и конце канала.

Выявлено, что имеет место снижение степени турбулентности потока в выпускной системе при использовании профилированных трубопроводов (величина снижения составляет вплоть до 36 % по сравнению с базовой системой). Это свидетельствует о некоторой стабилизации ядра потока.

Определено, что применение профилированных трубопроводов также вызывает уменьшение коэффициента теплоотдачи потоков в выпускной системе вплоть до 34 % по сравнению с базовой системой.

Потенциальные преимущества применения квадратных и треугольных трубопроводов в выпускной системе: улучшение очистки цилиндра от отработавших газов, снижение тепловых напряжений в системе, повышение КПД турбокомпрессора и поршневого двигателя.

Полученные данные расширяют базу знаний о газодинамике и теплообмене стационарных потоков, а также могут быть полезными для проектирования систем газообмена поршневых ДВС с перспективными показателями.

Список 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. Vol. 21(1). P. 3–10.
2. **Mavrigian M.** Performance Exhaust Systems: How to Design, Fabricate, and Install. USA: CarTech, 2014. 144 p.
3. **He F., Feng X., Pan Z., Zhou G., Lu Y.** Research and Optimization on the Exhaust Flow Characteristics Based on Energy-Splitting Method of the Low-Speed Marine Diesel Engine // *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2024. Vol. 146(1). Article number 011701.
4. **Moses L.S., Rahman M.T.A., Adom A.H., Jamir M.R.M., Nawi M.A.H.M., Basha M.H.** An Analysis of The Material and Design of an Exhaust Manifold for A Single-Cylinder Internal Combustion Engine // *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2023. Vol. 30(2). P. 163–175.
5. **Kalita U., Singh M.** Aerodynamic Performance Analysis of Muffler Used in Exhaust System of Automotive Vehicles // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2800(1). Article number 020049.
6. **Aziz N.A., Rahman M.T.A., Amin N.A.M., Majid M.S.A., Rojan A., Nasir N.F.M., Rahman Y.M.N.** Design and analysis of exhaust manifold for a single-cylinder internal combustion engine (ICE) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 765(1). Article number 012083.
7. **Sapra H., Godjevac M., Visser K., Stapersma D., Dijkstra C.** Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure // *Applied Energy*. 2017. Vol. 204. P. 78–92.
8. **Sawant P., Warstler M., Bari S.** Exhaust tuning of an internal combustion engine by the combined effects of variable exhaust pipe diameter and an exhaust valve timing system // *Energies*. 2018. Vol. 11(6). Article number 1545.
9. **Kim J., Chiong M.S., Rajoo S.** Effect of Turbine Upstream Geometry on Pulsating Flow and Turbocharged Si-Engine Performance // *International Journal of Automotive Technology*. 2023. Vol. 24(2). P. 527–539.
10. **Hong B., Venkataraman V., Mihaescu M., Cronhjort A.** Crank angle-resolved mass flow characterization of engine exhaust pulsations using a Pitot tube and thin-wire thermocouples // *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 236. Article number 121725.
11. **Hassan M.A.S.M., Razlan Z.M., Bakar S.A., Rahman A.A., Rojan M.A., Wan W.K., Ibrahim Z., Ishak A.A., Ridzuan M.J.M.** Derivation and validation of heat transfer model for Spark-Ignition engine cylinder head // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 225. Article number 120240.
12. **Ouyoussef N., Moustabchir H.** Predicting Fracture Placement and Analyzing Fatigue Life in Exhaust Manifold Systems Using Finite Element Analysis // *Journal European des Systemes Automatises*. 2023. Vol. 56(3). P. 493–499.
13. **Basaran H.U., Ozsoysal O.A.** Effects of application of variable valve timing on the exhaust gas temperature improvement in a low-loaded diesel engine // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 122. P. 758–767.
14. **Ouyang T., Pan M., Tan X., Li L., Huang Y., Mo C.** Power prediction and packed bed heat storage control for marine diesel engine waste heat recovery // *Applied Energy*. 2024. Vol. 357. Article number 122520.
15. **Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N.** Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // *Instruments and experimental techniques*. 2004. Vol. 4. P. 545–546.
16. **Plotnikov L.** A Thermal Anemometry Method for Studying the Unsteady Gas Dynamics of Pipe Flows: Development, Modernisation, and Application // *Sensors*. 2023. Vol. 23(24). Article number 9750.
17. **Плотников Л.В., Григорьев Н.И., Осипов Л.Е., Десятов К.О.** Расчетно-экспериментальная оценка интенсивности теплоотдачи стационарных потоков газа в трубах с разными поперечными сечениями с учетом турбулизации течения // *Тепловые процессы в технике*. 2022. Т. 14. № 5. С. 218–224.
18. **Плотников Л.В., Шурупов В.А., Следнев В.А., Давыдов Д.А., Красильников Д.Н.** Стационарная термогазодинамика потоков в цилиндре и выпускной системе поршневого двигателя // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2023. Т. 25. № 1. С. 130–142.
19. **Terekhov V.I.** Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review // *Energies*. 2021. Vol. 14. Article number 1005.

References

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, vol. 21(1), pp. 3–10.
2. **Mavrigian M.** Performance Exhaust Systems: How to Design, Fabricate, and Install. USA: CarTech, 2014, 144 p.
3. **He F., Feng X., Pan Z., Zhou G., Lu Y.** Research and Optimization on the Exhaust Flow Characteristics Based on Energy-Splitting Method of the Low-Speed Marine Diesel Engine. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, 2024, vol. 146(1), article number 011701.
4. **Moses L.S., Rahman M.T.A., Adom A.H., Jamir M.R.M., Nawi M.A.H.M., Basha M.H.** An Analysis of The Material and Design of an Exhaust Manifold for A Single-Cylinder Internal Combustion Engine. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 2023, vol. 30(2), pp. 163–175.
5. **Kalita U., Singh M.** Aerodynamic Performance Analysis of Muffler Used in Exhaust System of Automotive Vehicles. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2800(1), article number 020049.

6. **Aziz N.A., Rahman M.T.A., Amin N.A.M., Majid M.S.A., Rojan A., Nasir N.F.M., Rahman Y.M.N.** Design and analysis of exhaust manifold for a single-cylinder internal combustion engine (ICE). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 765(1), article number 012083.
7. **Sapra H., Godjevac M., Visser K., Stapersma D., Dijkstra C.** Experimental and simulation-based investigations of marine diesel engine performance against static back pressure. *Applied Energy*, 2017, vol. 204, pp. 78–92.
8. **Sawant P., Warstler M., Bari S.** Exhaust tuning of an internal combustion engine by the combined effects of variable exhaust pipe diameter and an exhaust valve timing system. *Energies*, 2018, vol. 11(6), article number 1545.
9. **Kim J., Chiong M.S., Rajoo S.** Effect of Turbine Upstream Geometry on Pulsating Flow and Turbocharged Si-Engine Performance. *International Journal of Automotive Technology*, 2023, vol. 24(2), pp. 527–539.
10. **Hong B., Venkataraman V., Mihaescu M., Cronhjort A.** Crank angle-resolved mass flow characterization of engine exhaust pulsations using a Pitot tube and thin-wire thermocouples. *Applied Thermal Engineering*, 2024, vol. 236, article number 121725.
11. **Hassan M.A.S.M., Razlan Z.M., Bakar S.A., Rahman A.A., Rojan M.A., Wan W.K., Ibrahim Z., Ishak A.A., Ridzuan M.J.M.** Derivation and validation of heat transfer model for Spark-Ignition engine cylinder head. *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 225, article number 120240.
12. **Ouyoussef N., Moustabchir H.** Predicting Fracture Placement and Analyzing Fatigue Life in Exhaust Manifold Systems Using Finite Element Analysis. *Journal Europeen des Systemes Automatises*, 2023, vol. 56(3), pp. 493–499.
13. **Basaran H.U., Ozsoysal O.A.** Effects of application of variable valve timing on the exhaust gas temperature improvement in a low-loaded diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 122, pp. 758–767.
14. **Ouyang T., Pan M., Tan X., Li L., Huang Y., Mo C.** Power prediction and packed bed heat storage control for marine diesel engine waste heat recovery. *Applied Energy*, 2024, vol. 357, article number 122520.
15. **Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N.** Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows. *Instruments and experimental techniques*, 2004, vol. 4, pp. 545–546.
16. **Plotnikov L.** A Thermal Anemometry Method for Studying the Unsteady Gas Dynamics of Pipe Flows: Development, Modernisation, and Application. *Sensors*, 2023, vol. 23(24), article number 9750.
17. **Plotnikov L.V., Grigoriev N.I., Osipov L.E., Desyatov K.O.** Computational and experimental estimation of the heat transfer intensity of stationary gas flows in pipes with different cross sections, taking into account flow turbulence. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 218–224.
18. **Plotnikov L.V., Shurupov V.A., Slednev V.A., Davydov D.A., Krasilnikov D.N.** Stationary thermogasdynamics of flows in the cylinder and exhaust system of a piston engine. *Power engineering: research, equipment, technology*, 2023, vol. 25(1), pp. 130–142.
19. **Terekhov V.I.** Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review. *Energies*, 2021, vol. 14, article number 1005.