

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 363–371
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 8, pp. 363–371

Научная статья
УДК 62-144.3
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186016>
EDN: <https://www.elibrary.ru/ZVCOJB>

Влияние конструкции головки цилиндра двигателя на газодинамику и теплоотдачу стационарных потоков газа во впускной системе

Л.В. Плотников^{1✉}, Н.И. Григорьев², В.А. Шурупов³, М.З. Файзуллин⁴

^{1,2,3}ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Российская Федерация

^{3,4}ФГБУН «Институт теплофизики УрО РАН», Екатеринбург, Российская Федерация

¹leonplot@mail.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается влияние разных конструкций головки цилиндров на газодинамические и теплообменные характеристики потоков воздуха во впускной системе модели поршневого двигателя. Установлено, что применение модернизированных головок цилиндров вызывает рост степени турбулентности потока во впускной трубе в среднем на 13,5 %. При этом, выявлено, что увеличение степени турбулентности потока в цилиндре составляет около 19 % при установке новых конструкций головки цилиндров. Показано, что имеет место повышение коэффициента теплоотдачи во впускной трубе на 10–40 % при установке во впускную систему модернизированных головок цилиндров. В статье обсуждаются прикладные вопросы роста степени турбулентности и интенсификации теплоотдачи потока воздуха во впускной системе применительно к эксплуатационным характеристикам поршневых двигателей.

Ключевые слова: поршневой двигатель, головка цилиндров, профилированный канал, профилированный клапан, стационарный поток воздуха, степень турбулентности, интенсивность теплоотдачи

Для цитирования. Плотников Л.В., Григорьев Н.И., Шурупов В.А., Файзуллин М.З. Влияние конструкции головки цилиндра двигателя на газодинамику и теплоотдачу стационарных потоков газа во впускной системе // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 363–371. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186016>

Original article

The influence of the engine cylinder head design on the gas dynamics and heat transfer of stationary gas flows in the intake system

L.V. Plotnikov^{1✉}, N.I. Grigoriev², V.A. Shurupov³, M.Z. Faizullin⁴

^{1,2,3}Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

^{3,4}Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

¹leonplot@mail.ru✉

Abstract. The demand for piston engines (ICE) remains high in various spheres of human activity. Therefore, improving the design and operating cycle of ICE is an urgent task. Improving the quality of the intake process (filling the cylinder with air) by upgrading the design of the cylinder head is a highly effective way to improve the output indicators of ICE. A brief overview of the current state of research in this area is presented in the article. The article considers the influence of different cylinder head designs on the gas-dynamic and heat exchange characteristics of air flows in the intake system of the ICE model. The cylinder head was modernized by profiling the intake channel and profiling the intake valve plate (changing the shape from a circle to a square). Experimental studies were carried out under stationary conditions for a fully open intake valve. The article contains a description of the experimental setup and boundary conditions. The experiments covered a change in velocity in the intake pipe from 4 to 45 m/s. The experiments were carried out at atmospheric pressure and an air temperature of about 22 °C. The thermal anemometry method based on constant temperature anemometers was used to obtain data on gas dynamics and heat transfer in the intake system. It was found that the use of modernized cylinder heads causes an increase in the flow turbulence intensity in the intake pipe by an average of 13,5 %. At the same time, it was found that the increase in the intensity of flow turbulence in the cylinder is about 19 % when installing new cylinder head designs. It is shown that there is an increase in the heat transfer coefficient in the intake pipe by 10–40 % when installing modernized cylinder heads in the intake system. The article discusses the applied issues of increasing the turbulence intensity (improving the quality of mixing fuel and air) and intensifying heat transfer (increasing the density of the working fluid) of the air flow in the intake system as applied to ICEs. The article also discusses further directions of research in this scientific and technical area.

Keywords: piston engine, cylinder head, profiled channel, profiled valve, stationary air flow, turbulence intensity, heat transfer intensity

For citation. Plotnikov L.V., Grigoriev N.I., Shurupov V.A., Faizullin M.Z. The influence of the engine cylinder head design on the gas dynamics and heat transfer of stationary gas flows in the intake system. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 8, pp. 363–371. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186016>

Введение

Силовые и энергетические установки на базе поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) являются востребованными в области транспорта, распределенной генерации, гибридных систем и многих других отраслях [1]. По-

этому повышение энергоэффективности ПДВС остается актуальной задачей для науки и инженерии. Совершенствование газодинамики и теплообмена в процессе впуска посредством модернизации конструкции элементов впускной системы является одним из действенных способов повышения производительности и эффек-

тивности в ПДВС [2]. Соответственно, решение данных научно-технических задач представляет собой важное и перспективное направление в развитии поршневого двигателестроения.

Инженеры и ученые уделяют большое внимание влиянию длины и диаметра впускной трубы на эксплуатационные показатели ПДВС [3–5]. Так, Harazi M.F.A. и др. изучали влияние длины впускной трубы на объемную эффективность процесса впуска [3]. Автором удалось добиться увеличения объемной эффективности на 1,3 % посредством оптимальной настройки длины трубы на различных частотах вращения коленвала. Nemanandh J. и др. достигли большего улучшения объемной эффективности (до 15 %) за счет совместной настройки длины и площади поперечного сечения впускной трубы двигателя [4]. Ali M.H.A. и др. повысили мощность двигателя почти на 8 % и крутящий момент на 6,5 % за счет оптимизации длины и диаметра впускной трубы [5].

Известно, что конструкция каналов в головке цилиндров также оказывает заметное влияние на объемную эффективность процесса впуска и технические характеристики двигателя [6, 7]. Показано, что профилирование клапанных каналов вызывает увеличение объемной эффективности до 18 % по сравнению с базовой конфигурацией [6]. При этом, оптимизация конструкции каналов в головке цилиндров вызвала рост мощности и крутящего момента двигателя на 15 % [7]. Применение спиральных и винтовых каналов в головке цилиндра ПДВС является актуальным направлением для развития двигателестроения [8, 9]. Использование таких каналов приводит к формированию в цилиндре большого вихря и крупномасштабной турбулентности потока, что способствует улучшению однородности рабочего тела и повышению качества сгорания. Например, Luong G.H. и др. смогли повысить коэффициент завихрения (swirl ratio) в цилиндре на 15,2 % за счет доводки геометрии винтового канала в головке цилиндров ПДВС [8]. Wang G. и др. использовали спиральный канал для увеличения коэффициента завихрения (swirl ratio) в цилиндре на 16,5 %, снижения удельного расхода топлива на 1,8 г/(кВт·ч) и повышения мощности до 3,5 % [9].

Доводка конструкции впускной системы с целью снижения гидравлического сопротивле-

ния и улучшения расходных характеристик является отдельным научно-техническим направлением для ПДВС [10–12]. Важность данного фактора на показатели поршневого двигателя показаны в статье [10]: существенный рост гидравлического сопротивления на впуске может привести к снижению мощности почти на 10 %, росту удельного расхода топлива до 2,5 % и уменьшению температуры отработавших газов ПДВС. Pranoto S. и др. исследовали газодинамическую структуру потока воздуха во впускной системе для уменьшения застойных зон и гидравлического сопротивления [11]. Rahmi A. и др. добились увеличения объемной эффективности на 15 % и среднего давления цикла за счет газодинамического совершенствования элементов впускной системы двигателя [12]. Следует отметить, что большинство исследований процесса впуска в ПДВС основано на численном моделировании, в том числе, с использованием оригинальных математических моделей, имеющих повышенную производительность и/или точность [13].

Совершенствование процесса впуска и конструкции впускной системы также приводит к улучшению экологических показателей ПДВС [14, 15]. Так, Saaidia R. и др. добились снижения количества оксидов азота (NOx) в отработавших газах двигателя на 14 %, углеводородного остатка (CH) до 40 % и оксида углерода (CO) также до 40 % посредством модернизации впускной системы с последующей ее настройкой [14]. Zhang J. и др. выполнили комплексное совершенствование систем газообмена дизеля с циклом Миллера для улучшения экологических показателей [15]. Необходимо отметить, что существуют исследования по газодинамическому совершенствованию впускной и выпускной систем с целью снижения уровня шума ПДВС [16]. Например, Galamboš S.L. и др. смогли понизить уровень шума в процессе впуска на 7 дБ посредством оптимизации конструкции элементов систем газообмена [16].

Следует подчеркнуть, что научно-технические задачи, связанные с совершенствованием процесса впуска, являются актуальными не только для традиционных ПДВС, но они также являются востребованными для современных авиационных двигателей оригинальных конструкций [17] и роторных двигателей [18].

Таким образом, основные задачи данного исследования состояли в следующем:

- разработать натурную модель впускной системы двигателя с разными конструкциями головки цилиндров, а также создать измерительную систему для оценки газодинамических и теплообменных характеристик потоков воздуха во впускной системе;
- получить экспериментальные данные о газодинамике и теплоотдаче стационарных потоков воздуха во впускной трубе с разными конструкциями головки цилиндра и для разных начальных условий;
- оценить степень турбулентности потоков воздуха во впускной трубе и цилиндре двигателя с разными конструкциями головки цилиндров и для разных средних скоростей в системе;
- определить интенсивность теплоотдачи потоков воздуха во впускной трубе двигателя с разными конструкциями головки цилиндров и для разных расходов воздуха через систему.

Исследовательский стенд и измерительная аппаратура

Для исследования газодинамики и теплообмена стационарных потоков воздуха во впускной трубе был разработан и изготовлен экспериментальный стенд (рис. 1). Стенд включал несколько основных элементов: (1) натурная модель впускной системы ПДВС (составными частями были впускная труба, головка цилиндров разных конфигураций, цилиндр); (2) откачивающий насос с регулируемым расходом воздуха; (3) измерительная система (тепловые датчики, термоанемометры, термопары, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), компьютер с программным обеспечением).

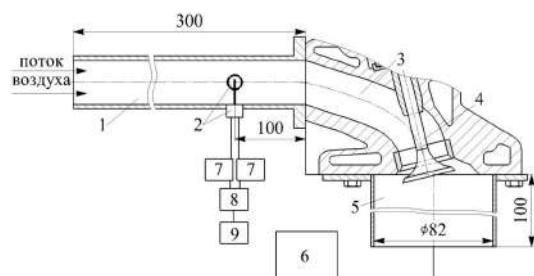


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – впускная труба; 2 – измерительные датчики; 3 – канал в головке цилиндра; 4 – впускной клапан; 5 – цилиндр; 6 – откачивающий насос; 7 – термоанемометр; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – ноутбук

Движение воздуха во впускной системе осуществлялось за счет разрежения в цилиндре, которое создавалось откачивающим насосом. В исследовании средняя скорость w во впускной трубе составляла от 4 до 45 м/с. Опыты охватывали диапазон чисел Рейнольдса от 8500 до 96000. Температура воздуха равнялась 22 ± 1 °С.

Для исследования было изготовлено несколько конфигураций головок цилиндров (рис. 2). Базовая конструкция головки цилиндров имела клапан с тарелкой круглой формы (посадочный диаметр был 32 мм) и клапанный канал с круглым поперечным сечением с внутренним диаметром также 32 мм (рис. 2 а). Альтернативная конструкция головки цилиндров имела клапан с тарелкой квадратной формы (посадочная сторона квадрата была 28, 35 мм) и клапанным каналом с круглым поперечным сечением с диаметром 32 мм (рис. 2 б). Сторона квадрата была выбрана исходя из равенства площадей поперечного сечения с базовой конфигурацией клапана. Клапанный канал имел квадратную форму только в области седла клапана с плавным переходом в круглое сечение. Третий вариант конструкции головки цилиндров имел квадратный клапан (28,35 мм) и квадратный канал со стороной 32 мм (рис. 2 в).

Головки цилиндров и клапана изготавливались посредством 3Д-печати из ABS-пластика со средней шероховатостью 6,3 мкм (технически гладкая поверхность). Клапан находился в полностью открытом положении в ходе проведения опытов (высота подъема клапана составляла 10 мм).

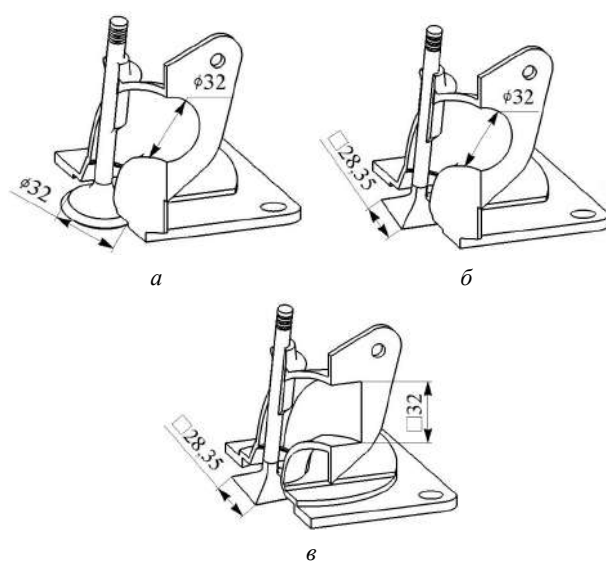


Рис. 2. Общий вид исследуемых конструкций головок цилиндров: а – круглый клапан и канал (базовая конфигурация); б – квадратный клапан и круглый канал; в – квадратные клапан и канал

В экспериментах определялись мгновенные значения скорости потока w_x и локального коэффициента теплоотдачи (КТО) α_x во впускной трубе для разных расходов воздуха через систему посредством метода тепловой анемометрии. Для этого использовались два вида тепловых, ниточных датчиков и термоанемометры постоянной температуры. Термоанемометр MiniСТА фирмы Dantec Dynamics (Дания) с чувствительным элементом (нагретая нить) примерно в центре трубы использовался для определения w_x . В данном исследовании, на основе функции $w_x = f(\tau)$ дополнительно определялась степень турбулентности Tu . Tu рассчитывалась как отношение среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к средней скорости исследуемого потока. Методика определения Tu подробнее описана в [19, 20].

Термоанемометр ИРВИС ТА-5.1 (Россия) с оригинальным (авторским) датчиком использовался для определения α_x . Этот датчик представлял собой подложку из фторопласта (с диаметром около 15 мм и толщиной примерно 2 мм), на которой размещалась нагретая нить с небольшим натягом. Способ измерения и определения локального КТО подробно описан в [21]. Для получения осредненного КТО α во впускной трубе осуществлялся расчет математического ожидания для функции $\alpha_x = f(\tau)$.

Контрольное сечение с датчиками термоанемометра располагалось во впускной трубе на расстоянии 100 мм от окна в головке цилиндров.

Относительная неопределенность определения скорости потока в экспериментах составляла 5,5 %, относительная неопределенность определения локального КТО – 10,8 %.

Результаты экспериментальных исследований, их анализ и обсуждение

Мгновенные значения w_x и α_x стационарного потока в трубе впускной системы с разными конструкциями головки цилиндров для низкого расхода воздуха (средняя скорость около 13 м/с) представлены на рис. 3.

Установлено, что использование модернизированной головки цилиндров приводит к незначительным изменениям в функции $w_x = f(\tau)$. Имеют место незначительные колебания w_x около среднего значения для всех исследуемых конфигураций. При этом, применение квадрат-

ного клапана вызывает небольшое увеличение амплитуд колебаний w_x (рис. 3 б).

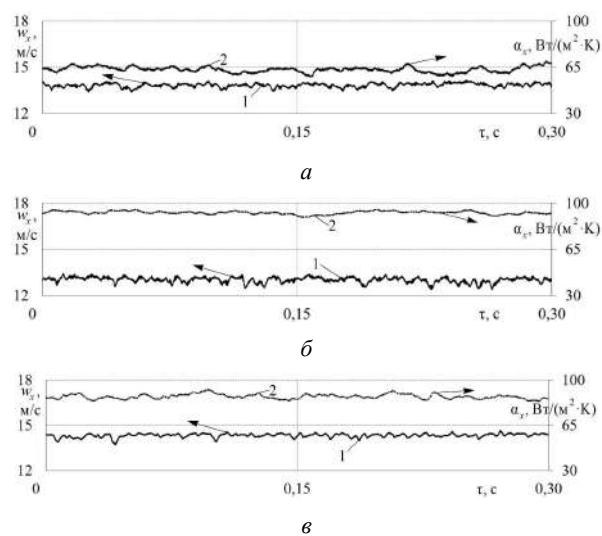


Рис. 3. Изменение местной скорости w_x (1) и локального КТО α_x (2) стационарных потоков воздуха во времени τ во впускной системе с разными конструкциями головки цилиндров для примерно одинаковой средней скорости в трубе: а – базовая конструкция ($w = 13,9$ м/с); б – квадратный клапан ($w = 13$ м/с); в – квадратный клапан и канал ($w = 14,3$ м/с)

Выявлено, что применение альтернативных конструкций головки цилиндров также вызывает незначительные визуальные изменения в функции $\alpha_x = f(\tau)$. Показано, что применение квадратного клапана и канала вызывает некоторое сглаживание функции $\alpha_x = f(\tau)$, т.е. уменьшение количества флуктуаций α_x во времени. При этом, имеет место заметная интенсификация теплоотдачи во впускной трубе при использовании модернизированных головок цилиндров. Для базовой конфигурации среднее значения КТО α во впускной трубе составляет около 65 Вт/(м²×К), а для новых конструкций головок α достигает 90 Вт/(м²×К). С прикладной точки зрения, интенсификация теплоотдачи может привести к некоторому подогреву воздуха в процессе впуска, что может положительно сказаться на испарении топлива и повышении качества перемешивания топлива и воздуха в цилиндре ПДВС.

Установлено, что увеличение средней скорости потока в трубе (до $w \approx 32$ м/с) вызывает заметный рост колебаний скорости потока воздуха (рис. 4). Основные тенденции изменения w_x во впускной системе с разными конструкциями головок цилиндров сохраняются при увеличении расхода воздуха (средняя скорость в трубе около 32 м/с). Так, применение модернизированных

конструкций головок цилиндров приводит к незначительному усилению колебаний скорости потока воздуха во впускной трубе по сравнению с базовой конфигурацией. Рост колебательных явлений в трубе может быть связан с формированием вторичных и вихревых структур во впускной системе с профилированным каналом и клапаном в головке цилиндров.

Следует отметить, изменение тенденции в закономерностях $\alpha_x = f(\tau)$ при использовании альтернативных конструкций головок цилиндров для увеличенного расхода воздуха через впускную систему (сравнение рис. 3 и 4). В данном случае ($w \approx 32$ м/с), применение квадратного клапана и канала вызвало формирование заметных колебаний α_x во впускной трубе. При этом, также имеет место существенная интенсификация теплоотдачи во впускной трубе (рост α от 115 Вт/(м²×К) для базовой конструкции до почти 200 Вт/(м²×К) для модернизированной конфигурации).

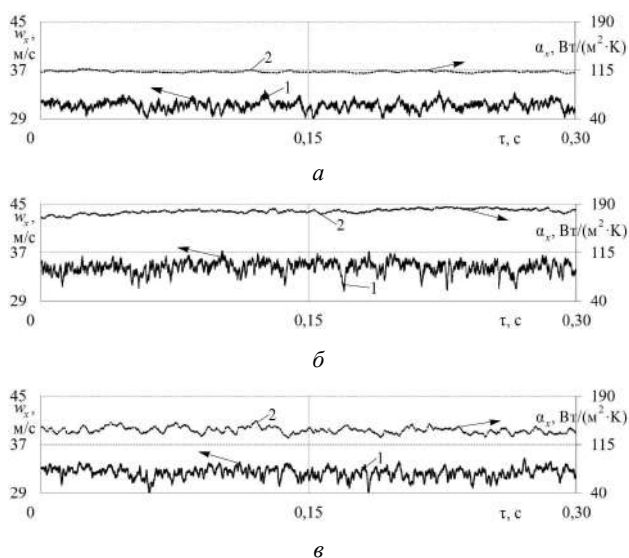


Рис. 4. Изменение местной скорости w_x (1) и локального КТО α_x (2) стационарных потоков воздуха во времени τ во впускной системе с разными конструкциями головки цилиндров для примерно одинаковой средней скорости в трубе: а – базовая конструкция ($w = 31,2$ м/с); б – квадратный клапан ($w = 34,6$ м/с); в – квадратный клапан и канал ($w = 32,4$ м/с)

Была рассчитана степень турбулентности Tu для стационарного потока воздуха во впускной трубе для трех конструкций головки цилиндров (рис. 5).

Установлено, что применение во впускной системе модернизированных головок цилиндров вызывает рост Tu в среднем на 13,5 % по срав-

нению с базовой конфигурацией. Увеличение Tu можно объяснить двумя факторами: (1) повышением гидравлического сопротивления системы и (2) формированием вторичных течений в системе из-за профилированного канала и тарельчатого клапана.

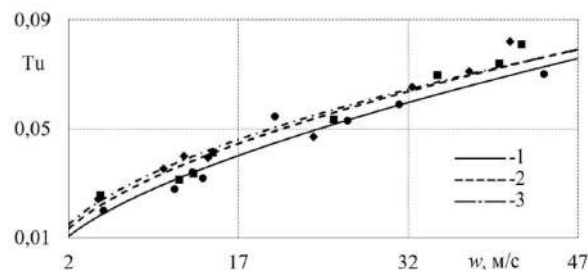


Рис. 5. Зависимости степени турбулентности Tu в трубе от средней скорости потока воздуха w при использовании разных конструкций головки цилиндров: 1 – базовая конструкция; 2 – квадратный клапан; 3 – квадратный клапан и канал

Дополнительно проводилась оценка значений Tu в цилиндре двигателя для впускных систем с разными конструкциями головки цилиндров (рис. 6). Для этого чувствительный элемент датчика термоанемометра располагался в центре (на оси) цилиндра на расстоянии 11,5 мм от верхней плоскости (под впускным клапаном). Выявлено, что имеет место сохранение тенденции увеличения числа турбулентности Tu потока в цилиндре при использовании модернизированных головок цилиндров во впускной системе (рис. 6). В данном случае (в цилиндре) наблюдается рост Tu в среднем на 19,3 % для новых конфигураций головок цилиндров по сравнению с базовой конструкцией. Соответственно, турбулизация потока в цилиндре несколько усилилась по сравнению с впускной трубой при использовании новых конструкций (рост Tu в трубе был 13,5 %, а в цилиндре рост Tu составил 19,3 %).

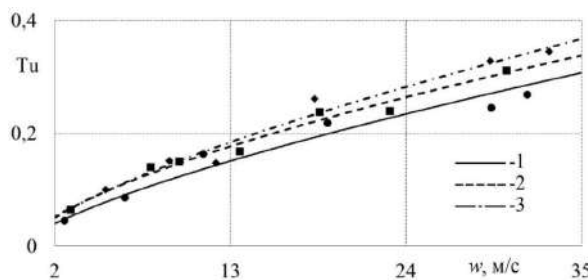


Рис. 6. Зависимости степени турбулентности Tu потока в цилиндре от w при использовании разных конструкций головки цилиндров: 1 – базовая конструкция; 2 – квадратный клапан; 3 – квадратный клапан и канал

Турбулизация потока в цилиндре может иметь положительный эффект в виде улучшения перемешивания топлива и воздуха и получения однородного рабочего тела. Это потенциально повысит качество и полноту сгорания топливно-воздушной смеси в ПДВС. Соответственно, можно ожидать улучшения технико-экономических и экологических показателей поршневого двигателя.

Влияние модернизации конструкции головки цилиндров на интенсивность теплоотдачи во впускной трубе показано на рис. 7.

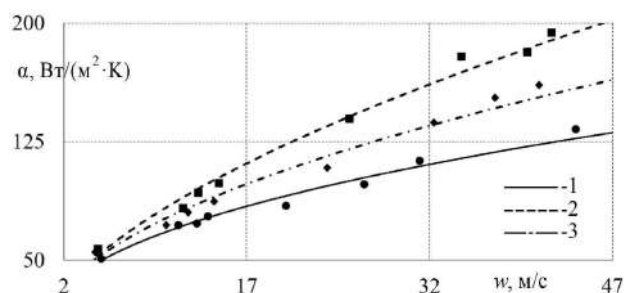


Рис. 7. Зависимость КТО α в трубе от средней скорости потока воздуха w при использовании разных конструкций головки цилиндров: 1 – базовая конструкция; 2 – квадратный клапан; 3 – квадратный клапан и канал

Установлено, что применение модернизированных конструкций головок цилиндров вызывает рост КТО α во впускной трубе в среднем на 15–27 % по сравнению с базовой конфигурацией системы (рис. 7). Так, использование квадратного впускного клапана в головке цилиндров приводит к увеличению α на 10–39 % в сравнении с базовой конструкцией, а установка головки цилиндров с квадратным клапаном и квадратным каналом вызывает рост α на 7–28 %. Следует отметить, что в данном случае выполняется классическая закономерность, что рост числа турбулентности приводит к увеличению КТО.

Интенсификация теплоотдачи во впускной системе обычно оказывает положительное влияние на процессы испарения, перемешивания, смесеобразования и сгорания в поршневых двигателях [22]. Потенциально это может привести к росту удельной мощности, снижению удельного расхода топлива и улучшению экологичности отработавших газов ПДВС.

Закономерность интенсификации теплоотдачи во впускной трубе при использовании модернизированных головок цилиндров сохраняется

при переходе от функции $\alpha = f(w)$ к безразмерным показателям Nu (число Нуссельта) и Re (число Рейнольдса) (рис. 8).

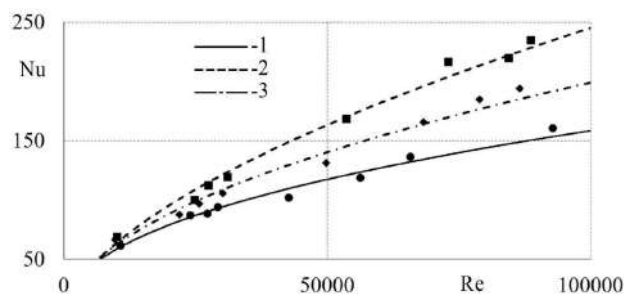


Рис. 8. Зависимость числа Нуссельта Nu в трубе от числа Рейнольдса Re при использовании разных конструкций головки цилиндров: 1 – базовая конструкция; 2 – квадратный клапан; 3 – квадратный клапан и канал

Установлено, что рост Nu во впускной трубе составляет в среднем 15–30 % при использовании новых конструкций головок цилиндров по сравнению с базовой конфигурацией впускной системы.

Заключение

Основные выводы данного исследования состоят в следующем:

1. Создана экспериментальная установка, приборная база и методика исследования газодинамики и теплообмена стационарных потоков воздуха во впускной системе с оригинальными конструкциями головки цилиндров;
2. Получены новые экспериментальные данные об изменении w_x и α_x потока в разных модификациях впускной системы применительно к ПДВС; рассчитана степень турбулентности Ti и определена интенсивность теплоотдачи в исследуемых конфигурациях системы;
3. Установлено, что применение квадратного клапана и квадратного канала в головке цилиндров вызывает рост Ti потока в среднем на 13,5 %; выявлено, что увеличение Ti в цилиндре составляет около 19 % при установке модернизированных конструкций головки цилиндров;
4. Показано, что имеет место интенсификация теплоотдачи во впускной трубе на 10–40 % при установке во впускную систему модернизированных конструкций головки цилиндров;
5. Представлена закономерность изменения уровня теплоотдачи во впускной трубе в безразмерном виде $Nu = f(Re)$ для всех исследованных

конфигураций впускной системы; подтверждена интенсификация теплоотдачи;

6. Обсуждались прикладные вопросы роста числа турбулентности и интенсификации теплоотдачи стационарного потока воздуха во впускной системе применительно к поршневым двигателям.

Дальнейшее направление исследований может быть связано с исследованием предлагаемых конструкций головки цилиндров для пульсирующих потоков воздуха (т.е. с вращающимся распределителем и открытием / закрытием впускного клапана).

Список источников

1. Druzhinin A.M. Piston Engines of the New Generation (Without turbo supercharging). Ekaterinburg: Ridero, 2018. 130 p.
2. Breeze P. Piston Engine-Based Power Plants. USA: Academic Press, 2017. 95 p.
3. Harazi M.F.A., Hairuddin A.A., As'array A. et al. Effects of Different Throttle Opening and Air Intake Lengths on the Volumetric Efficiency of SI Engine Using 1D Simulation Method // Pertanika Journal of Science and Technology. 2024. Vol. 32. № 4. pp. 1481–1500.
4. Hemanandh J., Ganesan S., Rangabashiam D. et al. Robust design approach for intake manifold of the 1 litre turbo charger intercooler diesel engines // International Journal of Ambient Energy. 2020. Vol. 41. № 11. pp. 1214–1226.
5. Ali M.H.A., Razlan Z.M., Bakar S.A. et al. Impact of Intake Manifold Geometry on Power and Torque: A Simulation-Based Study // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2025. Vol. 128. № 1. pp. 169–180.
6. Плотников Л.В., Комаров О.В., Недошивина Т.А. и др. 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. 241–249.
7. Demir U., Cetinkaya O., Turkmen A.C. et al. Experimental Investigation of Intake Manifold Design Effect on Diesel Engine Performance // International Journal of Automotive Science and Technology. 2022. Vol. 6. № 2. pp. 127–134.
8. Luong G.H., Vo C.T., Hoang D.N. Impact of Helical Intake Manifold Geometries on Swirl Generation in Cylinder of Small Diesel Engine // Mechanisms and Machine Science. 2025. Vol. 177. pp. 104–113.
9. Wang G., Yu W., Li X. et al. Influence of fuel injection and intake port on combustion characteristics of controllable intake swirl diesel engine // Fuel. 2020. Vol. 262.
10. Dziubak T., Karczewski M. Experimental Study of the Effect of Air Filter Pressure Drop on Internal Combustion Engine Performance // Energies. 2022. Vol. 15. № 9.
11. Pranoto S., Ubaidillah, Lenggana B.W. et al. Fluid Flow Analysis at Single and Dual Plenum Intake Manifolds to Reduce Pressure Drops Using Computational Approach // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2022. Vol. 97. № 1. DOI: 10.37934/arfmts.97.1.112
12. Pahmi A., Hisyam Basri M., Mustaffa M.E. et al. Intake pressure and brake mean effective pressure analysis on various intake manifold design // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1349. № 1.
13. Popov I.A., Zhukova Y.V., Gureev V.M. et al. Numerical Simulation of Air Intake of Aviation Piston Engines // Russian Aeronautics. 2024. Vol. 67. № 3. pp. 625–633.
14. Saaidia R., Ghriss O., Koten H. et al. Effects of intake manifold geometry in H2 & CNG fueled engine Combustion // Journal of Thermal Engineering. 2024. Vol. 10. № 1. pp. 153–163.
15. Zhang J., Wang S., Wang Z. et al. Investigation of intake and exhaust performance in heavy-duty diesel engines with variable Miller cycle // Applied Thermal Engineering. 2025. Vol. 265.
16. Galambos S.L., Nikolic N.M., Ruxic D.A. et al. An Approach To Computational Fluid Dynamic Air-Flow Simulation In The Internal Combustion Engine Intake Manifold // Thermal Science. 2020. Vol. 24(1A). pp. 127–136.
17. Wang C., Wei M., Li B. et al. Study and analysis of intake and exhaust system of electric turbocharged aviation piston engine // Journal of Aerospace Power. 2025. Vol. 40. № 2.
18. Kim Y.-J., Yoon A.-S., Lee C.-E. Validation of CFD Analysis on Flow and Combustion Characteristics for a GP3 Rotary Engine // Energies. 2025. Vol. 18. № 4.
19. Плотников Л.В., Плотников О.А., Сергеев Г.Д. Влияние диаметра впускного коллектора на нестационарную газодинамику и теплоотдачу пульсирующих потоков применительно к поршневому двигателю // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 3. С. 130–139.
20. Plotnikov L.V. Gas dynamics and heat exchange of stationary and pulsating air flows during cylinder filling process through different configurations of the cylinder head channel (applicable to piston engines) // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 233.
21. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L. et al. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines // Sensors. 2022. Vol. 22. № 17.
22. Arabkhalaj A., Verwey C., Birouk M. Experimental study of butanol droplet combustion in a turbulent, elevated-pressure environment // Combustion and Flame. 2025. Vol. 276.

References

1. Druzhinin AM. Piston Engines of the New Generation (Without turbo supercharging). Ekaterinburg: Ridero; 2018. 130 p.
2. Breeze P. Piston Engine-Based Power Plants. USA: Academic Press; 2017. 95 p.

3. Harazi MFA, Hairuddin AA, As'array A et al. Effects of Different Throttle Opening and Air Intake Lengths on the Volumetric Efficiency of SI Engine Using 1D Simulation Method. *Pertanika Journal of Science and Technology*. 2024;32(4):1481–1500.
4. Hemanandh J, Ganesan S, Rangabashiam D et al. Robust design approach for intake manifold of the 1 litre turbo charger intercooler diesel engines. *International Journal of Ambient Energy*. 2020;41(11):1214–1226.
5. Ali MHA, Razlan ZM, Bakar SA et al. Impact of Intake Manifold Geometry on Power and Torque: A Simulation-Based Study. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2025;128(1):169–180.
6. Plotnikov LV, Komarov OV, Nedoshivina TA et al. 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; 16(5):241–249. (In Russ.).
7. Demir U, Cetinkaya O, Turkmen AC et al. Experimental Investigation of Intake Manifold Design Effect on Diesel Engine Performance. *International Journal of Automotive Science and Technology*. 2022;6(2):127–134.
8. Luong GH, Vo CT, Hoang DN. Impact of Helical Intake Manifold Geometries on Swirl Generation in Cylinder of Small Diesel Engine. *Mechanisms and Machine Science*. 2025;177:104–113.
9. Wang G, Yu W, Li X et al. Influence of fuel injection and intake port on combustion characteristics of controllable intake swirl diesel engine. *Fuel*. 2020;262.
10. Dziubak T., Karczewski M. Experimental Study of the Effect of Air Filter Pressure Drop on Internal Combustion Engine Performance. *Energies*. 2022;15(9).
11. Pranoto S, Ubaidillah, Lenggana BW et al. Fluid Flow Analysis at Single and Dual Plenum Intake Manifolds to Reduce Pressure Drops Using Computational Approach. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2022;97(1). DOI: 10.37934/arfmts.97.1.112
12. Pahmi A, Hisyam Basri M, Mustaffa ME et al. Intake pressure and brake mean effective pressure analysis on various intake manifold design. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1349(1).
13. Popov IA, Zhukova YV, Gureev VM et al. Numerical Simulation of Air Intake of Aviation Piston Engines. *Russian Aeronautics*. 2024;67(3):625–633.
14. Saaidia R, Ghriss O, Koten H et al. Effects of intake manifold geometry in H2 & CNG fueled engine Combustion. *Journal of Thermal Engineering*. 2024;10(1): 153–163.
15. Zhang J, Wang S, Wang Z et al. Investigation of intake and exhaust performance in heavy-duty diesel engines with variable Miller cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2025;265.
16. Galambos SL, Nikolic NM, Ruxic DA et al. An Approach To Computational Fluid Dynamic Air-Flow Simulation In The Internal Combustion Engine Intake Manifold. *Thermal Science*. 2020;24(1A):127–136.
17. Wang C, Wei M, Li B et al. Study and analysis of intake and exhaust system of electric turbocharged aviation piston engine. *Journal of Aerospace Power*. 2025;40(2).
18. Kim Y.-J., Yoon A.-S., Lee C.-E. Validation of CFD Analysis on Flow and Combustion Characteristics for a GP3 Rotary Engine. *Energies*. 2025;18(4).
19. Plotnikov LV, Plotnikov OA, Sergeev GD. The influence of the intake manifold diameter on non-stationary gas dynamics and heat transfer of pulsating flows as applied to a piston engine. *Thermal processes in engineering*. 2025;17(3):130–139. (In Russ.).
20. Plotnikov LV. Gas dynamics and heat exchange of stationary and pulsating air flows during cylinder filling process through different configurations of the cylinder head channel (applicable to piston engines). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024;233.
21. Plotnikov L, Plotnikov I, Osipov L et al. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines. *Sensors*. 2022;22(17).
23. Arabkhalaj A., Verwey C., Birouk M. Experimental study of butanol droplet combustion in a turbulent, elevated-pressure environment. *Combustion and Flame*. 2025;276.