

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 3. С. 130–139
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 130–139

Научная статья
УДК 62-144.3
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185059>
EDN: <https://www.elibrary.ru/VASIJN>

Влияние диаметра впускного коллектора на нестационарную газодинамику и теплоотдачу пульсирующих потоков применительно к поршневому двигателю

Л.В. Плотников^{1✉}, О.А. Плотников², Г.Д. Сергеев³

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

¹leonplot@mail.ru[✉]

Аннотация. В статье рассматривается влияние внутреннего диаметра коллектора на степень турбулентности потока Tu , расход воздуха и коэффициент теплоотдачи пульсирующих потоков воздуха во впускной системе поршневого двигателя. Установлено, что увеличение диаметра коллектора (с 26 мм до 40 мм) вызывает снижение степени турбулентности в 1,4–2,2 раза (с $Tu = 0,26–0,4$ до $Tu = 0,12–0,25$) во впускной системе. Показано, что расход воздуха через впускную систему возрастает на 5–28 % при увеличении диаметра коллектора с 26 мм до 40 мм. Представлены данные о влиянии диаметра коллектора на интенсивность теплоотдачи во впускной системе от частоты вращения коленвала и средней скорости потока. Получены зависимости изменения числа Нуссельта от числа Рейнольдса пульсирующих потоков во впускной системе с коллекторами разного диаметра.

Ключевые слова: поршневой двигатель, процесс впуска, диаметр коллектора, нестационарная аэродинамика, степень турбулентности, теплоотдача, расход воздуха

Финансирование: Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 25-19-00001.

Для цитирования. 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. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185059>

Original article

The influence of the intake manifold diameter on non-stationary gas dynamics and heat transfer of pulsating flows as applied to a piston engine

L.V. Plotnikov^{1✉}, O.A. Plotnikov², G.D. Sergeev³

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

¹leonplot@mail.ru✉

Abstract. Improving the design of the main systems of piston engines remains an urgent task in order to improve their technological and environmental performance. The article examines the influence of the internal diameter of the manifold on the flow turbulence number Tu , air flow rate and heat transfer coefficient of pulsating air flows in the intake system of a piston engine based on laboratory experiments. The stand, features of the experiments and the measuring system are described in the article. The thermal anemometry method was used to obtain data on the local air flow velocity and the local heat transfer coefficient in the intake manifold. Three designs of manifolds with internal diameters of 26 mm, 32 mm (base) and 40 mm were studied. The average velocity of the pulsating air flow in the manifolds was from 5,5 to 40 m/s. Flow pulsations ranged from 5 Hz to 25 Hz (the engine crankshaft rotation frequency varied in the range from 600 rpm to 3000 rpm). It was shown that the size of the manifold diameter has a significant effect on the gas-dynamic and heat-exchange characteristics of the flows in the engine intake system. It is established that an increase in the manifold diameter (from 26 mm to 40 mm) causes a decrease in the turbulence number by 1,4–2,2 times (from $Tu = 0,26–0,4$ to $Tu = 0,12–0,25$) in the intake system. It is shown that air consumption through the intake system increases by 5–28 % with an increase in the manifold diameter from 26 mm to 40 mm. Data on the influence of the manifold diameter on the heat transfer intensity in the intake system from the crankshaft speed and the average flow velocity are presented. The difference of the change in the Nusselt number on the Reynolds number of pulsating flows in the intake system with manifolds of different diameters are obtained. The obtained data on gas dynamics and heat exchange of pulsating gas flows in intake systems can be useful for improving the quality of mathematical models and developing efficient and accurate control systems for gas exchange processes in piston engines.

Keywords: piston engine, intake process, manifold diameter, non-stationary gas dynamics, turbulence number, heat transfer, air consumption

Funding: The work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 25-19-00001).

For citation. Plotnikov L.V., Plotnikov O.A., Sergeev G.D. 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, vol. 17, no. 3, pp. 130–139. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185059>

Введение

Улучшение технических, экономических и экологических характеристик поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) остается актуальной задачей для развития экономики многих отраслей (энергетика, машиностроение, транс-

порт и другие). [1]. Известно, что процесс заполнения цилиндра рабочим телом (такт впуска) во многом определяет эксплуатационные показатели ПДВС [2, 3]. Соответственно, для разработки эффективных и точных систем управления процессами газообмена необходимы досто-

верные экспериментальные данные о газодинамике и теплообмене пульсирующих потоков газа в газоздушных коллекторах разных геометрических размеров.

Рассмотрим современные результаты научных исследований других авторов, связанных с газодинамикой и теплообменом потоков в системах газообмена ПДВС. Одно из научных направлений связано с детализацией данных о физических процессах в системах газообмена. Например, Zhang S. с соавторами исследовали влияние рециркуляции отработавших газов на газодинамику потока во впускном коллекторе (ВпКол) и цилиндре двигателя с помощью численного моделирования [4]. Авторы установили закономерности между скоростью рециркуляции отработавших газов, скоростью сгорания топливно-воздушной смеси и количеством выбросов NOx. Важность учета газодинамических характеристик потока во впускной системе на процессы смесеобразования и сгорания топлива в цилиндре двигателя также показана в [5]. Известно, что учет нестационарности процессов в системе газообмена необходим для более точного прогнозирования показателей двигателя и более эффективной работы системы турбонаддува [6, 7].

Отдельные научные исследования посвящены влиянию начального давления во ВпКол на газодинамику потоков и показатели двигателя [8–10]. Liu Z. и др. установили, что подъем двигателя на высоту 2000 м привел к увеличению потерь тепла и соответствующему снижению КПД на 2 % [8]. Ma F. с соавторами определили оптимальные настройки фаз газораспределения для различных физических параметров на впуске и выпуске [9]. Mazuro P. и Kozak D. сделали упор на внутрицилиндровых параметрах авиационного ПДВС и надежности его деталей и узлов [10].

Также существует большое количество научных работ, связанных совершенствованием конструкции систем газообмена поршневых двигателей [11–13]. Так, Wang T. и др. разработали специальный управляемый клапан для впускной системы, с помощью которого существовала возможность изменять газодинамические характеристики потоков в цилиндре двигателя [11]. Это способствовало созданию вихревых структур, изменению интенсивности турбулентности и структуры потока в цилиндре для улучшения процес-

сов смесеобразования и сгорания. Shah S.S. с соавторами осуществляли доводку геометрических размеров (диаметра и длины) бензинового двигателя с целью получения максимальной мощности [12]. Установлено, что оптимизация конфигурации впускной системы приводит к увеличению крутящего момента вплоть до 41 % и одновременному снижению удельного расхода топлива в пределах 8 % для частоты вращения коленчатого вала равной 1200 мин⁻¹.

Последние годы активно развивается научное направление, связанное с разработкой высокоточных систем управления двигателем с учетом особенностей протекания процессов газообмена на основе математических моделей, машинного обучения и методов искусственного интеллекта. Song Y. и др. создали математическое описание многокритериальной оптимизации газодинамики потоков и геометрии впускных и выпускных каналов в головке блока двигателя с использованием методов машинного обучения, в которой были уточнены конструкторские ограничения и граничные условия переменных параметров потоков в системе газообмена и цилиндре ПДВС [13]. Более того, ученые и специалисты все чаще обращаются к искусственным нейронным сетям для снижения количества вредных веществ в отработавших газах двигателей [14], для оптимизации закона впрыска топлива в цилиндр для разных режимов работы ПДВС [15] и для решения других технических задач. Установлено, что такая оптимизация процессов способствует снижению выбросов NOx до 30 % и одновременному росту КПД поршневого двигателя до 2 % [16].

Таким образом, цель данной работы состояла в оценке влияния диаметра коллектора на газодинамические, расходные и теплообменные характеристики пульсирующих потоков воздуха во впускной системе поршневого двигателя на основе лабораторных опытов.

Исследовательский стенд и измерительная аппаратура

В данной работе был выбран экспериментальный подход к получению данных о газодинамике и теплообмене пульсирующих потоков во впускной системе с коллекторами разного диаметра. Был разработан лабораторный стенд

представляющий собой динамическую натурную модель одноцилиндрового ПДВС (рис. 1).

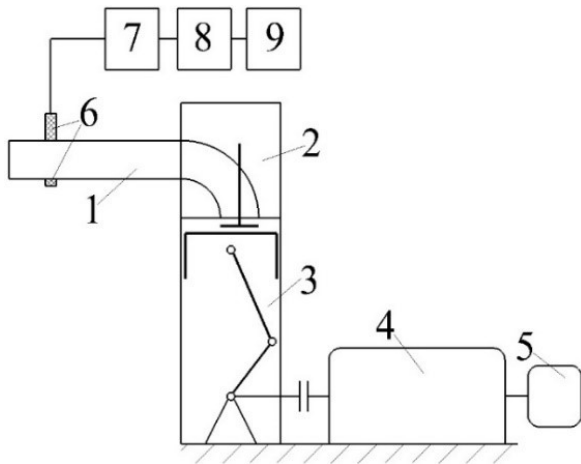


Рис. 1. Схема испытательного стенда модели ПДВС и измерительные приборы: 1 – впускной коллектор; 2 – головка блока; 3 – цилиндропоршневая группа ПДВС; 4 – электродвигатель; 5 – частотный преобразователь; 6 – датчики термоанемометра (каналы w_x и α_x); 7 – термоанемометр; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – компьютер

Модель поршневого двигателя имела все основные детали и узлы, характерные для ПДВС (кривошипно-шатунный механизм, цилиндропоршневая группа, головка блока, механизм газораспределения, впускная и выпускная системы). Прототипом для модели служил автомобильный двигатель компании ВАЗ-ОКА. Основными геометрическими размерами являлись диаметр цилиндра – 82 мм, ход поршня – 71 мм, внутренний диаметр ВпКол – 32 мм, диаметр выпускного коллектора – 30 мм, высота подъема клапана – 9 мм, общая длина впускной системы – 400 мм. Исследуемый участок впускной системы с указанием основных элементов, геометрических размеров и измерительных датчиков представлен на рис. 2.

Особенность функционирования модели поршневого двигателя состояла в том, что в ней отсутствовала топливная система. Соответственно, сгорание топлива в цилиндре не осуществлялось. Привод коленчатого вала модели двигателя осуществлялся с помощью электродвигателя и системы управления на базе частотного преобразователя фирмы Schneider Electric. Частота вращения коленчатого вала изменялась в диапазоне от 600 мин^{-1} до 2800 мин^{-1} . Поддержание заданной частоты вращения осуществлялось с точностью $\pm 1,0 \%$ от текущего значения.

Фазы газораспределения (время открытия и закрытия впускных и выпускных клапанов) соответствовали таковым для двигателя-прототипа и оставались неизменными в ходе проведения опытов. Соответственно, источником пульсирующего движения воздуха во впускной системе являлось разрежение в цилиндре, создаваемое поршнем, перемещающимся от верхней мертвой точки к нижней мертвой точке.

Рабочей средой в экспериментах был воздух с температурой $t = 21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ и барометрическим давлением $p_o = 98 \pm 0,3 \text{ кПа}$.

В экспериментальных исследованиях применялись впускные коллекторы разных внутренних диаметров d (рис. 3). Базовое значение диаметра ВпКол равнялось $d = 32 \text{ мм}$. Дополнительно были изготовлены коллекторы с диаметрами $d = 26 \text{ мм}$ и $d = 40 \text{ мм}$ с помощью метода 3Д-печати. Внутренняя поверхность коллекторов имела среднюю шероховатость 6,3 мкм (технически гладкая поверхность). ВпКол имели технологические отверстия для измерительных датчиков на расстояниях 100 мм и 200 мм от окна в головке двигателя. Однако, основные результаты в статье приведены для одного измерительного сечения на расстоянии $l_x = 100 \text{ мм}$ с целью сохранения компактности изложения материала.

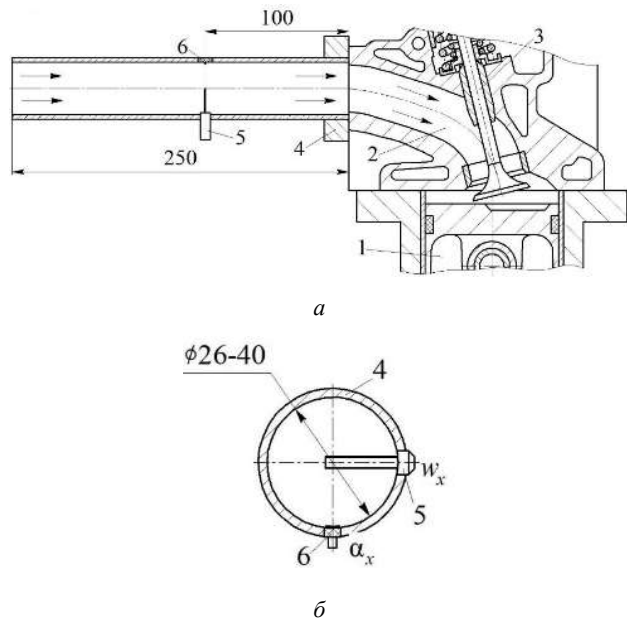


Рис. 2. Схема впускной системы (а) и поперечный разрез измерительного сечения в коллекторе (б): 1 – поршень; 2 – подводящий канал; 3 – головка блока ПДВС; 4 – впускной коллектор; 5 – датчик скорости (w_x); 6 – тепловой датчик (α_x)



Рис. 3. Фотографии исследуемых ВпКол с разными внутренними диаметрами d : 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм (базовая конфигурация); 3 – $d = 40$ мм

Метод тепловой анемометрии использовался для получения данных о местной скорости потока воздуха w_x и локальном коэффициенте теплоотдачи (КТО) α_x . Измерительная система была построена на базе термоанемометра постоянной температуры (Dantec Dynamics) и тепловых датчиков. Для определения w_x и α_x использовались разные типы датчиков в зависимости от расположения чувствительного элемента (рис. 2). Чувствительным элементом у обоих типов датчиков являлась нихромовая нить с диаметром 5 мкм и длиной 4–5 мм. В рабочем состоянии нить имела температуру около 120 °С. Данные с термоанемометра постоянной температуры поступали в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фирмы National Instruments, после чего передавались в компьютер для дальнейшей обработки в специализированном программном обеспечении. Быстродействие АЦП, теплового датчика и термоанемометра было выбрано с учетом временного периода процесса впуска и с учетом частоты пульсаций потока воздуха во ВпКол.

Относительная неопределенность измерения местной скорости потока воздуха составляла $\pm 2,6$ %, локального КТО равнялась $\pm 5,7$ %. Описание приборно-измерительной базы и методики определения w_x и α_x более подробно представлены в авторских статьях [3, 17].

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Изменение скорости пульсирующего потока во времени для впускных систем с коллекторами с разными диаметрами и при разных частотах вращения коленчатого вала были получены в данном исследовании (рис. 4).

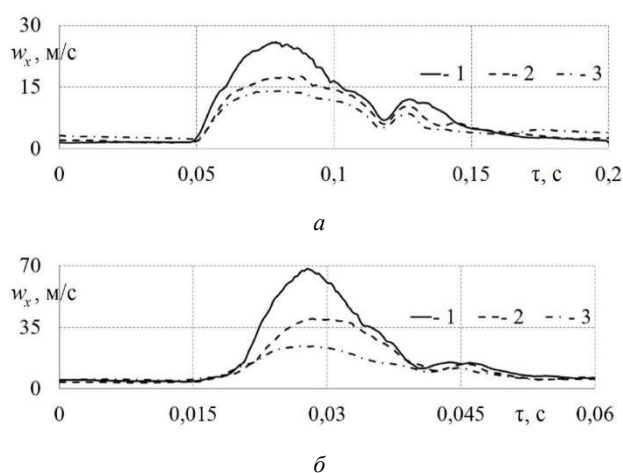


Рис. 4. Изменение местной ($l_x = 100$ мм) скорости потока воздуха во впускной системе от времени τ для частот вращения коленвала 600 мин⁻¹ (а) и 1800 мин⁻¹ (б) при разных диаметрах ВпКол: 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм; 3 – $d = 40$ мм

Из рис. 4 видно, что увеличение диаметра ВпКол приводит к падению максимальной скорости во впускной системе (это характерно для всех исследуемых частот вращения коленвала. Также существует второй всплеск скорости после основного пика при закрытом впускном клапане. При этом, второй пик имеет заметно меньшую амплитуду при использовании коллектора с диаметром 40 мм. Это указывает на сглаживание пульсаций скорости во ВпКол за счет увеличения объема системы. Сглаживание пульсаций скорости во впускной системе косвенно свидетельствует о снижении гидравлического сопротивления ВпКол и потенциально должно оказать положительное влияние на эксплуатационные показатели двигателя в виде роста удельной мощности.

Представленные наборы данных могут быть полезными для верификации математических моделей, машинного обучения и настройки систем управления на базе нейронных сетей и алгоритмов искусственного интеллекта.

Дополнительный анализ функций $w_x = f(\tau)$ позволил определить, что для исследуемых конфигураций впускных систем число Струхала Sh находилось в диапазоне от 0,2 до 0,25, а величина относительных пульсаций изменялась от 2,5 до 3,0. Соответственно, режим течения для пульсирующих потоков воздуха во впускной системе исследуемого поршневого двигателя классифицируется как среднечастотный [18]. Это свиде-

тельствует о том, что газодинамическая нестационарность оказывает существенное влияние на структуру потока и пограничный слой. Поэтому можно ожидать значимых изменений в теплообменных характеристиках пульсирующих потоков во впускной системе с коллекторами с разными диаметрами.

Первичные экспериментальные данные о локальной теплоотдаче в виде функций $\alpha_x = f(\tau)$ представлены на рис. 5 применительно к впускным системам с ВпКол с разными диаметрами и для разных частот вращения коленвала.

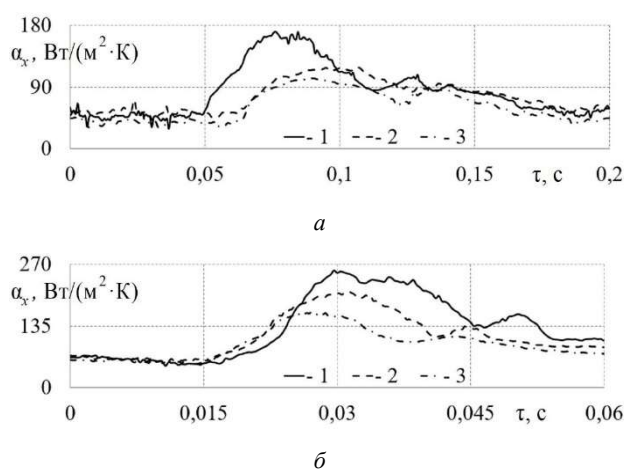


Рис. 5. Изменение локального ($l_x = 100$ мм) КТО α_x во впускной системе от времени τ для частот вращения коленвала 600 мин^{-1} (а) и 1800 мин^{-1} (б) при разных диаметрах ВпКол: 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм; 3 – $d = 40$ мм

Установлено, что увеличение диаметра ВпКол вызывает снижение максимальных значений локального КТО на 5–20 % по сравнению с базовой конфигурацией, что характерно для всех исследуемых частот вращения коленчатого вала. И наоборот, уменьшение диаметра коллектора приводит к существенному росту максимальных значений α_x на 10–30 % в сравнении с базовой геометрией впускной системы ПДВС. При низких частотах коленчатого вала на функции $\alpha_x = f(\tau)$ наблюдаются флуктуации локального КТО. Эти флуктуации существенно сглаживаются с ростом частоты вращения коленвала.

Интенсивность теплоотдачи во впускной системе оказывает влияние на величину подогрева рабочего тела в процессе впуска, на уровень тепловых напряжений в деталях, а в итоге на удельную мощность двигателя. Соответственно, правильный учет тепломеханических характери-

стик пульсирующих потоков во впускной системе позволит повысить точность математических моделей и инженерных расчетов, а также создать новые подходы к алгоритмам управления работой ПДВС на базе машинного обучения и искусственного интеллекта.

Для оценки пульсационной составляющей потока воздуха во впускной системе использовалась степень турбулентности Tu . При этом, для пульсирующего течения воздуха средняя скорость находилась с помощью фазового осреднения за полный цикл двигателя (для осреднения использовалось не менее 5 циклов). В результате была получена функция средней скорости потока воздуха во времени для пульсирующего потока воздуха во ВпКол, относительно которой и определялась пульсационная составляющая скорости. Методика определения Tu более подробно описана в статье [19].

Изменение степени турбулентности в зависимости от частоты вращения и средней скорости потока воздуха во впускных системах с коллекторами с разными диаметрами показано на рис. 6. Из рис. 6 видно, что изменение Tu для исследуемых конфигураций впускных систем находится в диапазоне от 0,1 до 0,45. С ростом частоты вращения коленвала или средней скорости потока в коллекторе значения степени турбулентности потока также возрастают. Противоположные закономерности были получены для выпускной системы ПДВС [20]. При этом, чем меньше диаметр ВпКол, тем больше значения интенсивности турбулентности. Это объясняется тем, что увеличение объема впускной системы сглаживает пульсации скорости потока воздуха.

Имеет место тенденция, что увеличение диаметра ВпКол с 26 мм до 32 мм вызывает снижение Tu в среднем в 2 раза; дальнейший рост диаметра коллектора с 32 мм до 40 мм приводит к дополнительному уменьшению Tu на 5–35 % во впускной системе (рис. 6).

Величина Tu оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление системы, на уровень теплообмена и на газодинамический шум пульсирующих течений. Поэтому необходимо учитывать степень турбулентности потоков в математических моделях, инженерных расчетах и эксплуатации ПДВС.

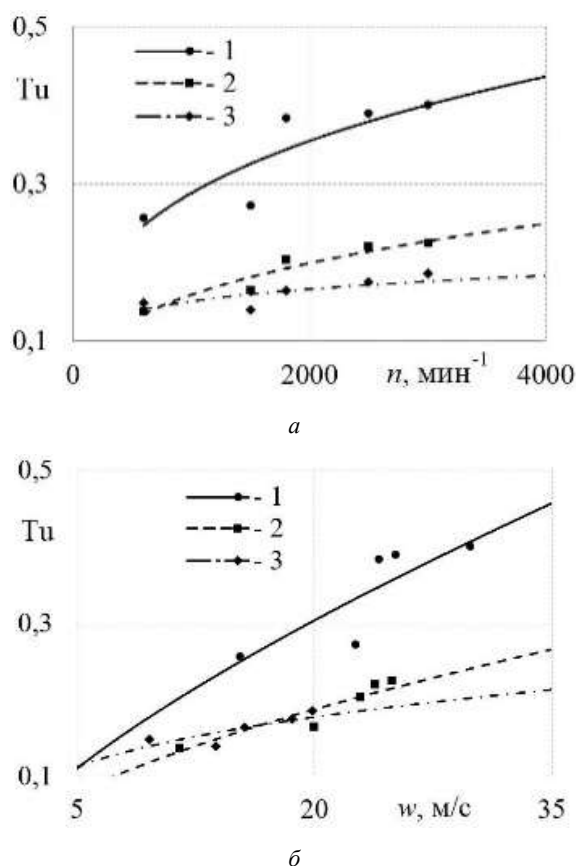


Рис. 6. Изменение степени турбулентности Tu потоков от частоты вращения коленвала n (а) и средней скорости потока w (б) во впускной системе с ВпКол разного диаметра: 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм; 3 – $d = 40$ мм

Расходные характеристики поршневого двигателя для впускной системы с ВпКол разного диаметра показаны на рис. 7.

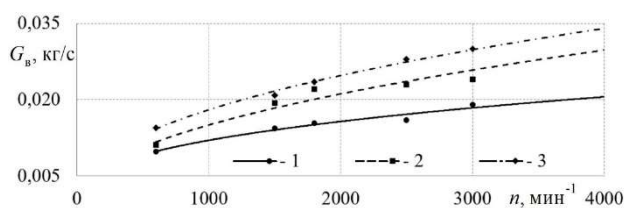


Рис. 7. Изменение массового расхода воздуха G_a от частоты вращения коленвала n через впускную систему с ВпКол разного диаметра: 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм; 3 – $d = 40$ мм

Установлено, что увеличение диаметра ВпКол приводит к росту расхода воздуха через впускную систему на 10–18 % по сравнению с базовой конфигурацией. Это объясняется тем, что рост диаметра коллектора приводит к увеличению площади проходного сечения впускной системы. Однако, следует отметить, что рост расходных характеристик через ВпКол не является

безграничным и сдерживается величиной проходного сечения клапанного узла в головке блока цилиндра. При этом, уменьшение диаметра ВпКол вызывает падение расходных характеристик через впускную систему на 5–27 % по сравнению с базовой конфигурацией.

Обобщенные данные о теплообмене в виде зависимостей осредненного КТО α во впускных системах разных конфигураций от частоты вращения коленвала и от времени представлены на рис. 8. Следует отметить, что осредненный КТО α определялся для одного измерительного сечения по 4 локальным данным, суммируемым в пределах процесса впуска (за период открытого впускного клапана).

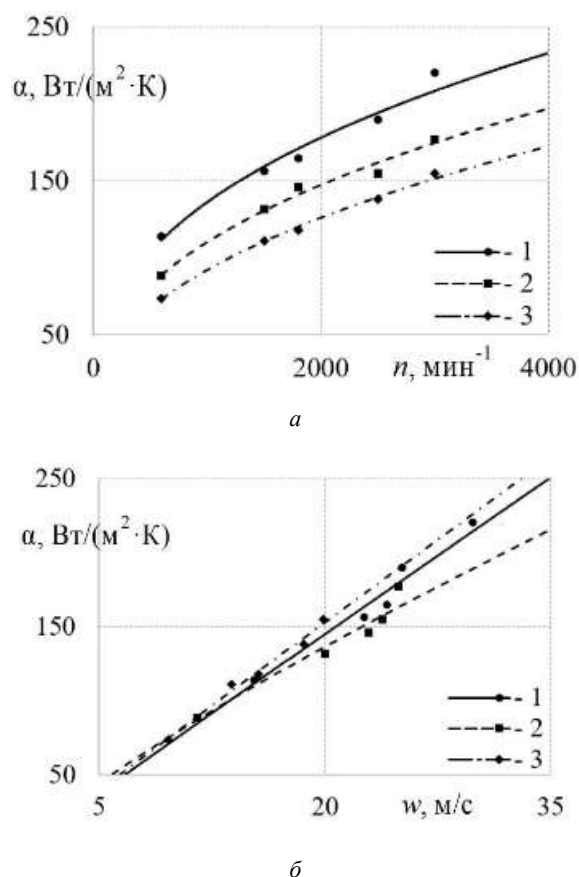


Рис. 8. Изменение осредненного КТО α от частоты вращения коленвала n (а) и средней скорости потока w (б) во впускной системе с ВпКол разного диаметра: 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм; 3 – $d = 40$ мм

Из рис. 8 а видно, что увеличение диаметра ВпКол вызывает снижение КТО на 11–19 % по сравнению с базовой конфигурацией системы. И наоборот, уменьшение диаметра коллектора приводит к росту α на 12–23 %. При этом, пред-

ставление данных об уровне теплоотдачи в виде функции $\alpha = f(w)$ существенно меняет физическую картину (рис. 8 б). В данном случае КТО для базовой впускной системы имеет наименьшие значения, а уменьшение или увеличение диаметра ВпКол приводит к росту α вплоть до 18 %. Таким образом, путем изменения конструкции впускной системы существует возможность управлять газодинамическими и теплообменными характеристиками пульсирующих потоков и оптимизировать показатели ПДВС в соответствии с режимом работы.

Интенсивность теплоотдачи во ВпКол поршневого двигателя оказывает влияние на величину подогрева рабочего тела, уровень тепловых напряжений, коэффициент наполнения и удельную мощность. Использование достоверных данных о КТО является важной составляющей при расчете и проектировании систем газообмена ПДВС.

Интегральные данные о теплоотдаче пульсирующих потоков воздуха во ВпКол в виде безразмерных функций $Nu = f(Re)$ представлены на рис. 9.

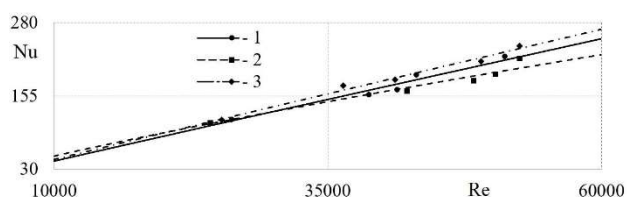


Рис. 9. Изменение числа Нуссельта Nu от числа Рейнольдса Re во впускной системе с ВпКол разного диаметра: 1 – $d = 26$ мм; 2 – $d = 32$ мм; 3 – $d = 40$ мм

Установлено, что значение числа Нуссельта для базовой впускной системы имеет наименьшие значения, а уменьшение или увеличение диаметра коллектора приводит к росту Nu вплоть до 18 %.

Заключение

В данной статье было изучено влияние внутреннего диаметра ВпКол на газодинамику, расходные характеристики и интенсивность теплоотдачи для пульсирующих потоков во впускной системе применительно к ПДВС (размерности 8,2/7,1) на основе лабораторных опытов и метода тепловой анемометрии.

Основные результаты исследования состоят в следующем:

1. Показано, что величина диаметра ВпКол оказывает существенное влияние на газодинамические и теплообменные характеристики потоков во впускной системе ПДВС.

2. Установлено, что увеличение диаметра ВпКол с 26 мм до 32 мм вызывает снижение Tu в среднем в 2 раза; дальнейший рост диаметра коллектора с 32 мм до 40 мм приводит к дополнительному уменьшению Tu на 5–35 % во впускной системе.

3. Выявлено, что рост внутреннего диаметра ВпКол (с 26 мм до 40 мм) улучшает расходные характеристики впускной системы вплоть до 28 %.

4. Проанализировано, что изменение газодинамических показателей потоков воздуха во впускной системе с ростом диаметра ВпКол связано с увеличением объема системы и, соответственно, стабилизацией течения, т.е. снижением амплитуд пульсаций скорости и давления потока воздуха.

5. Установлено, что увеличение диаметра коллектора с 32 мм до 40 мм приводит к росту числа Нуссельта во ВпКол в пределах 18 %, а уменьшение диаметра ВпКол с 32 мм до 26 мм, наоборот, вызывает подавление интенсивности теплоотдачи до 18 %.

6. Полученные данные о газодинамике и теплообмене пульсирующих потоков газа во впускных системах могут быть полезны для повышения точности математических моделей и разработки эффективных и точных систем управления процессами газообмена в ПДВС.

7. Направления дальнейших исследований заключаются в расширении граничных условий эксперимента (диаметр коллектора, частота вращения, размерность двигателя) и верификации лабораторных данных посредством испытаний на действующем ПДВС.

Список источников

1. Reitz R.D., Ogawa H., Payri R. et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine // International Journal of Engine Research. 2020. Vol. 21 (1). pp. 3–10.
2. Lumley J.L. Engines, An Introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 272 p.
3. 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.

4. Zhang S., Li Y., Wang S. et al. Experimental and numerical study the effect of EGR strategies on in-cylinder flow, combustion and emissions characteristics in a heavy-duty higher CR lean-burn NGSI engine coupled with detail combustion mechanism // *Fuel*. 2020. Vol. 276.
5. Zhao D., An Y., Pei Y. et al. Numerical study on the asymmetrical jets formation from active pre-chamber under super-lean combustion conditions // *Energy*. 2023. Vol. 262.
6. Yin S., Ni J., Fan H. et al. Study on Correction Method of Internal Joint Operation Curve Based on Unsteady Flow // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. Vol. 12(23).
7. Marelli S., Capobianco M., Zamboni G. Pulsating flow performance of a turbocharger compressor for automotive application // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2014. Vol. 45(1). pp. 158–165.
8. Liu Z., Liu J. Investigation of the Effect of Altitude on In-Cylinder Heat Transfer in Heavy-Duty Diesel Engines Based on an Empirical Model // *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2022. Vol. 144(11).
9. Ma F., Yang W., Wang Y. et al. Experimental research on scavenging process of opposed-piston two-stroke gasoline engine based on tracer gas method // *International Journal of Engine Research*. 2022. Vol. 23(12). pp. 1969–1980.
10. Mazuro P., Kozak D. Experimental investigation on the performance of the prototype of aircraft Opposed-Piston engine with various values of intake pressure // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 269.
11. Wang T., Li W., Jia M. et al. Large-eddy simulation of in-cylinder flow in a DISI engine with charge motion control valve: Proper orthogonal decomposition analysis and cyclic variation // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 75. pp. 561–574.
12. Shah S.S., Singh K., Martin L.J. et al. Design, Development, and Validation of an Intake System for an FSAE Racecar // *Green Energy and Technology*. 2023. pp. 401–413.
13. Song Y., Xu Y., Cheng X. et al. Using a Genetic Algorithm to Achieve Optimal Matching between PMEP and Diameter of Intake and Exhaust Throat of a High-Boost-Ratio Engine // *Energies*. 2022. Vol. 15(5).
14. Gordon D., Norouzi A., Blomeyer G. et al. Support vector machine based emissions modeling using particle swarm optimization for homogeneous charge compression ignition engine // *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24(2). pp. 536–551.
15. Shirvani S., Shirvani S., Jazayeri S.A. et al. Optimization of the exergy efficiency, exergy destruction, and engine noise index in an engine with two direct injectors using NSGA-II and artificial neural network // *International Journal of Engine Research*. 2023. Vol. 24(2). pp. 579–594.
16. Seo J., Park S. Optimizing model parameters of artificial neural networks to predict vehicle emissions // *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 294.
17. 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).
18. Grigoriev M.M., Kuz'min V.V., Fafurin A.V. Classification of pulsating turbulent flows // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. Vol. 59(5). pp. 725–735.
19. Plotnikov L.V. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine) // *Thermal Science*. 2022. Vol. 26(1A). pp. 365–376.
20. Плотников Л.В., Григорьев Н.И., Осипов Л.Е. и др. Тепломеханические характеристики стационарных и пульсирующих потоков газа вдоль длины выхлопной системы поршневого двигателя // *Тепловые процессы в технике*. 2022. Т. 14, № 8. С. 338–347.

References

1. Reitz RD, Ogawa H, Payri R et al. IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*, 2020;21(1):3–10.
2. Lumley JL. *Engines, An Introduction*. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. 272 p.
3. 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.
4. Zhang S, Li Y, Wang S et al. Experimental and numerical study the effect of EGR strategies on in-cylinder flow, combustion and emissions characteristics in a heavy-duty higher CR lean-burn NGSI engine coupled with detail combustion mechanism. *Fuel*. 2020;276.
5. Zhao D, An Y, Pei Y et al. Numerical study on the asymmetrical jets formation from active pre-chamber under super-lean combustion conditions. *Energy*. 2023; 262.
6. Yin S, Ni J, Fan H et al. Study on Correction Method of Internal Joint Operation Curve Based on Unsteady Flow. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022;12(23).
7. Marelli S, Capobianco M, Zamboni G. Pulsating flow performance of a turbocharger compressor for automotive application. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2014;45(1):158–165.
8. Liu Z, Liu J. Investigation of the Effect of Altitude on In-Cylinder Heat Transfer in Heavy-Duty Diesel Engines Based on an Empirical Model. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2022; 144(11).
9. Ma F, Yang W, Wang Y et al. Experimental research on scavenging process of opposed-piston two-stroke gasoline engine based on tracer gas method. *International Journal of Engine Research*. 2022;23(12):1969–1980.
10. Mazuro P, Kozak D. Experimental investigation on the performance of the prototype of aircraft Opposed-Piston engine with various values of intake pressure. *Energy Conversion and Management*. 2022;269.

11. Wang T, Li W, Jia M et al. Large-eddy simulation of in-cylinder flow in a DISI engine with charge motion control valve: Proper orthogonal decomposition analysis and cyclic variation. *Applied Thermal Engineering*. 2015;75: 561–574.
12. Shah SS, Singh K, Martin LJ et al. Design, Development, and Validation of an Intake System for an FSAE Racecar. *Green Energy and Technology*. 2023;401–413.
13. Song Y, Xu Y, Cheng X et al. Using a Genetic Algorithm to Achieve Optimal Matching between PMEP and Diameter of Intake and Exhaust Throat of a High-Boost-Ratio Engine. *Energies*. 2022;15(5).
14. Gordon D, Norouzi A, Blomeyer G et al. Support vector machine based emissions modeling using particle swarm optimization for homogeneous charge compression ignition engine. *International Journal of Engine Research*. 2023;24(2):536–551.
15. Shirvani S, Shirvani S, Jazayeri SA et al. Optimization of the exergy efficiency, exergy destruction, and engine noise index in an engine with two direct injectors using NSGA-II and artificial neural network. *International Journal of Engine Research*. 2023;24(2):579–594.
16. Seo J, Park S. Optimizing model parameters of artificial neural networks to predict vehicle emissions. *Atmospheric Environment*. 2023;294.
17. 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).
18. Grigoriev MM, Kuz'min VV, Fafurin AV. Classification of pulsating turbulent flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1990;59(5):725–735.
19. Plotnikov LV. Thermal-mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows in a gas-dynamic system (in relation to the exhaust system of an engine). *Thermal Science*. 2022;26(1A):365–376.
20. Plotnikov LV, Grigor'ev NI, Osipov LE et al. Thermal and mechanical characteristics of stationary and pulsating gas flows along the length of the exhaust system of a piston engine. *Thermal processes in engineering*. 2022; 14(8):338–347. (In Russ.).