

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 536.7

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-88-102

ГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН СТАЦИОНАРНЫХ И ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В КРУГЛОЙ И ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Плотников Л.В.¹, Осипов Л.Е.¹, Григорьев Н.И.^{1,2}, Пономарев Д.А.², Плотников О.А.¹

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

²ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург, Россия
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования определяется тем, что нестационарные газодинамические явления в трубопроводах сложной конфигурации широко распространены в теплообменном и энергетическом оборудовании. Поэтому изучение уровня теплоотдачи пульсирующих потоков воздуха в круглой и треугольной трубах при разной степени турбулентности является актуальной и значимой задачей для развития науки и технологий. ЦЕЛЬ. Оценить влияние газодинамической нестационарности (пульсаций потока) на степень турбулентности и интенсивность теплоотдачи потоков воздуха в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения. МЕТОДЫ. Исследования проводились на лабораторном стенде на основе метода тепловой анемометрии и автоматизированной системы сбора и обработки экспериментальных данных. В работе использовались прямолинейные круглая и треугольная трубы с одинаковыми площадями поперечного сечения. Пульсации потока от 3 до 15,8 Гц генерировались посредством вращающейся заслонки. Степень турбулентности пульсирующих потоков изменялась от 0,03 до 0,15 посредством установки стационарных плоских турбулизаторов. Рабочей средой был воздух с температурой $22 \pm 1^\circ\text{C}$ движущийся со скоростью от 5 до 75 м/с. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков воздуха с разным уровнем турбулизации в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлено, что наличие газодинамической нестационарности приводит к увеличению степени турбулентности на 47-72 % в круглой трубе и на 36-86 % в треугольной трубе. Наличие газодинамическая нестационарность вызывает интенсификацию теплоотдачи в круглой трубе на 26-35,5 % и на 24-36 % в треугольной трубе. Показано, что существенное увеличение степени турбулентности приводит к росту коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе на 11-16 % и, наоборот, снижению коэффициента теплоотдачи на 7-24 % в треугольной трубе. Полученные результаты могут найти применение при проектировании теплообменных аппаратов и систем газообмена в энергетических машинах, а также при создании устройств и аппаратов импульсного действия.

Ключевые слова: прямолинейная труба; круглое и треугольное поперечные сечения; стационарный и пульсирующий потоки; местная скорость; локальная и осредненная теплоотдача; степень турбулентности; частота пульсаций потока.

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

Для цитирования: Плотников Л.В., Осипов Л.Е., Григорьев Н.И., Пономарев Д.А., Плотников О.А. Газодинамика и теплообмен стационарных и пульсирующих потоков воздуха в круглой и треугольной прямолинейных трубопроводах при разной степени

GAS DYNAMICS AND HEAT TRANSFER OF STATIONARY AND PULSATING AIR FLOWS IN ROUND AND TRIANGULAR STRAIGHT PIPELINES AT DIFFERENT TURBULENCE DEGREES

Plotnikov L.V.¹, Osipov L.E.¹, Grigoriev N.I.^{1,2}, Ponomarev D.A.², Plotnikov O.A.¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

²Ural Diesel-Motor Plant LLC, Ekaterinburg, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, leonplot@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* of the study is determined by the fact that non-stationary gas-dynamic phenomena in pipelines of complex configuration are widespread in heat exchange and power equipment. Therefore, the study of the level of heat transfer of pulsating air flows in round and triangular pipes with different degrees of turbulence is an urgent and significant task for the development of science and technology. *THE PURPOSE.* The influence of gas-dynamic non-stationarity (flow pulsations) on the degree of turbulence and the intensity of heat transfer of air flows in straight pipes with different cross-sectional shapes had to be assessed. *METHODS.* The studies were conducted on a laboratory bench based on the thermal anemometry method and an automated system for collecting and processing experimental data. Rectilinear round and triangular pipes with identical cross-sectional areas were used in the work. Flow pulsations from 3 to 15.8 Hz were generated by means of a rotating damper. The degree of turbulence of pulsating flows varied from 0.03 to 0.15 by installing stationary flat turbulators. The working environment was air with a temperature of 22-24 °C moving at a speed of 5 to 75 m/s. *RESULTS.* Experimental data on instantaneous values of velocity and local heat transfer coefficient of stationary and pulsating air flows with different levels of turbulence in straight pipes with different cross-sectional shapes were obtained. *CONCLUSION.* It has been established that the presence of gas-dynamic non-stationarity leads to an increase in the degree of turbulence by 47-72% in a round pipe and by 36-86% in a triangular pipe. The presence of gas-dynamic non-stationarity causes an intensification of heat transfer in a round pipe by 26-35.5% and by 24-36% in a triangular pipe. It has been shown that a significant increase in the degree of turbulence leads to an increase in the heat transfer coefficient of pulsating flows in a round pipe by 11-16% and, conversely, a decrease in the heat transfer coefficient by 7-24% in a triangular pipe. The obtained results can be used in the design of heat exchangers and gas exchange systems in power machines, as well as in the creation of pulsed action devices and apparatus.

Keywords: straight pipe; circular and triangular cross-sections; steady and pulsating flows; local velocity; local and average heat transfer; degree of turbulence; flow pulsation frequency.

Acknowledgments: The work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No 23–29–00022).

For citation: Plotnikov L.V., Osipov L.E., Grigoriev N.I., Ponomarev D.A., Plotnikov O.A. Gas dynamics and heat transfer of stationary and pulsating air flows in round and triangular straight pipelines at different turbulence degrees. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (1): 88-102. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-88-102.

Введение (Introduction)

Рабочие тела в виде пульсирующих потоков жидкости и газа в трубах различных конфигураций применяются во многих отраслях промышленности и техники (например, пульсирующие тепловые трубы [1], солнечная энергетика [2] и поршневые двигатели внутреннего сгорания [3]). В большинстве случаев эффективность конечного продукта (двигателя, теплообменного аппарата, энергетической установки и др.) зависит от газодинамического и теплообменного совершенства процессов рабочего тела в системах с трубами разных конфигураций. В подобных системах термогазодинамику течения

определяет большое количество факторов: (1) характеристики пульсаций потока (частота, амплитуда, вид); (2) степень турбулентности потока и (3) геометрическая конфигурация трубопровода. Поэтому получение данных о газодинамике и теплообмене пульсирующих потоков газа в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения для разных условий турбулентности остается актуальной и важной задачей для развития фундаментальной и прикладной науки, а также для повышения эффективности энергетических технологий. Краткий обзор современных результатов исследований по данной тематике представлен ниже.

Вопрос влияния газодинамической нестационарности (пульсаций) потока газа на интенсивность теплоотдачи в трубопроводных системах остается в центре внимания многих исследователей [4-6]. Nishandar S.V. с коллегами провели подробное изучение особенностей газодинамика пульсирующих потоков в трубе для уточнения физического механизма изменения уровня теплообмена [4]. Авторы выделили несколько важных факторов, которые имеют определяющее влияние на теплообмен: число Рейнольдса, длина и диаметр трубы, частота и амплитуда пульсации потока. Выявлено, что высокочастотные пульсации скорости потока повышают локальное число Нуссельта в трубе. Nayrullin A. с соавторами исследовали влияние пульсаций потока на уровень теплообмена в пучке труб теплообменных аппаратов различных конструкций [5]. Установлено, что в данном случае интенсификация теплообмена усиливается с ростом амплитуды и частоты пульсаций потока и уменьшается с ростом числа Рейнольдса. Зафиксировано увеличение коэффициента теплоотдачи в 1,25-1,6 раз по сравнению со стационарным течением. van Buren S. и др. изучали пульсирующие потоки в трубе с реверсированием потока [6]. Показано, что существует увеличение коэффициента теплоотдачи до 60% по сравнению со стационарным движением среды в моменты реверсирования потока. При этом, увеличение осредненного коэффициента теплоотдачи за полный цикл рассматриваемой пульсации не столь существенно. Nakamura H. с коллегами исследовали по отдельности влияние ускорения и замедления потока воздуха на интенсивность теплоотдачи в трубе [7].

Также существуют прикладные исследования по изучению влияния пульсаций потока газа на уровень теплообмена в выпускных системах поршневых двигателей [8, 9]. Так, Simonetti M. и др. исследовали теплоотдачу выпускных газов двигателя, пульсирующих с частотами от 10 до 95 Гц [8]. Авторы определили, что пульсации потока улучшили теплообмен в системе во всем диапазоне частот. При этом, ключевым фактором повышения коэффициента теплоотдачи являлась величина относительной амплитуды скорости потока газа. В свою очередь, Kato Y. с коллегами обнаружили, что повышенная интенсивность теплоотдачи выпускных газов на частотах 25-35 Гц могла быть связана с повышенной турбулентностью потока, вызванной пульсациями потока в выпускной системе [9].

Отдельным направлением исследований пульсирующих потоков в различных газодинамических системах состоит в изучении влияния турбулизации течения на интенсивность теплообмена [10-12]. Один из самых известных и эффективных способов улучшения теплообмена потока воздуха в каналах является создание различного рода лунок и/или канавок на внутренней поверхности (сферические лунки, плоский прямоугольник, квадратная канавка, прямоугольная канавка и т.д.). Например, это может вызывать турбулизацию течения и соответствующую интенсификацию теплообмена вплоть до 2 раз по сравнению с гладкими поверхностями [10]. De Maio M. с коллегами обнаружил, что существенное увеличение шероховатости трубы также вызывает рост степени турбулентности потока и интенсификацию теплообмена на 4-13 % по сравнению с гладкой трубой [11]. Также существуют другие способы турбулизации потока жидкости и газа с целью интенсификации теплообмена, например, путем установки аэродинамического спойлера или создания специального оребрения на поверхности канала [12]. Это может приводить к росту коэффициента теплоотдачи на 170 % по сравнению с гладкой поверхностью.

Также известно, что форма поперечного сечения трубопровода может оказывать существенное влияние на газодинамические условия теплообмена стационарных и пульсирующих потоков газа [13, 14]. Так, Nikitin N.V. с коллегами подробно исследовал формирование и развитие вторичных течений в пульсирующем потоке в квадратной трубе [13]. Авторы описали физический механизм вихревых токов в углах квадрата и предложили математическую модель для их прогнозирования. Kumar R. и др. сделали обзор исследований об особенностях газодинамики и теплообмена в треугольных трубах [14]. Показано, что в треугольных трубах также формируются сильные вторичные течения,

которые существенно модифицируют газодинамические характеристики потока и вызывают изменение уровня теплообмена.

Многие исследователи уделяют внимание сравнению интенсивности теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков в квадратных и треугольных каналах [14-17]. Так, Guo G. с соавторами установили, что имеет место незначительное снижение коэффициента теплоотдачи в квадратной при пульсирующем движении среды по сравнению со стационарным потоком [15]. Аналогичные данные были получены Nikitin N.: газодинамическая нестационарность в квадратной трубе вызывала подавление интенсивности теплоотдачи вплоть до 15 % [16]. Pirozzoli S. и др. сравнили уровень теплообмена стационарных потоков в круглой и квадратной трубах [17]. Показано, что изменение формы поперечного сечения оказывает слабое влияние на интенсивность теплоотдачи. При этом, Kumar R. с коллегами обнаружил незначительную интенсификацию теплообмена в треугольной трубе по сравнению с круглой [14]. Соответственно, можно заключить, что газодинамика и теплообмен потоков в трубах с разными формами поперечного сечения изучена недостаточно подробно: разные конфигурационные и режимные условия в постановке задачи исследования приводят к противоположным эффектам.

Также существуют разработки и исследования по применению специфических конструкций труб для интенсификации теплообмена [18, 19]. Так, Zhang L. с коллегами исследовали особенности газодинамики и теплообмена в волновой и дуговой трубках [18]. Результаты показали заметную интенсификацию теплообмена практически на всех исследуемых режимах (для всех чисел Рейнольдса). Kurtulmuş N. и Sahin B. получили аналогичные результаты для синусоидальной трубы [19]. Необходимо отметить, что исследования проводились для стационарного и пульсирующего потока. При этом, газодинамическая нестационарность приводила к дополнительному росту коэффициента теплоотдачи.

Соответственно, изучение влияния конфигурационных (различные формы поперечного сечения каналов) и режимных (стационарные и пульсирующие потоки) факторов на газодинамику и теплообмен потоков в трубопроводах остается востребованной и важной задачей в развитии науки и техники.

Таким образом, основные задачи данного исследования состояли в следующем:

- получить экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков воздуха с разным уровнем турбулизации в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения;
- оценить влияние газодинамической нестационарности на степень турбулентности потоков воздуха в круглой и треугольной прямолинейных трубах;
- установить влияние газодинамической нестационарности на интенсивность теплоотдачи потоков воздуха в круглой и треугольной трубах;
- выявить влияние частоты пульсаций потока воздуха на степень турбулентности и коэффициент теплоотдачи потоков воздуха в трубах с разными формами поперечного сечения.

Научная значимость исследования состоит в том, что впервые получены сведения о воздействии газодинамической нестационарности на степень турбулентности и интенсивность теплоотдачи потока воздуха в треугольной прямолинейной трубе, а также проведен сравнительный анализ влияния поперечного профилирования трубопровода на газодинамику и теплообмен в рассматриваемой системе.

Практическая значимость исследования заключается в получении теплофизических закономерностей необходимых для проектирования перспективных теплообменных аппаратов и оригинальных систем газообмена в энергетических машинах, а также для создания устройств и аппаратов импульсного (периодического) действия.

Материалы и методы (Materials and methods)

Исследование нестационарной газодинамики и теплообмена потоков в прямолинейных трубах осуществлялось посредством экспериментальных подходов на основе метода тепловой анемометрии. Для этих целей была разработана лабораторная установка, схема которой показана на рисунке 1.

Лабораторная установка состоит из следующих основных элементов: (1) вакуумный насос для создания движения воздуха в газодинамической системе; (2) прямолинейные трубопроводы с поперечными сечениями в форме круга и треугольника; (3) статические плоские турбулизаторы потока воздуха; (4) вращающаяся заслонка для создания пульсаций

потока воздуха; (5) измерительная система на базе термоанемометра постоянной температуры.

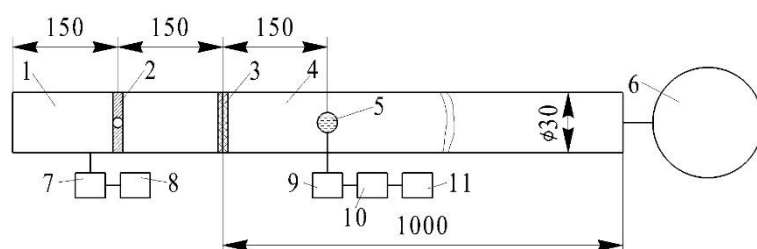


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда: 1 – входной участок; 2 – вращающаяся заслонка; 3 – пластинчатый турбулизатор; 4 – исследуемая труба круглого поперечного сечения; 5 – контрольное сечение с датчиками; 6 – откачивающий насос; 7 – электропривод заслонки; 8 – система управления частотой вращения заслонкой; 9 – термоанемометр; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – персональный компьютер

Fig. 1. Block diagram of the experimental stand: 1 – inlet section; 2 – rotating flap; 3 – plate turbulator; 4 – pipe of round cross-section under study; 5 – control section with sensors; 6 – pumping pump; 7 – electric flap drive; 8 – flap speed control system; 9 – thermoanemometer; 10 – analog-to-digital converter; 11 – personal computer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Пульсации потока в газодинамической системе создавались посредством заслонки (рис. 2а), частота вращения которой могла изменяться посредством регулятора напряжения. Таким образом генерировались пульсации потока воздуха с частотой f от 3 до 16,6 Гц. Подобные пульсирующие потоки характерны для различных устройств периодического действия (например, поршневых машин) и для импульсных аппаратов различного назначения.

Стационарные плоские турбулизаторы использовались для изменения степени турбулентности стационарных и пульсирующих потоков в прямолинейных трубах (рис. 2б). Применялось несколько турбулизаторов с разным количеством отверстий и разным диаметром отверстий. Таким образом степень турбулентности потока Tu изменялась от 0,03-0,04 (поток без турбулизатора) до 0,12 (максимальное среднее значение Tu).

В исследовании использовались две конфигурации прямолинейных трубопроводов. Базовая труба имела круглое поперечное сечение с внутренним диаметром 30 мм. Альтернативная труба имела поперечное сечение в форме равностороннего треугольника со стороной равной 39 мм. Геометрия треугольной трубы была выбрана исходя из равенства площади поперечного сечения обеих труб. Длина трубопроводов составляла 1 м в обоих случаях. Научная идея исследования треугольной трубы основывается на известных данных, что в каналах с поперечным профилированием образуются сильные вторичные течения, которые заметно влияют на газодинамические и теплообменные характеристики потоков [20, 21].

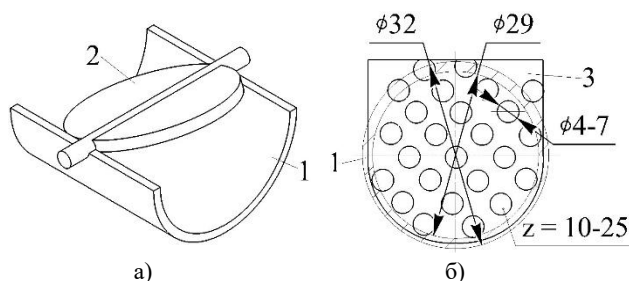


Рис. 2. Общий вид вращающейся заслонки (а) и геометрические размеры плоского турбулизатора (б): 1 – трубопровод; 2 – заслонка; 3 – плоский турбулизатор

Fig. 2. General view of the rotating damper (a) and geometric dimensions of the flat turbulizer (b): 1 – pipeline; 2 – damper; 3 – flat turbulizer

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Рабочей средой в опытах был воздух с температурой $22 \pm 1^\circ\text{C}$ движущийся со скоростью от 5 м/с до 75 м/с ($10\,000 < Re < 150\,000$), т.е. режим течения являлся развитым

турбулентным. Опыты проводились при атмосферном давлении $98,0 \pm 0,2$ кПа (измеренным посредством барометр-анероид типа БАММ-1 и указанное с учетом погрешности прибора).

Следующие параметры измерялись в опытах: (1) мгновенные значения скорости потока воздуха w_x (посредством термоанемометра постоянной температуры с быстродействием не более 3 мс); (2) мгновенные значения локального коэффициента теплоотдачи α_x (посредством термоанемометра постоянной температуры с аналогичным быстродействием); (3) температура потока (посредством термопар); (4) частота вращения заслонки (посредством индуктивного датчика); (5) атмосферное давление (посредством барометра-анероида).

Метод тепловой анемометрии был основным исследовательским методом в данной работе. Изготавливались специальные датчики с нитевым чувствительным элементом для термоанемометра постоянной температуры для измерения w_x и α_x [22, 23]. Нить имела диаметр 5 мкм и длину около 5 мм. Нить размещалась на стойках примерно в центре трубы на для определения w_x . Для определения α_x нить монтировалась на подложке и располагалась заподлицо с внутренней поверхностью трубы. Применялся термоанемометр постоянной температуры Ирвис (Россия), датчики изготавливались самостоятельно. Более подробные сведения о датчиках и способе их установки в трубопроводах разных конфигураций можно найти в статье [24]. В данной статье представлены данные, полученные с помощью датчиков, расположенных на расстоянии 150 мм от турбулизатора (см. также рис. 1).

Сигналы со всех датчиков поступали в аналого-цифровой преобразователь LCard (Россия) в режиме реального времени. После чего оцифрованные сигналы передавались в специализированное программное обеспечение LGraph2 (Россия) для хранения и обработки.

Относительная неопределенность определения w_x составляла 5,3 %; относительная неопределенность определения α_x равнялась 10,9 %; относительная неопределенность измерения температуры потока была 1,0 %.

Таким образом, была разработана газодинамическая система с автоматизированной измерительной базой, которая позволяла исследовать газодинамику и теплообмен стационарных и пульсирующих потоков воздуха с разными частотами пульсаций и разной степенью турбулентности.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Первичные данные об изменении мгновенных значений скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени при течении пульсирующего потока воздуха в круглой и треугольной трубах без турбулизатора показаны на рисунках 3 и 4.

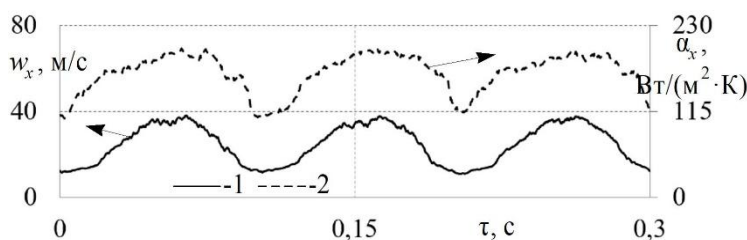


Рис. 3. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в круглой трубе без турбулизатора ($Tu \approx 0,03$) при следующих условиях: $w = 24,8$ м/с, $f = 10,6$ Гц

Fig. 3. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a circular tube without turbulator ($Tu \approx 0,03$) under the following conditions: $w = 24.8$ m/s, $f = 10.6$ Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следующие выводы были сделаны на основе сравнения данных на рисунках 3 и 4:

- имеют место ярко выраженные пульсации потока (с соответствующими максимумами и минимумами w_x и α_x), обусловленные перекрытием трубы заслонкой для обоих случаев;

- при течении в круглой трубе на зависимостях $w_x = f(\tau)$ и $\alpha_x = f(\tau)$ практически отсутствуют флуктуации скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x , тогда как при использовании треугольной трубы имеют место заметные флуктуации w_x и α_x потока; их формирование может быть связано с вторичными вихревыми течениями в углах треугольного профиля;

- максимальные значения α_x в треугольной трубе визуально меньше на 10-15% по сравнению с круглой трубой в данных условиях эксперимента.

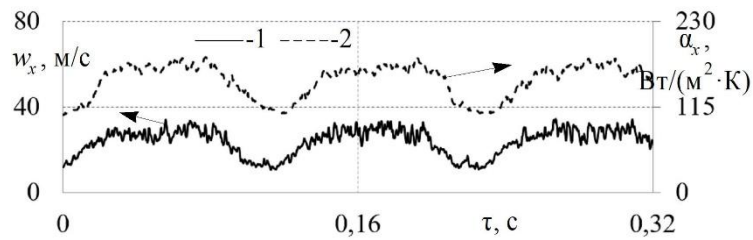


Рис. 4. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в треугольной трубе без турбулизатора ($Tu \approx 0,05$) при следующих условиях: $w = 23,8$ м/с, $f = 9,2$ Гц

Fig. 4. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a triangular tube without turbulator ($Tu \approx 0.05$) under the following conditions: $w = 23.8$ m/s, $f = 9.2$ Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Первичные данные об изменении мгновенных значений скорости w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени при течении пульсирующего потока воздуха в круглой и треугольной трубах с турбулизатором показаны на рисунках 5 и 6.

Из рисунка 5 видно, что повышение степени турбулентности потока вызвало существенную деформацию зависимостей $w_x = f(\tau)$ и $\alpha_x = f(\tau)$ в круглой трубе. Амплитуда колебания потока воздуха соизмерима с амплитудой основных пульсаций. На функции $\alpha_x = f(\tau)$ визуальнo сложно идентифицировать пульсации локального коэффициента теплоотдачи, вызванные вращающейся заслонкой.

В свою очередь, пульсирующий поток воздуха в треугольной трубе является более стойким к повышению степени турбулентности (рис. 6). Флуктуации местной скорости потока w_x имеют существенно меньшую амплитуду в треугольной трубе по сравнению с круглой. Функция $\alpha_x = f(\tau)$ является более выраженной (четкой); существует возможность легко идентифицировать пульсации локального коэффициента теплоотдачи вследствие вращения заслонки в трубопроводе. Соответственно, можно предположить, что вторичные вихревые структуры, образующиеся в треугольной трубе, придают жесткости потоку, препятствуя его деформации под воздействием внешних возмущений.

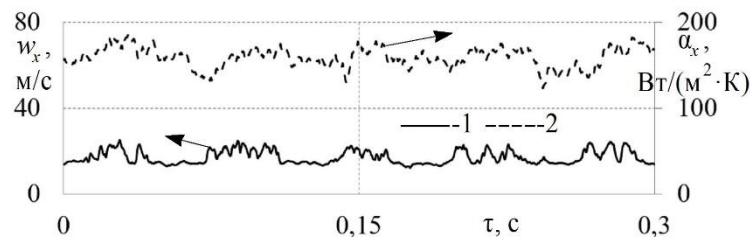


Рис. 5. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в круглой трубе с турбулизатором ($Tu \approx 0,12$) при следующих условиях: $w = 17,2$ м/с, $f = 16,6$ Гц

Fig. 5. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a circular tube with a turbulator ($Tu \approx 0.12$) under the following conditions: $w = 17.2$ m/s, $f = 16.6$ Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

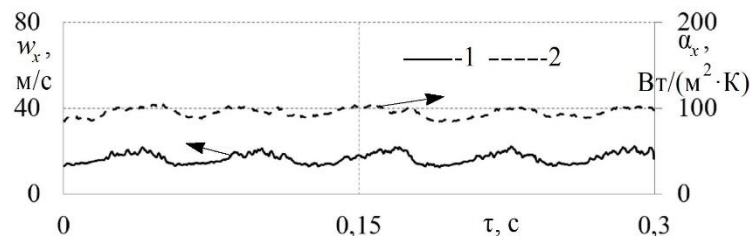


Рис. 6. Зависимости местной скорости потока воздуха w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x от времени τ в треугольной трубе с турбулизатором ($Tu \approx 0,10$) при следующих условиях: $w = 17,5$ м/с, $f = 16,6$ Гц

Fig. 6. Dependences of local air flow velocity w_x and local heat transfer coefficient α_x on time τ in a triangular tube with a turbulator ($Tu \approx 0.10$) under the following conditions: $w = 17.5$ m/s, $f = 16.6$ Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для количественной оценки величины пульсационной составляющей скорости воздушного потока в газодинамической системе рассчитывалась степень турбулентности Tu для круглой и треугольной труб в свободном потоке, т. е. без применения турбулизатора (рис. 7-8). Анализ рисунков 7 и 8 позволяет проследить влияние газодинамической нестационарности и геометрической формы трубопроводов на степень турбулентности в прямолинейных трубах. Tu определялась как отношение среднеквадратичной пульсационной составляющей скорости к средней скорости исследуемого потока; методика расчета Tu для пульсирующих поток подробно описана в статье [25].

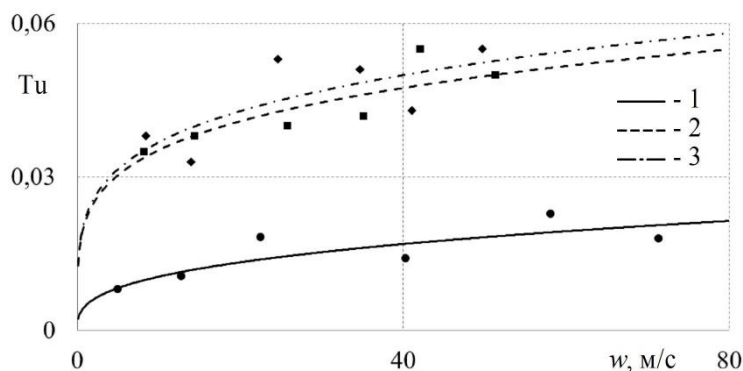


Рис. 7. Зависимости степени турбулентности Tu в круглой прямолинейной трубе без турбулизатора от средней скорости потока w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 4,6$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,3$ Гц

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 7 видно, что имеется тенденция увеличения значений Tu с ростом средней скорости потока воздуха в круглой трубе, что характерно для стационарного и пульсирующего течений. При этом, газодинамическая нестационарность (пульсации потока) вызывают существенный рост степени турбулентности Tu почти в 2 раза по сравнению со стационарным течением. Эти отличия характерны для всех исследуемых скоростей потока воздуха. При этом увеличение частоты пульсаций f фактически не оказывает влияния на Tu (различия находятся в пределах неопределенности эксперимента).

Иные закономерности изменения степени турбулентности потока имеют место в треугольной трубе (рис. 8).

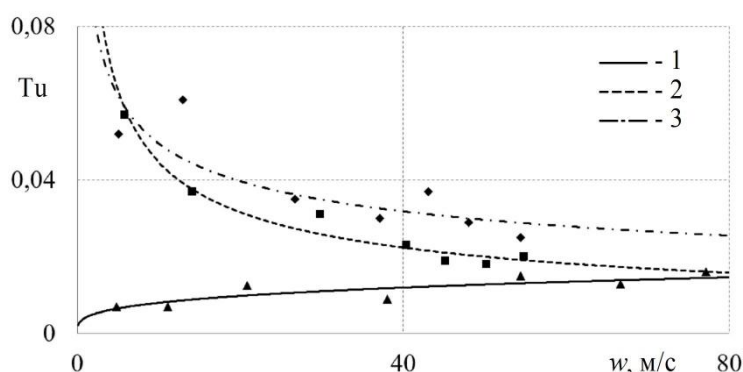


Рис. 8. Зависимости степени турбулентности Tu в треугольной прямолинейной трубе без турбулизатора от средней скорости потока w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 3,0$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,8$ Гц

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Значения Tu увеличиваются с ростом скорости потока для стационарного течения воздуха в треугольной трубе. Однако, наблюдается противоположная тенденция для пульсирующих потоков: значения Tu уменьшаются с ростом скорости в треугольной трубе.

При этом значения Tu в 1,36-2,2 раза выше для пульсирующих потоков по сравнению со стационарным движением воздуха при скоростях $w < 40$ м/с. Для $w > 40$ м/с значения Tu являются приблизительно одинаковыми (в пределах неопределенности эксперимента) для стационарного и пульсирующего потоков. Частота пульсаций f потока также оказывает слабое влияние на степени турбулентности. Обнаруженные особенности изменения Tu в треугольной трубе могут быть объяснены продольными вихревыми структурами, образующимися в углах канала. Вероятно, они стабилизируют течение и препятствуют газодинамической деформации под действием внешних факторов.

Существенное изменение газодинамических условий в треугольной трубе должно привести к модификации теплообменных характеристик стационарных и пульсирующих потоков воздуха. Поэтому дополнительно рассчитывался осредненный коэффициент теплоотдачи α в обеих трубах для разных граничных условий. Коэффициент α определялся как математическое ожидание функции $\alpha_x = f(\tau)$ за один период пульсации.

Проследить влияние газодинамической нестационарности потока и формы поперечного сечения трубопровода на уровень теплоотдачи в прямолинейных трубах можно на основе рисунков 9 и 10.

Из рисунка 9 видно, что газодинамическая нестационарность вызывает интенсификацию теплоотдачи в круглой прямолинейной трубе на 22-30%. При этом увеличение частоты пульсаций потока f не вызывает заметного дальнейшего роста коэффициента теплоотдачи (увеличение α составляет 4-5,5 % при росте f с 4,6 Гц до 15,3 Гц, что находится в пределах неопределенности эксперимента). Подобные данные о влиянии пульсаций потока воздуха на уровень теплообмена в различных газодинамических системах можно найти у других авторов [26, 27]. Имеется схожесть научных результатов, что газодинамическая нестационарность вызывает интенсификацию теплообмена в пределах 20-40%. Также существуют данные других авторов о том, что увеличение значений степени турбулентности вызывает рост коэффициента теплоотдачи [28]. Обнаруженная интенсификация теплообмена в пульсирующих течениях может быть связана с крупно- и мелкомасштабными колебаниями в потоке, и соответствующей перестройкой и ослаблением пограничного слоя, что способствует теплопереносу.

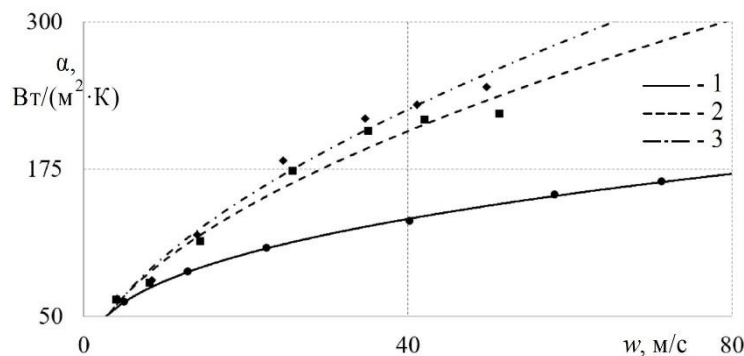


Рис. 9. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в круглой прямолинейной трубе без турбулизатора от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 4,6$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,3$ Гц

Fig. 9. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a circular rectilinear pipe without turbulizer on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow; 2 – pulsating flow with $f = 4.6$ Hz; 3 – pulsating flow with $f = 15.3$ Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналогичное влияние оказывает газодинамическая нестационарность на уровень теплообмена потоков в треугольной трубе: имеет место интенсификация коэффициента теплоотдачи на 24-36% по сравнению со стационарным течением (рис. 10). Также увеличение частоты пульсаций с 3 Гц до 15,8 Гц фактически не оказывает влияние на интенсивность теплоотдачи (наблюдается незначительное снижение α на 2-11%, что находится в пределах неопределенности эксперимента). Соответственно, можно констатировать, что газодинамическая нестационарность оказывает схожее влияние на уровень теплообмена потока воздуха в круглой и треугольной трубах.

Следует отметить, что значения коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в треугольной трубе меньше на 6,5-13,5% по сравнению с таковыми в круглой трубе. Это можно объяснить с помощью ранее обнаруженного эффекта, заключающегося в

стабилизации пульсирующего потока в треугольной трубе и пониженными значениями степени турбулентности.

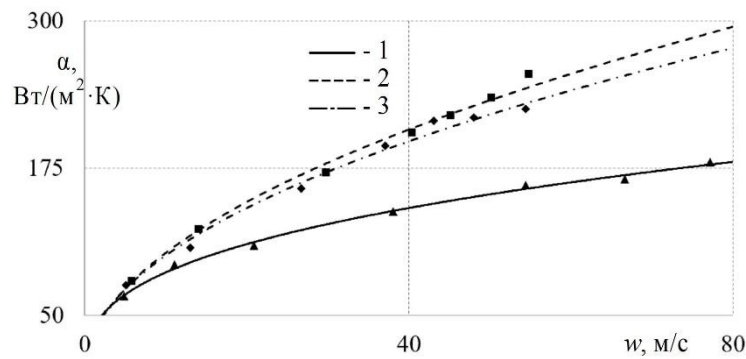


Рис. 10. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в треугольной прямолинейной трубе без турбулизатора от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение; 2 – пульсирующий поток с $f = 3,0$ Гц; 3 – пульсирующий поток с $f = 15,8$ Гц

Fig. 10. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a triangular rectilinear tube without turbulator on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow; 2 – pulsating flow with $f = 3.0$ Hz; 3 – pulsating flow with $f = 15.8$ Hz

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Оценить влияние турбулизации пульсирующего потока на интенсивность теплоотдачи в трубах с разными формами поперечного сечения можно на основе рисунков 11 и 12.

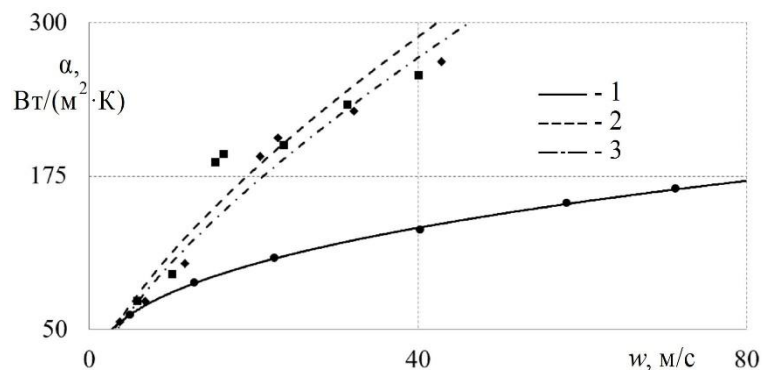


Рис. 11. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в круглой прямолинейной трубе от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение с $Tu = 0,04$; 2 – пульсирующий поток с $f = 10,6$ Гц и $Tu = 0,08$; 3 – пульсирующий поток с $f = 14$ Гц и $Tu = 0,12$

Fig. 11. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a circular rectilinear tube on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow with $Tu = 0.04$; 2 – pulsating flow with $f = 10.6$ Hz and $Tu = 0.08$; 3 – pulsating flow with $f = 14$ Hz and $Tu = 0.12$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сравнение зависимостей на рисунке 9 (данные без турбулизатора) и рисунке 11 (данные с турбулизацией потока) показывает, что:

- увеличение Tu с 0,04 до 0,08 приводит к росту коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе на 11-16%, что хорошо согласуется с [38];
- дальнейшее повышение степени турбулентности пульсирующего потока вызывает дополнительное небольшое увеличение α в пределах 5-8%;
- соответственно, есть основания констатировать, что турбулизация пульсирующего потока в круглой трубе интенсифицирует теплоотдачу;
- частота пульсаций имеет слабое влияние на уровень теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе.

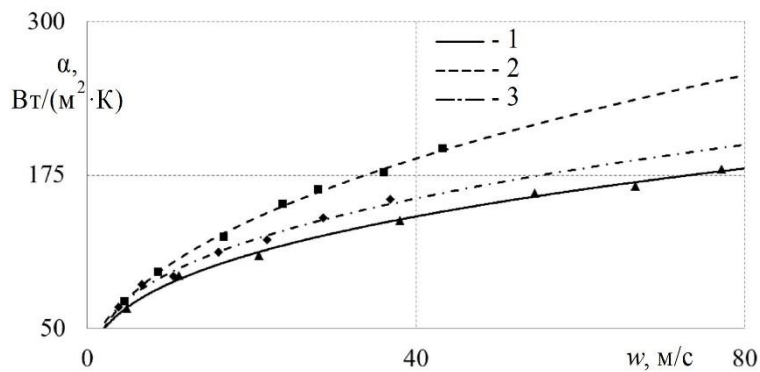


Рис. 12. Зависимости осредненного коэффициента теплоотдачи α в треугольной прямолинейной трубе от скорости потока воздуха w для разных условий: 1 – стационарное течение с $Tu = 0,03$; 2 – пульсирующий поток с $f = 9,2$ Гц и $Tu = 0,08$; 3 – пульсирующий поток с $f = 9,2$ Гц и $Tu = 0,15$

Fig. 12. Dependences of the averaged heat transfer coefficient α in a triangular rectilinear tube on the air flow velocity w for different conditions: 1 – stationary flow with $Tu = 0.03$; 2 – pulsating flow with $f = 9.2$ Hz and $Tu = 0.08$; 3 – pulsating flow with $f = 9.2$ Hz and $Tu = 0.15$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сопоставление закономерностей на рисунке 10 (данные без турбулизации потока) и рисунке 12 (данные с турбулизатором в трубе) показывает, что:

- повышение степени турбулентности пульсирующего потока (с 0,04 до 0,08) в треугольной трубе приводит к подавлению теплоотдачи до 24%;
- рост Tu пульсирующего потока с 0,04 до 0,15 в треугольной трубе вызывает снижение коэффициента теплоотдачи до 10,6% (что находится в пределах неопределенности эксперимента);
- соответственно, можно заключить, что турбулизация пульсирующего потока в треугольной трубе подавляет теплоотдачу; обнаруженный эффект требует проведения дополнительных исследований для уточнения физического механизма.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что интенсивность теплоотдачи потоков воздуха в трубах с разными поперечными сечениями имеет заметные отличия. Это необходимо учитывать при проектировании газодинамических систем для теплообменного оборудования, тепловых двигателей и энергетических установок.

Таким образом, были получены экспериментальные данные о влиянии геометрии прямолинейной трубы, пульсаций и турбулизации потока воздуха на интенсивность теплоотдачи. Полученные данные расширяют базу знаний о газодинамике и теплообмене стационарных и пульсирующих течений в трубопроводах для разных начальных условий. Обнаруженные научные результаты могут найти применение при проектировании теплообменных аппаратов и систем газообмена в энергетике, а также при создании машин и аппаратов циклического (импульсного) действия.

Выводы (Conclusions)

Анализ и обобщение полученных данных позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Был разработан лабораторный стенд и создана измерительная система с необходимым быстродействием для исследования газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков в прямолинейных трубах с разными формами поперечного сечения.
2. Установлено, что газодинамическая нестационарность (наличие пульсаций потока в сравнении со стационарным течением) приводит к увеличению степени турбулентности Tu на 47-72% в круглой прямолинейной трубе и на 36-86% в треугольной трубе.
3. Выявлено, что газодинамическая нестационарность (пульсации потока в диапазоне от 4,6 до 15,3 Гц) вызывает интенсификацию теплоотдачи в круглой прямолинейной трубе на 26-35,5%.
4. Показано, что газодинамическая нестационарность (пульсации потока в диапазоне от 3,0 до 15,8 Гц) приводит к росту коэффициента теплоотдачи в треугольной трубе на 24-36%.
5. Установлено, что увеличение Tu с 0,04 до 0,12 приводит к росту коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в круглой трубе на 11-16%.
6. Выявлено, что повышение Tu (с 0,04 до 0,15) для пульсирующего потока в треугольной трубе приводит к подавлению теплоотдачи на 7-24%.

7. Полученные результаты подтверждают существенное влияние пульсаций потока, степени турбулентности и формы поперечного сечения трубопроводов на газодинамические и теплообменные характеристики потоков газа в прямолинейных трубах.

Полученные результаты могут быть полезны для проектирования энергетического и теплообменного оборудования и для уточнения математических моделей для прогнозирования газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков газа.

Литература

1. Yang K.-S., Jiang M.-Y., Tseng C.-Y., Wu S.-K., Shyu J.-C. Experimental investigation on the thermal performance of pulsating heat pipe heat exchangers // *Energies*. 2020. Vol. 13(1). Article number 269.
2. Matouq J., Al-Waked R., Al-Rashdan M., Mustafa D.B., Nasif M.S. Computational Fluid Dynamics Analysis of Slip Flow and Heat Transfer at the Entrance Region of a Circular Pipe // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2024. Vol. 14(15). Article number 6528.
3. Winkler N. Effect of pressure oscillations on in-cylinder heat transfer - Through large eddy simulation // *International Journal of Engine Research*. 2015. Vol. 16(6). P. 705-715.
4. Nishandar S.V., Pise A.T., Bagade P.M., Gaikwad M.U., Singh A. Computational modelling and analysis of heat transfer enhancement in straight circular pipe with pulsating flow // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2024.
5. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A., Ilyin V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 232. Article number 125916.
6. Van Buren S., Miranda A.C., Polifke W. Large eddy simulation of enhanced heat transfer in pulsatile turbulent channel flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 144. Article number 118585.
7. Nakamura H., Saito R., Yamada S. Delay in response of turbulent heat transfer against acceleration or deceleration of flow in a pipe // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2020. Vol. 85. Article number 108661.
8. Simonetti M., Caillol C., Higelin P., Dumand C., Revol E. Experimental investigation and 1D analytical approach on convective heat transfers in engine exhaust-type turbulent pulsating flows // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 165. Article number 114548.
9. Kato Y., Guo G., Kamigaki M., Fujimoto K., Kawaguchi M., Nishida K., Koutoku M., Hongou H., Yanagida H., Ogata Y. An Examination of Heat Transfer Dynamics in Pulsating Air Flow within Pipes: Implications for Automotive Exhaust Engines // *International Journal of Heat and Technology*. 2023. Vol. 41(4). P. 815-826.
10. Тимербаев Н.Ф., Али А.К., Альмохаммед О.А.М., Корякин А.Р. Моделирование влияния продольного прямоугольного оребрения на эффективность теплообмена // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. Т. 21. № 4. С. 48-57.
11. De Maio M., Latini B., Nasuti F., Pirozzoli S. Direct numerical simulation of turbulent flow in pipes with realistic large roughness at the wall // *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 974. Article number A40.
12. Xifeng W., Xiaoluan Z., Mahariq I., Ghalandari M., Ghadak F., Abedini M. Performance Optimization of the Helical Heat Exchanger With Turbulator // *Frontiers in Energy Research*, 2022, 9, 789316.
13. Nikitin N. Turbulent secondary flows in channels with no-slip and shear-free boundaries // *Journal of Fluid Mechanics*. 2021. Vol. 917.
14. Kumar R., Varun, Kumar A. Thermal and fluid dynamic characteristics of flow through triangular cross-sectional duct: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 61. P. 123-140.
15. Guo G., Kamigaki M., Inoue Y., Nishida K., Hongou H., Koutoku M., Yamamoto R., Yokohata, H., Sumi S., Ogata Y. Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes // *Energies*. 2021. Vol. 14(13). Article number 3953.
16. Nikitin N. Wall friction and heat transfer in turbulent pulsating flow in a square duct // *International Journal of Thermal Sciences*. 2024. Vol. 196. Article number 108679.
17. Pirozzoli S., Modesti D., Orlandi P., Grasso F. Turbulence and secondary motions in square duct flow // *Journal of Fluid Mechanics*. 2018. Vol. 840. 631-655.
18. Zhang L., Tian L., Zhang A., Chen H. Effects of the shape of tube and flow field on fluid flow and heat transfer // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 117. Article number 104782.

19. Kurtulmuş N., Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels // International Journal of Mechanical Sciences. 2020. Vol. 167. Article number 105268.

20. Nikitin N.V., Popelenskaya N.V., Stroh A. Prandtl's Secondary Flows of the Second Kind. Problems of Description, Prediction, and Simulation // Fluid Dynamics. 2021. Vol. 56(4). P. 513-538.

21. Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Невولين А.М., Мисник М.О. Физическое и численное моделирование тепломеханических характеристик стационарных потоков в газоздушных трактах поршневых двигателей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 5. С.22-28.

22. 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. Article number 126041.

23. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines // Sensors. 2022. Vol. 22 (17). Article number 6395.

24. 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.

25. 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). P. 365-376.

26. Davletshin I.A., Mikhayev N.I., Paereliy A.A., Gazizov I.M. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 129. P. 74-85.

27. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 48(19). P. 3957-3970.

28. Terekhov V.I. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review // Energies. 2021. Vol. 14. Article number 1005.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: leonplot@mail.ru

Осипов Леонид Евгеньевич – преподаватель кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: klumbaa@outlook.com

Григорьев Никита Игоревич – канд. техн. наук, технический директор ООО «Уральский дизель-моторный завод»; доцент кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: gepebola3@mail.ru

Пonomarev Дмитрий Алексеевич – начальник бюро ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: ponomarevda@udmw.ru

Плотников Олег Алексеевич – аспирант кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: olega.plotnikov97@mail.ru

References

1. Yang K.-S., Jiang M.-Y., Tseng C.-Y., Wu S.-K., Shyu J.-C. Experimental investigation on the thermal performance of pulsating heat pipe heat exchangers. Energies, 2020;13(1):269.

2. Matouq J., Al-Waked R., Al-Rashdan M., Mustafa D.B., Nasif M.S. Computational Fluid Dynamics Analysis of Slip Flow and Heat Transfer at the Entrance Region of a Circular Pipe. Applied Sciences (Switzerland), 2024;14(15):6528.

3. Winkler N. Effect of pressure oscillations on in-cylinder heat transfer - Through large eddy simulation. International Journal of Engine Research, 2015;16(6):705-715.

4. Nishandar S.V., Pise A.T., Bagade P.M., Gaikwad M.U., Singh A. Computational modelling and analysis of heat transfer enhancement in straight circular pipe with pulsating flow. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2024.
5. Hayrullin A., Haibullina A., Sinyavin A., Ilyin V. Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024;232:125916.
6. van Buren S., Miranda A.C., Polifke W. Large eddy simulation of enhanced heat transfer in pulsatile turbulent channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019;144:118585.
7. Nakamura H., Saito R., Yamada S. Delay in response of turbulent heat transfer against acceleration or deceleration of flow in a pipe. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020;85:108661.
8. Simonetti M., Caillol C., Higelin P., Dumand C., Revol E. Experimental investigation and 1D analytical approach on convective heat transfers in engine exhaust-type turbulent pulsating flows. *Applied Thermal Engineering*, 2020;165:114548.
9. Kato Y., Guo G., Kamigaki M., Fujimoto K., Kawaguchi M., Nishida K., Koutoku M., Hongou H., Yanagida H., Ogata Y. An Examination of Heat Transfer Dynamics in Pulsating Air Flow within Pipes: Implications for Automotive Exhaust Engines. *International Journal of Heat and Technology*, 2023;41(4):815-826.
10. Timerbaev N.F., Ali A.K., Almohamed O., Koryakin A.R. Simulation of the effectiveness of longitudinal rectangular fins on the efficiency of the double pipe heat exchanger. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(4):48-57. (In Russ)
11. De Maio M., Latini B., Nasuti F., Pirozzoli S. Direct numerical simulation of turbulent flow in pipes with realistic large roughness at the wall // *Journal of Fluid Mechanics*, 2023;974:A40.
12. Xifeng W., Xiaoluan Z., Mahariq I., Ghalandari M., Ghadak F., Abedini M. Performance Optimization of the Helical Heat Exchanger With Turbulator. *Frontiers in Energy Research*, 2022;9:789316.
13. Nikitin N. Turbulent secondary flows in channels with no-slip and shear-free boundaries. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021;917.
14. Kumar R., Varun, Kumar A. Thermal and fluid dynamic characteristics of flow through triangular cross-sectional duct: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;61:123-140.
15. Guo G., Kamigaki M., Inoue Y., Nishida K., Hongou H., Koutoku M., Yamamoto R., Yokohata, H., Sumi S., Ogata Y. Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes. *Energies*, 2021;14 (13):3953.
16. Nikitin N. Wall friction and heat transfer in turbulent pulsating flow in a square duct. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024;196:108679.
17. Pirozzoli S., Modesti D., Orlandi P., Grasso F. Turbulence and secondary motions in square duct flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018;840:631-655.
18. Zhang L., Tian L., Zhang A., Chen H. Effects of the shape of tube and flow field on fluid flow and heat transfer. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020;117:104782.
19. Kurtulmuş N., Sahin B. Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020;167:105268.
20. Nikitin N.V., Popelenskaya N.V., Stroh A. Prandtl's Secondary Flows of the Second Kind. Problems of Description, Prediction, and Simulation. *Fluid Dynamics*, 2021;56(4):513-538.
21. Plotnikov LV, Brodov YM, Zhilkin BP, Nevolin AM, Misnik MO. Physical and numerical simulation of the thermal and mechanical characteristics of stationary flows in the gas air paths of piston engines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):22-28. (In Russ)
22. 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;233:126041.
23. Plotnikov L., Plotnikov I., Osipov L., Slednev V., Shurupov V. An Indirect Method for Determining the Local Heat Transfer Coefficient of Gas Flows in Pipelines. *Sensors*, 2022;22(17):6395.
24. 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;14(5):218–224. (In Russ)
25. 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;26(1A):365-376.
26. Davletshin I.A., Mikhhev N.I., Paereliy A.A., Gazizov I.M. Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019;129:74-85.
27. Wang X., Zhang N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005;48(19):3957-3970.
28. Terekhov V.I. Heat Transfer in Highly Turbulent Separated Flows: A Review. *Energies*, 2021;14:1005.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: leonplot@mail.ru

Leonid E. Osipov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: klumbaa@outlook.com

Nikita I. Grigoriev – Ural Diesel Engine Plant LLC; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: gepebola3@mail.ru

Dmitry A. Ponomarev – Ural Diesel Engine Plant LLC, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ponomarevda@udmw.ru

Oleg A. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: olega.plotnikov97@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **14.08.2024 г.**

Отредактировано **22.10.2024 г.**

Принято **25.10.2024 г.**