

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ПУЛЬСАЦИЙ ПОТОКА ГАЗА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ

Л.В. Плотников
Л.Е. Осипов

plotnikovlv@mail.ru
osipov.leonid@urfu.ru

УрФУ, Екатеринбург, Российская Федерация

Аннотация

Рабочее тело, движущееся в нестационарном (пульсирующем) режиме, является основой многих технических и технологических установок. В связи с этим актуально уточнение физического механизма воздействия пульсаций и турбулизации потока на интенсивность теплоотдачи воздуха в канале для разных граничных условий посредством экспериментального подхода. Исследована прямая труба длиной 1300 мм и диаметром 30 мм (43 калибра). Опыты проведены в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 10\,000\text{--}140\,000$ (развитый турбулентный режим течения). Пульсации потока в канале создавались посредством заслонки, вращающейся с частотой 4...16 Гц. Степень турбулентности потока изменялась в пределах 4...12 % с использованием установки в трубу различных пластинчатых плоских вставок. Метод тепловой анемометрии использован для получения данных о нестационарных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи. Показана степень влияния газодинамической нестационарности на интенсивность теплоотдачи в канале. Установлено, что рост степени турбулентности пульсирующего потока до 12 % увеличивает коэффициент теплоотдачи на 15...21 %. Определен максимальный рост интенсивности теплоотдачи (на 49...51 %) от совокупного воздействия пульсаций и турбулизации потока воздуха в канале. Полученные результаты применимы для отладки математических моделей и проектирования трубопроводных элементов технических систем с рабочим телом, движущимся в пульсирующем режиме

Ключевые слова

Прямая труба, пульсирующий поток воздуха, локальный коэффициент теплоотдачи, степень турбулентности, физическое моделирование

Поступила 21.03.2025
Принята 03.12.2025
© Автор(ы), 2026

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 25-19-00001)

Введение. Принцип действия многих технических и технологических установок основан на нестационарном (пульсирующем) движении рабочего тела в их системах и рабочих элементах. К таким установкам относятся теплообменные аппараты [1], линейные тепловые двигатели-генераторы [2], аппараты кондиционирования и охлаждения [3], пульсирующие тепловые трубы [4], поршневые машины (двигатели, компрессоры) [5, 6] и др. Газодинамическое и теплообменное совершенство пульсирующих потоков жидкости и газа является определяющим фактором эффективности и производительности конечной продукции различного назначения. В связи с этим экспериментальное исследование физических особенностей нестационарного течения газа в трубопроводах остается актуальной задачей для развития науки, техники и технологий.

Рассмотрим несколько современных исследований в области газодинамики и теплообмена стационарных и пульсирующих потоков в трубопроводных элементах для различных технико-технологических систем. Существует большое число работ по изучению влияния пульсаций потока на интенсивность теплоотдачи в пучках труб [7, 8]. Так, в [7] установлено, что нестационарное движение потока воздуха приводит к росту числа Нуссельта до 42 % по сравнению со стационарным течением [7]. Аналогичные данные получены в [8] для медного пучка труб — коэффициент теплоотдачи (КТО) вырос почти в 2 раза вследствие воздействия газодинамической нестационарности на течение. Выделяются исследования по разработке способов интенсификации теплоотдачи в пучке труб за счет изменения их формы [9] или использования вихревых генераторов потока [10]. Подобные меры позволяют снизить гидравлическое сопротивление и улучшить теплообмен и, следовательно, повысить теплогидравлическую эффективность теплообменника до 1,1–1,2. Существует отдельное научное направление по созданию оригинальных конструкций вихревых генераторов в целях интенсификации теплоотдачи в различных устройствах [11–13]. Взаимное влияние пульсаций потока, вибрации канала и применения вихревых генераторов на КТО в трубе исследовано в [11]. Определено, что максимальный рост числа Нуссельта составил 28 % от воздействия указанных факторов. За счет применения различных конфигураций вихрегенераторов в [12] удалось достичь значения коэффициента теплогидравлической эффективности пучка труб около 1,15. Другой распространенный и перспективный метод интенсификации теплоотдачи в трубопроводных системах — нанесение различных шероховатостей (неровностей) на поверхности стенок, а также специально сконфигурированных лунок и/или канавок, преград (ребер) [14–16]. Это может вызвать рост КТО в трубе

в 1,5–2 раза, а при определенных условиях и более, по сравнению с гладкими каналами. Таким образом, газодинамическая нестационарность ввиду пульсаций потока и турбулизации течения посредством применения вихрегенераторов или наличия неровностей на поверхности является действенным способом интенсификации теплообмена для разных технических приложений.

Следует отметить исследования, в которых установлено подавление КТО нестационарных потоков в квадратных и/или прямоугольных каналах, по сравнению со стационарным течением [17–20]. Так, в [17] с помощью математического моделирования обнаружено, что число Нуссельта пульсирующего потока в квадратном канале имеет меньшее значение (на 12–15 %), чем таковое в стационарном режиме течения. Эти данные (подавление КТО) получены и для прямоугольного канала [18]. Противоположное влияние наличия пульсаций потока на интенсивность теплоотдачи в профилированных трубах можно объяснить воздействием дополнительного газодинамического фактора, а именно вторичных течений (вихревых структур) в углах квадратного и прямоугольного каналов.

Ученые и специалисты подробно исследуют влияние различных физических явлений на газодинамику и теплообмен нестационарных потоков в каналах, а именно различные виды пульсаций [21], ускорение и замедление течения [22], периодический подогрев трубы [23] и др. Эти данные необходимы для лучшего понимания физических процессов, происходящих при течении пульсирующих потоков в различных условиях, а также создания способов управления их газодинамическими и теплообменными характеристиками.

Цель работы — уточнение физического механизма воздействия газодинамической нестационарности (пульсаций) и степени турбулентности (турбулизации) потока на интенсивность теплоотдачи воздуха в прямолинейном горизонтальном канале для разных граничных условий.

Описание экспериментальной установки и методики проведения опытов. В исследовании использованы экспериментальные подходы для изучения газодинамики и теплоотдачи стационарных и пульсирующих потоков воздуха в горизонтальном канале для разных граничных условий. Для этого разработан лабораторный стенд (рис. 1).

Основные элементы стенда: прямая труба 1 (1200 мм) с входным участком (100 мм); вращающаяся заслонка 2 с управляемым электроприводом для создания пульсаций потока; пластинчатая вставка (разных конфигураций) для изменения степени турбулентности потока 3; откачивающий

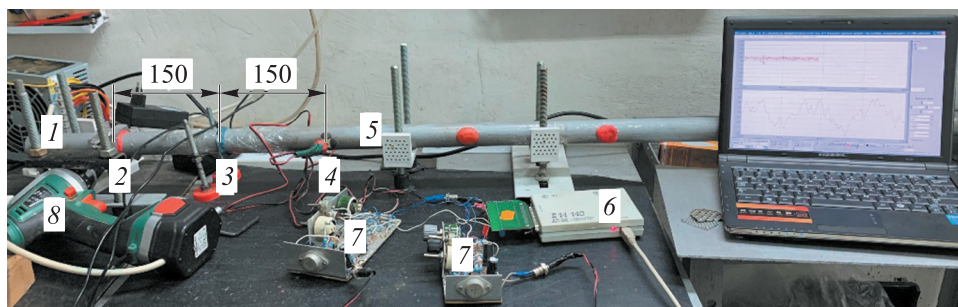


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки

насос 5 с возможностью регулирования расхода воздуха; датчики термоанемометра 7 и измерительная система 4.

Диаметр исследуемого канала 30 мм, общая длина 1300 мм (43 калибра). Рабочая среда — воздух, температура воздуха 22 °С, давление атмосферное. Движение воздуха создавалось посредством откачивающего насоса. Средняя скорость потока воздуха w в канале варьировалась в пределах 5...70 м/с (охват числа Рейнольдса $Re = 10\,000\text{--}140\,000$). Режим течения — развитый турбулентный.

Пульсации потока воздуха создавались с использованием вращающейся заслонки с электроприводом 8, которая периодически перекрывала канал. Частота пульсаций f дискретно изменялась в диапазоне значений 4...17 Гц. Заслонка размещалась на расстоянии 100 мм от входа потока в канал, т. е. после начального участка (см. рис. 1). Проведены опыты при стационарном течении воздуха в описанном выше канале.

Для турбулизации течения и изменения начальной степени турбулентности потока Tu использовано несколько пластинчатых вставок с разным числом отверстий различных диаметров (рис. 2). В исследовании степень Tu изменялась от 4 (канал без турбулизатора) до 12 %. Турбулизирующая вставка размещалась на расстоянии 150 мм от вращающейся заслонки вниз по потоку.

В опытах измеряли мгновенные значения скорости потока w_x и локального КТО α_x на базе метода тепловой анемометрии. Для этого использовали термоанемометры постоянной температуры и два типа датчи-

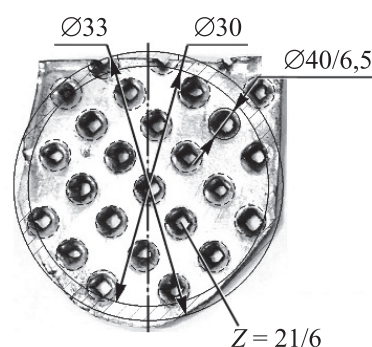


Рис. 2. Общий вид вставки для турбулизации потока с основными геометрическими размерами

ков. Электронная схема термоанемометра создана авторами самостоятельно на основе подходов, описанных в классических монографиях И.О. Хинце¹ и П. Брэдшоу². Датчики выполнены авторами работы. Измерение w_x осуществляли датчиком с нихромовой нитью (диаметр 5 мкм, длина ~ 5 мм) в качестве чувствительного элемента, размещенной на токопроводящих державках примерно в центре канала и перпендикулярно набегающему потоку. Измерение α_x также выполняли ниточным датчиком, но нить располагалась на поверхности фторопластовой подложки, которая устанавливалась заподлицо со стенкой канала. В таком случае определение локального КТО α_x на границе стенки канала-потока воздуха основано на эффекте гидродинамической аналогии теплообмена (аналогии Рейнольдса). Измерительная система, методика измерения, тарировки, верификация и подход расчета α_x подробно описаны в [24]. Следует отметить, что ниточный датчик термоанемометра и косвенный метод определения КТО использованы в исследовании, поскольку указанный тип датчиков обладает высоким быстродействием по сравнению с другими чувствительными элементами (например, пленочными) и позволяет выявить динамическое изменение интенсивности теплоотдачи с незначительной потерей точности. Быстродействие измерительной системы составляло 2,7...5,9 мс в зависимости от скорости потока в канале.

Оцифровка аналоговых сигналов с термоанемометра осуществлялась аналого-цифровым преобразователем 6 (модель e14-140, L-card). Экспериментальные данные обрабатывали в ПО *LGraph2*. Здесь представлены результаты опытов, полученные в контрольном сечении, которое расположено на расстоянии 150 мм от турбулизирующей вставки (или 400 мм от входа потока в канал).

Осреднение функции $\alpha_x = f(\tau)$ за один полный период пульсации выполняли для определения КТО пульсирующего потока в канале. Среднюю скорость пульсирующего потока рассчитывали аналогично, но на основе функции $w_x = f(\tau)$. Расчет степени турбулентности потока Tu воздуха проводили традиционными способами; методики определения Tu для стационарного и пульсирующего потоков воздуха в трубопроводах подробно описаны в [25].

¹ Хинце И.О. Турбулентность: ее механизм и теория. М., Физматгиз, 1963 [Hinze J.O. Turbulence. An introduction to its mechanism and theory. NY, Mc Graw-Hill, 1959].

² Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. М., Мир, 1974 [Bradshaw P. An introduction to turbulence and its measurement. Pergamon Press, 1971].

Относительная неопределенность нахождения $w_x = 5,2\%$, относительная неопределенность определения $\alpha_x = 11,4\%$. Таким образом, создана современная и надежная измерительная система, способная достоверно фиксировать газодинамические и теплообменные характеристики стационарных и пульсирующих потоков в горизонтальном канале.

Нестационарная газодинамика и локальная теплоотдача потоков воздуха в канале. Изменение мгновенных значений локальных параметров w_x и α_x пульсирующего потока воздуха во времени для канала без турбулизирующей вставки показано на рис. 3.

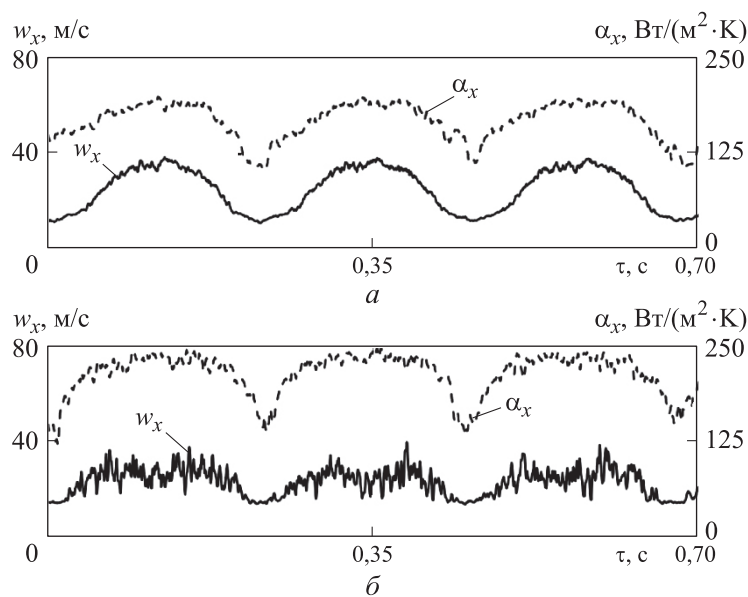


Рис. 3. Функции местных скорости потока воздуха w_x и локального КТО α_x от времени τ в канале без турбулизатора:

a — $Tu = 4\%$ при $f = 4,7$ Гц ($w = 24,7$ м/с); *б* — $Tu = 12\%$ при $f = 4,6$ Гц ($w = 22,8$ м/с)

Показано, что функция $w_x = f(\tau)$ имеет отчетливый периодический вид, определяемый перекрытием канала вращающейся заслонкой (рис. 3, *a*). Максимальные значения w_x достигают примерно 40 м/с, минимальные — около 5 м/с при средней скорости потока в канале $w = 24,7$ м/с. В районе максимумов функции $w_x = f(\tau)$ наблюдаются флуктуации скорости, вызванные естественной неравномерностью течения турбулентного потока воздуха в прямолинейном канале.

Зависимость $\alpha_x = f(\tau)$ также имеет периодический характер (см. рис. 3, *a*). Максимальные значения α_x колеблются в области $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, минимальные — несколько более $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Установлено, что имеет

место явная корреляция функций $w_x = f(\tau)$ и $\alpha_x = f(\tau)$. Есть заметные колебания α_x на зависимости $\alpha_x = f(\tau)$, что может быть вызвано особенностями формирования пограничного слоя в канале вследствие наличия пульсаций потока воздуха.

Установка турбулизирующей вставки ($Tu \approx 12\%$) в канал вызывает существенную деформацию функций $w_x = f(\tau)$ и $\alpha_x = f(\tau)$ (рис. 3, б). Амплитуды колебаний скорости потока воздуха w_x достигают 12 м/с ввиду турбулизации течения. Периодичность функции $w_x = f(\tau)$ при $Tu = 12\%$ сохраняется, но становится менее выраженной.

Максимальные значения α_x заметно возрастают (на 18...23 %) при увеличении степени турбулентности с 4 до 12 % и приблизительно одинаковой средней скорости потока в канале (см. рис. 3). На функции $\alpha_x = f(\tau)$ наблюдается большое число флуктуаций локального КТО, вызванных турбулизацией и неравномерностью течения в канале.

Влияние пульсаций потока воздуха на интенсивность теплоотдачи в прямолинейном канале без турбулизатора можно проследить на рис. 4.

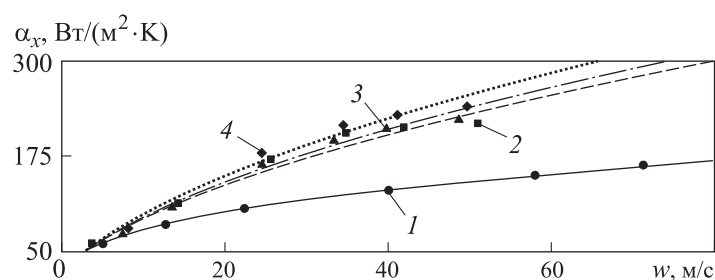


Рис. 4. Зависимость КТО от средней скорости воздуха в трубопроводе без турбулизатора ($Tu = 4\%$) при $f = 0$ (стационарное течение) (1), 4,6 (2), 10 (3), 15,3 Гц (4)

Установлено, что газодинамическая нестационарность (пульсации потока с $f = 4,6$ Гц) вызывает существенный рост КТО на 18...41 % в прямолинейном канале по сравнению со стационарным течением (см. рис. 4). При этом увеличение частоты пульсаций f с 4,6 до 15,3 Гц фактически не влияет на уровень теплоотдачи в канале, имеет место лишь незначительный рост КТО в пределах 10 %. Полученные данные хорошо согласуются с результатами других авторов, подтверждающих, что пульсации потока газа вызывают увеличение α_x в трубопроводных системах [26]. Соответственно, создание газодинамической нестационарности в каналах можно рассматривать в качестве метода интенсификации теплообмена для технических устройств.

Следует отметить, что наличие пульсаций в канале с турбулизатором вызывает рост КТО до 41 % ($f = 5,3$ Гц, $Tu \approx 8$ %). Увеличение частоты пульсаций с 5,3 Гц до 10,6 Гц приводит к существенно меньшей интенсификации теплоотдачи в канале (рост α_x не более 14,5 %). Примечательно, что дальнейшее увеличение частоты пульсаций потока до 16,6 Гц не вызывает роста КТО в трубе. На основании полученных данных можно предположить, что для конкретных конфигураций трубопроводных систем существует определенный оптимальный диапазон пульсаций потока, приводящий к заметной интенсификации теплоотдачи в трубе.

Интенсификацию КТО в пульсирующем течении в сравнении со стационарным случаем можно объяснить прониканием внешних возмущений в пограничный слой и потерей его устойчивости с соответствующим ростом КТО от потока к поверхности канала [27].

Влияние степени турбулентности потока на интенсивность теплоотдачи пульсирующих потоков воздуха в канале показано на рис. 5, а.

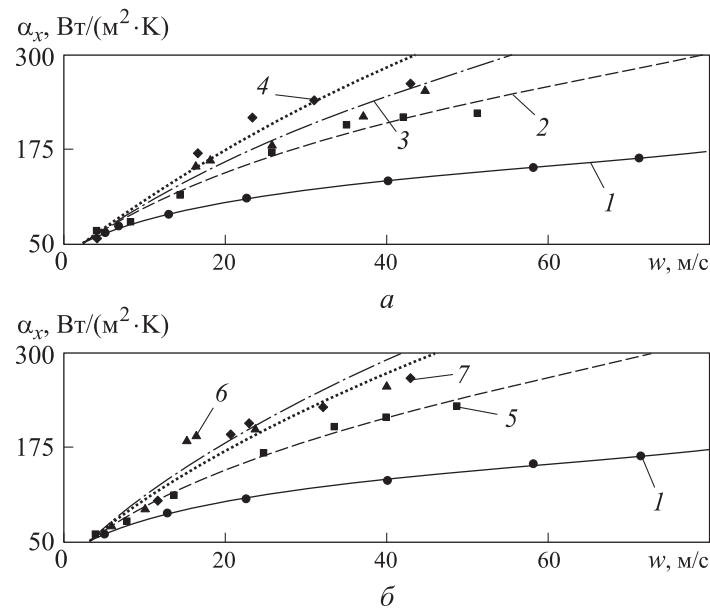


Рис. 5. Зависимости КТО от средней скорости потока воздуха в трубопроводе с турбулизаторами при различных условиях (а, б):

1 — стационарное течение ($Tu = 4$ %); пульсирующий поток: 2 — $Tu = 4$ %, $f = 4,7$ Гц; 3 — $Tu = 8$ %, $f = 5,3$ Гц; 4 — $Tu = 12$ %, $f = 4,6$ Гц; 5 — $Tu = 4$ %, $f = 11$ Гц; 6 — $Tu = 8$ %, $f = 10,6$ Гц; 7 — $Tu = 12$ %, $f = 14$ Гц

Установлено, что совместное влияние газодинамической нестационарности (наличие пульсаций) и турбулизации потока воздуха (Tu до 12 %) вызывает рост КТО в исследуемом канале примерно в 2 раза для $25 < w < 50$ м/с

по сравнению со стационарным течением (см. рис. 5, а). Увеличение степени турбулентности пульсирующего потока с 4 до 12 % приводит к интенсификации теплоотдачи в канале на 15...21 % для фиксированной частоты $f = 4,6$ Гц. Описанные результаты также подтверждаются данными других авторов о том, что рост Tu вызывает увеличение КТО [28]. Соответственно, эта закономерность сохраняется для пульсирующих потоков воздуха в трубопроводных системах и может быть использована для улучшения их тепловой эффективности.

Оценка совокупного воздействия турбулизации Tu и частоты пульсаций f потока воздуха на КТО в горизонтальном канале представлена на рис. 5, б.

Установлено, что максимальное увеличение значений КТО пульсирующего потока воздуха составило 49...51 % по сравнению со стационарным течением в канале. Максимальный эффект достигается при следующих условиях: средняя скорость потока $w \approx 40$ м/с; степень турбулентности $Tu = 8...12$ %; частота пульсаций $f = 10...15$ Гц. Можно предположить, что условия получения максимального роста КТО зависят от конфигурационных и режимных (физических) факторов и должны определяться индивидуально для определенных трубопроводных систем.

Полученные результаты применимы для отладки математических моделей и проектирования газоздушных и трубопроводных элементов технических устройств с рабочим телом, движущимся в пульсирующем режиме.

Заключение. На основе метода тепловой анемометрии получены экспериментальные данные об изменении местной скорости w_x и локального КТО α_x для стационарных и пульсирующих потоков в горизонтальном канале при разных уровнях турбулизации и расходах воздуха.

Установлено, что наличие пульсаций потока вызывает интенсификацию теплоотдачи в канале вплоть до 41 % по сравнению со стационарным движением воздуха.

Показано, что рост Tu пульсирующего потока с 4 до 12 % вызывает интенсификацию КТО в канале на 15...21 %.

Выявлено, что совокупное воздействие пульсаций и турбулизации потока может приводить к росту КТО в канале на 49...51 % по сравнению со стационарным течением.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения математических моделей и распространены на элементы, узлы и системы устройств периодического действия (поршневые компрессоры, двигатели), теплообменные аппараты, пульсационные тепловые трубы и пр. для повышения их тепловой эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Haibullina A., Khairullin A., Balzamor D., et al. Local heat transfer dynamics in the in-line tube bundle under asymmetrical pulsating flow. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 15, art. 5571. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155571>
- [2] Razali Hanipah M., Mikalsen R., Roskilly A.P. The real-time interaction model for transient mode investigations of a dual-piston free-piston engine generator. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 212, art. 118629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118629>
- [3] Alrashidi A., Gaheen O.A., Elsemary I.M.M., et al. An experimental study exploring heat transfer enhancement in tube in tube heat exchanger with pulsating flow. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 248-B, art. 123149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123149>
- [4] Fallahzadeh R., Aref L., Bozzoli F., et al. A novel triple-diameter pulsating heat pipe: flow regimes and heat transfer performance. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2023, vol. 42, art. 101902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101902>
- [5] Plotnikov L. The influence of longitudinal duct profiling on unsteady gas dynamics and the heat transfer of pulsating gas flows in the outlet system of reciprocating-engine. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2024, vol. 55, art. 102977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102977>
- [6] Yang L., Jia X., Qi H., et al. Fast algorithm for calculating the pressure pulsation in a reciprocating compressor system with stepless capacity regulation. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E: J. Process Mech. Eng.*, 2019, vol. 233, no. 6, pp. 1280–1291. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408919866602>
- [7] Молочников В.М., Михеев А.Н., Аслаев А.К. и др. Теплоотдача пучка труб в пульсирующем потоке. *Теплофизика и аэромеханика*, 2019, т. 26, № 4, с. 591–603. EDN: KCDSLS
- [8] Brahma I., Singh S. Experimental, numerical and deep learning modeling study of heat transfer in turbulent pulsating pipe flow. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 244, art. 122685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122685>
- [9] Деев Р. Численный анализ влияния относительного продольного и поперечного шагов на характеристики потока шахматного пучка труб каплевидной формы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 1 (106), с. 95–116. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-95-116>
- [10] Попов И.А., Жукова Ю.В., Баранова Т.А. и др. Теплоотдача и гидравлические потери пучков труб с нанесенными на их поверхность генераторами вихрей. *ИФЖ*, 2023, т. 96, № 6, с. 1586–1602. EDN: PWFSLN
- [11] Duan D., Cheng Yu., Ge M., et al. Experimental and numerical study on heat transfer enhancement by flow-induced vibration in pulsating flow. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 207, art. 118171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118171>

- [12] Кадыров Р.Г., Попов И.А., Жукова Ю.В. и др. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поперечно обтекаемых пучков труб с поверхностными генераторами вихрей. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 6, с. 243–254. DOI: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-6-243-254>
- [13] Wang Ch.Sh., Chen Ch.Ch., Chang W.Ch., et al. Experimental studies of turbulent pulsating flow and heat transfer in a serpentine channel with winglike turbulators. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2022, vol. 131, art. 105837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105837>
- [14] Давлетшин И.А., Душин Н.С., Душина О.А. и др. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление плоского канала с дискретной шероховатостью стенки в виде наклонных траншейных лунок. *Теплофизика и аэромеханика*, 2023, т. 30, № 4, с. 669–674. EDN: GEIMSQ
- [15] Исаев С.А., Никущенко Д.В., Михеев Н.И. и др. Местное ускорение ламинарного потока и аномальная интенсификация теплообмена в канале с двумя рядами наклонных канавок. *ТВТ*, 2024, т. 62, № 4, с. 524–535. EDN: JYMJVL
- [16] Рис В.В., Галаев С.А., Левченя А.М. и др. Численное исследование развитого турбулентного течения и теплоотдачи в канале прямоугольного сечения с односторонним внутренним оребрением. *Теплоэнергетика*, 2024, № 2, с. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.56304/S0040363624020085>
- [17] Nikitin N. Wall friction and heat transfer in turbulent pulsating flow in a square duct. *Int. J. Therm. Sci.*, 2024, vol. 196, art. 108679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108679>
- [18] Guo G., Kamigaki M., Inoue Y., et al. Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 13, art. 3953. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14133953>
- [19] Blythman R., Alimohammadi S., Jeffers N., et al. Heat transfer analysis of laminar pulsating flow in a rectangular channel using infrared thermography. *J. Heat Transfer*, 2022, vol. 144, no. 1, art. 011801. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4052686>
- [20] Chen L., Zhang H., Huang S., et al. Numerical study on structure optimization and heat transfer characteristic of distributed pulsating flow heat exchanger. *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.*, 2022, vol. 44, no. 3, pp. 7080–7094. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2105989>
- [21] Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 196, art. 117275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275>
- [22] Essarroukh I., López J.M. Convective heat transfer in uniformly accelerated and decelerated turbulent pipe flows. *Mathematics*, 2024, vol. 12, no. 22, art. 3560. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12223560>
- [23] Супельняк М.И. Стабилизированная нестационарная теплоотдача в канале с циклически изменяющимся во времени граничным режимом на его поверхности. *ИФЖ*, 2022, т. 95, № 3, с. 623–639. EDN: LZTHJM

- [24] 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, no. 17, art. 6395. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22176395>
- [25] Plotnikov L.V. Experimental research into the methods for controlling the thermal-mechanical characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a turbocharged engine model. *Int. J. Engine Res.*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 334–344. DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087420987360>
- [26] Шукин А.В., Ильинков А.В., Такмовцев В.В. и др. Эффективность тепловой завесы при вдуве пульсирующего потока воздуха (обзор). *Теплоэнергетика*, 2023, № 9, с. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.56304/S0040363623090060>
- [27] 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). *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2024, vol. 233, art. 126041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126041>
- [28] Terekhov V.I. Heat transfer in highly turbulent separated flows: a review. *Energies*, 2021, vol. 14, art. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14041005>

Плотников Леонид Валерьевич — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Турбины и двигатели» УрФУ (Российская Федерация, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Осипов Леонид Евгеньевич — старший преподаватель кафедры «Турбины и двигатели» УрФУ (Российская Федерация, 620062, Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Плотников Л.В., Осипов Л.Е. Влияние степени турбулентности и пульсаций потока газа на интенсивность теплоотдачи в прямолинейном канале. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 1 (124), с. 81–96. EDN: WJBDWY

INFLUENCE OF THE TURBULENCE NUMBER AND GAS FLOW PULSATIONS ON THE HEAT TRANSFER INTENSITY IN A STRAIGHT CHANNEL

L.V. Plotnikov

L.E. Osipov

plotnikovlv@mail.ru

osipov.leonid@urfu.ru

UrFU, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract

The working fluid moving in a non-stationary (pulsating) mode is the basis of many technical and technological installations. In this regard, it is important to clarify the physical mechanism of the effect of pulsations and turbulence of the flow on the intensity of air heat transfer in the channel for different boundary conditions through an experimental approach. The article examines a single, straight pipe with a length of 1300 mm and a diameter of 30 mm (43 calibers). The range of Reynolds numbers $Re = 10,000\text{--}140,000$ (developed turbulent flow regime). The flow pulsations in the channel were created using a rotating damper with a frequency of 4–16 Hz. The flow turbulence number varied within 4–12 % using the installation of various flat plate inserts in the pipe. The thermal anemometry method is used to obtain data on non-stationary values of velocity and local heat transfer coefficient. The degree of influence of gas dynamic non-stationarity on the intensity of heat transfer in the channel is shown. It was found that an increase in the turbulence number of the pulsating flow to 12 % increases the heat transfer coefficient by 15–21 %. The maximum increase in the intensity of heat transfer (by 49–51 %) from the combined effect of pulsations and turbulence of the air flow in the channel is determined. The results obtained are applicable for debugging mathematical models and designing pipeline elements of technical systems with a working fluid moving in a pulsating mode

Keywords

Straight pipe, pulsating air flow, local heat transfer coefficient, turbulence number, physical modeling

Received 21.03.2025

Accepted 03.12.2025

© Author(s), 2026

The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-19-00001)

REFERENCES

- [1] Haibullina A., Khairullin A., Balzamorov D., et al. Local heat transfer dynamics in the in-line tube bundle under asymmetrical pulsating flow. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 15, art. 5571. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155571>
- [2] Razali Hanipah M., Mikalsen R., Roskilly A.P. The real-time interaction model for transient mode investigations of a dual-piston free-piston engine generator. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 212, art. 118629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118629>
- [3] Alrashidi A., Gaheen O.A., Elsemary I.M.M., et al. An experimental study exploring heat transfer enhancement in tube in tube heat exchanger with pulsating flow. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 248-B, art. 123149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123149>

- [4] Fallahzadeh R., Aref L., Bozzoli F., et al. A novel triple-diameter pulsating heat pipe: flow regimes and heat transfer performance. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2023, vol. 42, art. 101902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101902>
- [5] Plotnikov L. The influence of longitudinal duct profiling on unsteady gas dynamics and the heat transfer of pulsating gas flows in the outlet system of reciprocating-engine. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2024, vol. 55, art. 102977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102977>
- [6] Yang L., Jia X., Qi H., et al. Fast algorithm for calculating the pressure pulsation in a reciprocating compressor system with stepless capacity regulation. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part E: J. Process Mech. Eng.*, 2019, vol. 233, no. 6, pp. 1280–1291. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954408919866602>
- [7] Molochnikov V.M., Mikheev A.N., Aslaev A.K., et al. Heat transfer of a tube bundle in a pulsating flow. *Thermophys. Aeromech.*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 547–559. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864319040073>
- [8] Brahma I., Singh S. Experimental, numerical and deep learning modeling study of heat transfer in turbulent pulsating pipe flow. *Appl. Therm. Eng.*, 2024, vol. 244, art. 122685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122685>
- [9] Deeb R. Numerical analysis of the effect of longitudinal and transverse pitch ratio on the flow characteristic of staggered drop-shaped tubes bundle. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 1 (106), pp. 95–116 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-95-116>
- [10] Popov I.A., Zhukova Yu.V., Baranova T.A., et al. Heat transfer and hydraulic losses of tube bundles with vortex generators indented on their surface. *J. Eng. Phys. Thermophys.*, 2023, vol. 96, no. 6, pp. 1576–1592. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02829-3>
- [11] Duan D., Cheng Yu., Ge M., et al. Experimental and numerical study on heat transfer enhancement by flow-induced vibration in pulsating flow. *Appl. Therm. Eng.*, 2022, vol. 207, art. 118171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118171>
- [12] Kadyrov R.G., Popov I.A., Zhukova Yu.V., et al. Experimental study of thermal and aerodynamic characteristics of transversely streamlined tube bundles with vortex generators. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2022, vol. 14, no. 6, pp. 243–254 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-6-243-254>
- [13] Wang Ch.Sh., Chen Ch.Ch., Chang W.Ch., et al. Experimental studies of turbulent pulsating flow and heat transfer in a serpentine channel with winglike turbulators. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 2022, vol. 131, art. 105837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105837>
- [14] Davletshin I.A., Dushin N.S., Dushina O.A., et al. Heat transfer and hydraulic resistance of a flat channel with discrete wall roughness in the form of inclined trench dimples. *Thermophys. Aeromech.*, 2023, vol. 30, no. 4, pp. 631–636. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864323040030>

- [15] Isaev S.A., Nikushchenko D.V., Mikheev N.I., et al. Local acceleration of a laminar flow and anomalous enhancement of heat transfer in a channel with two rows of inclined grooves. *High Temp.*, 2024, vol. 62, no. 4, pp. 460–470.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X25700099>
- [16] Ris V.V., Galaev S.A., Levchenya A.M., et al. Numerical investigation of a developed turbulent flow and heat transfer in a rectangular channel with single-sided internal ribs. *Therm. Eng.*, 2024, vol. 71, no. 2, pp. 167–175.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601524020083>
- [17] Nikitin N. Wall friction and heat transfer in turbulent pulsating flow in a square duct. *Int. J. Therm. Sci.*, 2024, vol. 196, art. 108679.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108679>
- [18] Guo G., Kamigaki M., Inoue Y., et al. Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipes. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 13, art. 3953. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14133953>
- [19] Blythman R., Alimohammadi S., Jeffers N., et al. Heat transfer analysis of laminar pulsating flow in a rectangular channel using infrared thermography. *J. Heat Transfer*, 2022, vol. 144, no. 1, art. 011801. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4052686>
- [20] Chen L., Zhang H., Huang S., et al. Numerical study on structure optimization and heat transfer characteristic of distributed pulsating flow heat exchanger. *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.*, 2022, vol. 44, no. 3, pp. 7080–7094.
DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2105989>
- [21] Ye Q., Zhang Y., Wei J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement. *Appl. Therm. Eng.*, 2021, vol. 196, art. 117275.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117275>
- [22] Essarroukh I., López J.M. Convective heat transfer in uniformly accelerated and decelerated turbulent pipe flows. *Mathematics*, 2024, vol. 12, no. 22, art. 3560.
DOI: <https://doi.org/10.3390/math12223560>
- [23] Supelnyak M.I. Stabilized nonstationary heat transfer in a channel with a boundary regime on its surface, that varies cyclically with time. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2022, vol. 95, no. 3, pp. 608–624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02517-8>
- [24] 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, no. 17, art. 6395. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22176395>
- [25] Plotnikov L.V. Experimental research into the methods for controlling the thermal-mechanical characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a turbocharged engine model. *Int. J. Engine Res.*, 2022, vol. 23, no. 2, pp. 334–344.
DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087420987360>
- [26] Shchukin A.V., Ilinkov A.V., Takmovtsev V.V., et al. The effectiveness of film cooling with injection of pulsating air flow (review). *Therm. Eng.*, 2023, vol. 70, no. 9, pp. 639–649. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601523090069>

[27] 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). *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2024, vol. 233, art. 126041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.126041>

[28] Terekhov V.I. Heat transfer in highly turbulent separated flows: a review. *Energies*, 2021, vol. 14, art. 1005. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14041005>

Plotnikov L.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Turbines and Engines, UrFU (Mira ul. 19, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation).

Osipov L.E. — Assist. Lecturer, Department of Turbines and Engines, UrFU (Mira ul. 19, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Plotnikov L.V., Osipov L.E. Influence of the turbulence number and gas flow pulsations on the heat transfer intensity in a straight channel. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 1 (124), pp. 81–96 (in Russ.). EDN: WJBDWY