

УДК 532.517.6

Экспериментальное исследование пульсирующего потока в прямоугольном канале*

Н.А. Назаров, А.С. Герасимов, В.В. Терехов, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: nazarov.nik.an@gmail.com

Создана экспериментальная установка для изучения аэродинамики пульсирующего течения в плоском канале размером 20×150×600 мм. Пульсации расхода газа создавались за счет вращения заслонки, полностью перекрывающей канал. Заслонка располагалась за рабочим участком, а установка работала в режиме всасывания воздуха из окружающего пространства. Исследования выполнены с помощью PIV-метода с синхронизацией измерительной системы с углом поворота заслонки. Опыты проведены при частоте пульсаций $F = 8$ Гц. Результаты экспериментов непосредственно сравниваются со случаем стационарного течения при неподвижной заслонке, но с тем же углом поворота, что и при фазовом осреднении. Установлено, что в данных условиях наложенные пульсации расхода слабо сказываются на профилях продольных скоростей, интегральных характеристиках пристенного слоя и коэффициенте трения, что свидетельствует о квазистационарном режиме течения в канале.

Ключевые слова: пульсирующий поток, экспериментальное исследование, пристенный слой, PIV-измерения.

Введение

Исследования пульсирующих течений обусловлены активным применением последних в современной биомедицине [1], при изучении природных явлений [2], в энергетике и машиностроении [3], при повышении эффективности охлаждения микроэлектроники [4]. В современных электронных устройствах и интегральных микросхемах часто возникает необходимость улучшения теплообмена путем использования набегающего потока жидкости. Однако из-за сложной геометрии в указанных системах как правило возникают области рециркуляции, которые приводят к понижению локального и интегрального теплообмена. При наличии пульсаций расхода в потоке жидкости естественно ожидать изменений теплообмена, поскольку периодические возмущения определенной частоты могут воздействовать на когерентные структуры потока, ослабляя их влияние, а также влиять на структуру пристенного слоя.

Толчком для развития исследований пульсирующих потоков послужили численные работы [5, 6], в которых было обнаружено наличие резонансов в коэффициенте усиления

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 24-19-00358).

теплообмена на определенных частотах в системе периодических каверн в прямоугольном канале. Присутствие резонансов в коэффициенте усиления теплообмена подтверждается во многих экспериментальных работах, однако этот феномен сильно зависит от геометрии канала. В работах, где использовался канал с более плоской геометрией наблюдались незначительные изменения интегрального теплообмена [7–9]. В работе [7] исследовался плоский канал со ступенчатым входом, при увеличении частоты пульсаций расхода наблюдалось уменьшение усредненного числа Nu до значений ниже отметки стационарного случая. Аналогичный результат был получен в работе [8], где рассматривался поток в гладкой цилиндрической трубе. В работе [9] изучался пульсирующий поток в плоском канале с ребрами. Было отмечено ухудшение теплообмена в сравнении со стационарным случаем.

В системах с более сложной геометрией, при которой области рециркуляции потока достигают порядка линейного размера, было обнаружено присутствие ярко выраженных резонансов при усилении теплообмена на определенной частоте [10–12]. Так, в работах [10, 11] рассматривался канал с множественными кавернами, а в работе [12] проводились эксперименты с синусоидальным каналом. При этом положение резонансного пика смещалось в область более высоких частот при повышении числа Рейнольдса.

Большой практический интерес представляют исследования аэродинамики и теплообмена пульсирующих течений в гладких каналах, к которым относятся проточные тракты теплообменников. В качестве примера можно привести экспериментальные работы [13, 14], где были проанализированы профили средних по времени скоростей турбулентного пульсирующего потока, а также турбулентные пульсации и рейнольдсовы напряжения. Также большое внимание в литературе уделяется разработке методов расчета течения и теплообмена в каналах при наличии пульсаций расхода [15, 16].

Однако несмотря на большое количество публикаций, посвященных изучению пульсирующих потоков, процессы, происходящие в пристенных слоях, недостаточно полно изучены. В настоящей работе проведены PIV-измерения характеристик пульсирующего потока в плоском канале, таких как осредненные по времени профили скорости и их пульсации, а также такие параметры пристенного слоя как толщины вытеснения, потери импульса, формпараметра и коэффициенты сопротивления трения в зависимости от фазы течения. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными при отсутствии вынужденных пульсаций расхода.

Экспериментальная установка и методика измерений

Исследование пульсирующих потоков ввиду их нестационарности требует получения большого количества экспериментальных данных. Для этих целей наиболее широко применяется методика PIV (Particle Image Velocimetry). Эксперименты проводились в плоском прозрачном канале длиной 600 мм с поперечным сечением $20 \times 150 \text{ мм}^2$ (рис. 1). Пульсации расхода создавались вращающейся заслонкой, по конструкции аналогичной используемой в работах [11, 12, 17]. Для исключения влияния заслонки на аэродинамику течения она располагалась позади рабочего канала и весь аэродинамический тракт работал на всасывание. На входе в канал был установлен профилированный конфузور со степенью сжатия $m = 5,6$, который приводил к выравниванию профиля скорости. Засеивание потока производилось путем подачи частиц глицерина из генератора аэрозоля конденсационного типа в специальный кубический объем со стороной $\sim 1 \text{ м}$, из которого смесь воздуха с частицами передавалась в рабочий канал. Стенки объема были проницаемыми.

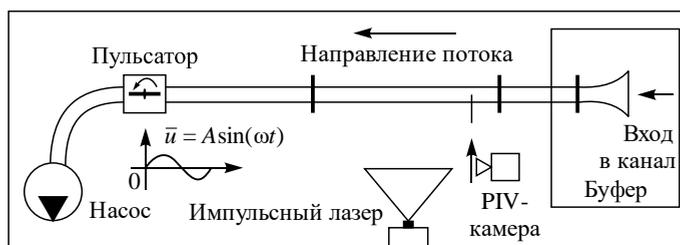


Рис. 1. Схема измерительного стенда.

Измеряемое сечение канала находилось на расстоянии 650 мм до оси вращения заслонки и 800 мм — до входа в канал. В качестве источника вращения использовался трехфазный асинхронный двигатель АИР71 В2 с частотным приводом и рабочей частотой от 2 до 70 Гц.

PIV-система состояла из монохромной скоростной камеры Jai, с разрешением 2048×2048 пикселей, двойного импульсного лазера Veamtech Vlite 200 с длиной волны 532 нм и синхронизатора марки «ПОЛИС». PIV-система была синхронизована с углом поворота заслонки с шагом в 15° посредством оптического датчика, что позволило получить осредненные для отдельно взятой фазы значения скорости потока. Ввиду симметрии заслонки относительно оси канала полный период изменения расхода соответствовал повороту заслонки на 180°. Задержка между поступлением сигнала с оптического датчика и срабатыванием импульсного лазера составляла порядка 200 мкс. Система, состоящая из канала, лазера и скоростной камеры, была расположена на направляющих рельсах для обеспечения ортогональности частей и устойчивости к внешним вибрациям.

Методом PIV были измерены поля скоростей и флуктуации потока при частоте пульсаций 8 Гц в диапазоне фаз от -30° до 210° . Аналогичные измерения были выполнены при фиксированном положении заслонки пульсатора для каждой фазы изменения расхода. Число Рейнольдса Re , рассчитанное по осредненной по сечению и времени скорости и гидравлическому диаметру, было равно $1,37 \cdot 10^4$, что соответствовало турбулентному течению. Число Струхалия, также рассчитанное по средней скорости в эксперименте и высоте канала, составляло $St = 0,049$. Экспериментальное исследование было организовано так, чтобы условия течения в канале были идентичными для стационарного и пульсирующего случаев. Поскольку канал работал на всасывание, то на выходе из него поддерживалось одно и то же разрежение или мощность, затрачиваемая на прокачку теплоносителя.

Для получения полей скорости из экспериментальных фотоснимков была использована разработанная в ИТ СО РАН программная библиотека TorchPIV [18]. В качестве алгоритма анализа PIV-эксперимента применялся итеративный кросскорреляционный метод с двумя итерациями, непрерывным смещением окна поиска частиц и размерами окна поиска 64×64 пикселей для первой итерации и 32×32 пикселей на второй итерации.

Результаты измерений и их обсуждение

Изменение продольной компоненты скорости U_0 на оси канала в различные фазы пульсирующего течения демонстрируется на рис. 2. Здесь же представлены данные для случая неподвижной заслонки при различных углах ее поворота. Как видно, изменения скорости в случаях вращающейся и неподвижной заслонки подобны между собой.

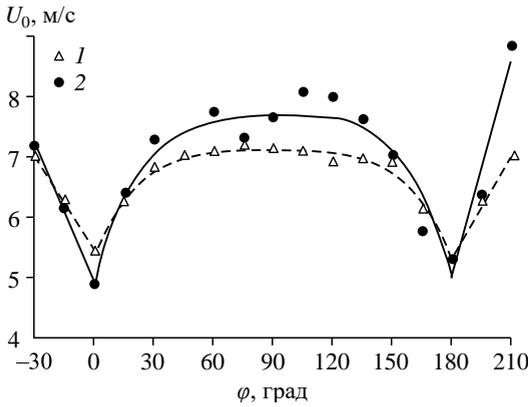


Рис. 2. Значения осевой скорости потока при различных фазах течения для неподвижной (1) и вращающейся с частотой 8 Гц (2) заслонки. 1 — стационарное течение, 2 — пульсирующее течение с частотой 8 Гц.

При этом наблюдалось небольшое отклонение от гармонического закона, а амплитуда изменения скорости в эксперименте составляла примерно $A = 0,4$.

Из рис. 2 также следует, что колебания скорости на оси канала совпадают

по фазе с вращением заслонки. Так при полностью закрытой заслонке ($\varphi = 0^\circ$ и 180°) скорость потока минимальна, а при ее открытии ($\varphi = 90^\circ$) скорость достигает максимального значения. Такой характер изменения во времени скорости, по-видимому, объясняется особенностями формирования пульсирующего течения в канале, работающего в режиме всасывания воздуха из окружающей атмосферы.

Эволюцию пульсирующего течения во времени можно проследить на рис. 3, где показаны профили продольной компоненты скорости в сечении, расположенном на расстоянии $x = 800$ мм от входа в канал, осредненные по фазе. Профили скорости являются типичными для турбулентных стационарных течений в каналах [19]. Отличие состоит только в изменении абсолютного значения скорости при различных фазах колебаний пульсирующего потока.

Измерения показали, что при отсутствии вынужденных пульсаций потока, но при изменении угла наклона заслонки, профили продольной скорости практически не отличаются от таковых в пульсирующем течении. В этом можно убедиться, обратившись к рис. 4, где представлены профили скорости в безразмерной форме, принятой в теории пристенного слоя [20]. При этом в качестве масштаба скорости используется ее значение на оси канала, а в качестве линейного масштаба — толщина потери импульса δ^{**} . Эта величина определяется путем интегрирования: $\delta^{**} = \int \omega (1 - \omega) dy$, где $\omega = U/U_0$ — относительная продольная скорость. Как видно, результаты измерений для вращающейся и для неподвижной заслонок хорошо совпадают между собой при всех фазах и лежат

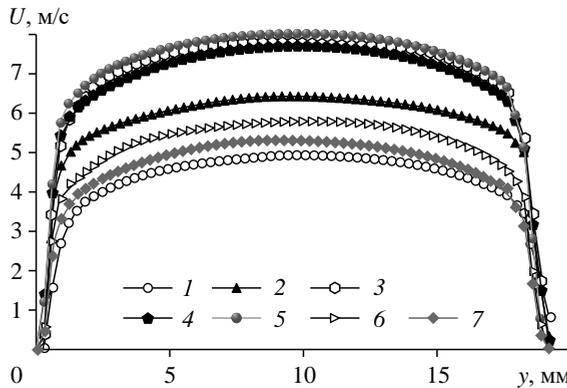


Рис. 3. Профили продольной компоненты скорости при различных фазах колебаний расхода. $\varphi = 0^\circ$ (1), 15° (2), 60° (3), 90° (4), 120° (5), 165° (6), 180° (7).

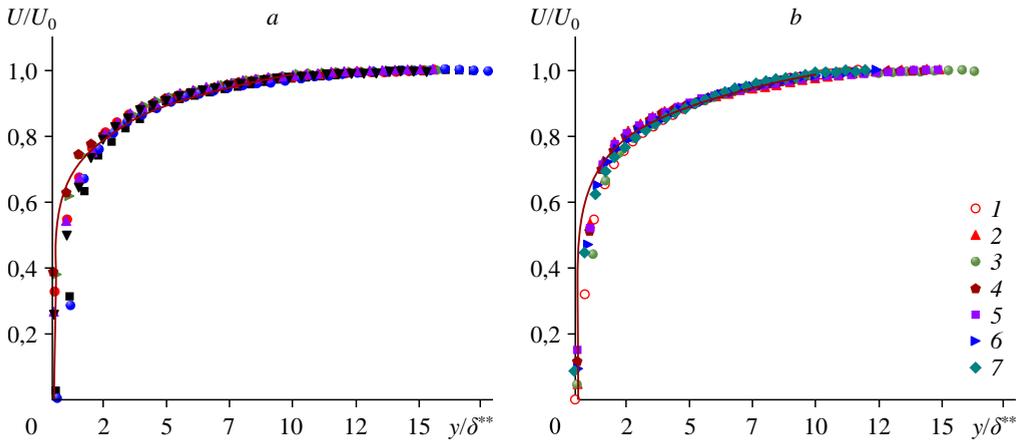


Рис. 4. Безразмерный профиль скорости в канале при наличии (а) и в отсутствие (б) вынужденных пульсаций.

Линии — степенной профиль скорости с $n = 1/7$;
 $\varphi = 0^\circ$ (1), 15° (2), 60° (3), 90° (4), 120° (5), 165° (6), 180° (7).

достаточно близко к степенному профилю скорости в развитом турбулентном пристенном слое, описываемому соотношением $\omega = 0,716(y/\delta^{**})^{1/7}$ [19]. Линии на рис. 4 соответствуют расчету по данной формуле.

Изменение интегральных характеристик пристенного слоя в течение одного периода колебаний демонстрируется на рис. 5. Здесь представлены данные для толщины потери импульса δ^{**} , толщины вытеснения $\delta^* = \int (1 - \omega) dy$ и формпараметра пристенного слоя $H = \delta^*/\delta^{**}$. Горизонтальные линии на этом рисунке соответствуют измерениям при отсутствии пульсаций расхода при полностью открытой заслонке.

Как и следовало ожидать, интегральные линейные масштабы пульсирующего потока в канале довольно слабо изменяются на протяжении периода колебаний. Такой вывод подтверждается данными рис. 4, поскольку при подобии профилей скоростей в канале интегральные характеристики должны быть неизменными. Можно отметить наличие незначительных максимумов в положении закрытой заслонки, однако на протяжении большей части периода колебаний существенной деформации профиля скорости

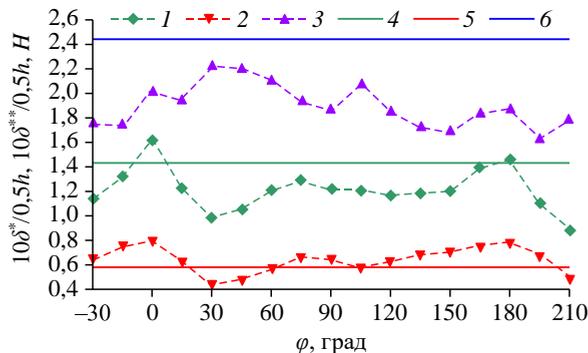


Рис. 5. Изменение во времени интегральных характеристик пристенного слоя при наличии пульсаций расхода газа.

1–3 — значения характеристик δ^* (1), δ^{**} (2) и H (3) при наличии пульсаций, 4–6 — значения характеристик δ^* (4), δ^{**} (5) и H (6) при открытой заслонке (в отсутствие пульсаций).

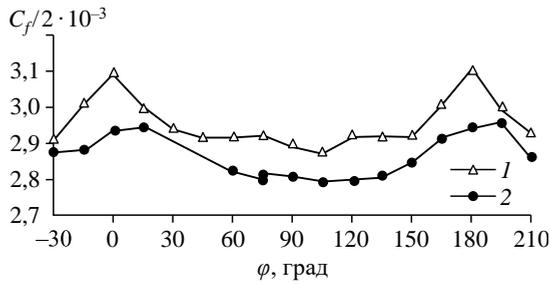


Рис. 6. Коэффициент поверхностного трения в стационарном и пульсирующем потоках.

1 — стационарное течение,
2 — пульсирующее течение ($f = 8$ Гц).

не наблюдается и опытные данные по толщинам вытеснения и потери импульса близки к результатам для случая стационарного течения.

Отмеченная консервативность поведения интегральных характеристик в пульсирующем потоке присуща и изменению коэффициента трения на стенке канала. Для его нахождения использовался метод Клаузера, который заключается в подборе данного параметра по логарифмическому участку турбулентного профиля скорости. Величина коэффициента сопротивления трения в различные фазы периода колебаний показана на рис. 6. Точно так же, как и на рис. 5, в фазе полного перекрытия канала ($\varphi = 0^\circ$ и 180°) имеет место небольшое возрастание коэффициента трения, которое не превышает 10 %. Примерно на такую же величину отличаются результаты измерений и для случая стационарного течения газа в канале. При этом величина трения оказалась несколько выше, чем в пульсирующем потоке. Причины такого поведения турбулентного трения требуют более детального изучения.

Заключение

Методом PIV при использовании фазового осреднения проведены измерения аэродинамических характеристик пульсирующего турбулентного течения в плоском канале. Частота пульсаций расхода являлась постоянной — $F = 8$ Гц, а амплитуда $A = 0,4$. Профили продольной компоненты скорости в различные моменты времени хорошо обобщаются между собой и описываются степенным распределением скорости с $n = 1/7$. Кроме того, эти результаты измерений совпадают с данными для случая с неподвижной заслонкой при одном и том же угле поворота. Интегральные параметры пристенного слоя, такие как толщины вытеснения, потери импульса и формпараметр, оказались консервативными по отношению к пульсациям расхода газа, за исключением небольших максимумов в фазе полного перекрытия канала. Такая же тенденция наблюдается и в поведении коэффициента трения на стенке и его изменение не превышает 10 % на протяжении всего периода колебаний, что свидетельствует о возможности использования квазистационарного приближения при описании динамики пульсирующего потока в рассматриваемых условиях.

Список литературы

1. Herrera-Valencia E.E., Calderas F., Medina-Torres L., Pérez-Camacho M., Moreno L. On the pulsating flow behavior of a biological fluid: human blood // *Rheol. Acta*. 2017. Vol. 56, No. 4. P. 387–407.
2. Li Y.Z., Li G.B., Xu T.W., Liu H.S., Ren S.M., Yan D.Z., Yang P.L. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters // *Irrig. Sci*. 2012. Vol. 30. P. 43–56.

3. **Cumpsty N.A., Greitzer E.M.** A Simple model for compressor stall cell propagation // J. Engng Power. 1982. Vol. 104, No. 1. P. 170–176.
4. **Sheriff H.S., Zumbrunnen D.A.** Effect of flow pulsations on the cooling effectiveness of an impinging jet // J. Heat Transfer. 1994. Vol. 116, No. 4. P. 886–895.
5. **Ghaddar N.K., Korczak K.Z., Mikic B.B., Patera A.T.** Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels. Pt 1. Stability and self-sustained oscillations // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 163. P. 99–127.
6. **Ghaddar N.K., Magen N., Mikic B.B., Patera A.T. et al.** Numerical investigation of incompressible flow in grooved channels. Pt 2. Resonance and oscillatory heat-transfer enhancement // J. Fluid Mech. 1986. Vol. 168. P. 541–567.
7. **Davletshin I.A., Mikhееv N.I., Paereliy A.A., Gazizov I.M.** Convective heat transfer in the channel entrance with a square leading edge under forced flow pulsations // Intern. J. Heat Mass Transf. 2019. Vol. 129. P. 74–85.
8. **Elshafei E.A.M., Mohamed M.S., Mansour H., Sakr M.** Experimental study of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2008. Vol. 29, Iss. 4. P. 1029–1038.
9. **Jarosinski W.** Experimental study of heat transfer from the heated rib-roughed wall to a steady or pulsating flow // SAE Tech. Paper. 2001. No. 724. 11 p.
10. **Pan J., Bian Y., Liu Y., Zhang F., Yang Y., Arima H.** Characteristics of flow behavior and heat transfer in the grooved channel for pulsatile flow with a reverse flow // Intern. J. Heat Mass Transf. 2020. Vol. 147. P. 118932–118932–15.
11. **Zontul H., Şahin B.** Experimental investigation of convective heat transfer performance and hydrodynamics of pulsating flow through the rectangular grooved channel // Exp. Therm. Fluid Sci. 2023. Vol. 141. P. 110796–110796–21.
12. **Kurtulmuş N., Sahin B.** Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels // Intern. J. Mech. Sci. 2020. Vol. 167. P. 105268–1–105268–51.
13. **Гольцман А.Е., Давлетшин И.А., Михеев Н.И., Паерелий А.А.** Касательные напряжения в турбулентном пульсирующем потоке в канале // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 3. С. 333–342.
14. **Гольцман А.Е., Давлетшин И.А., Паерелий А.А.** PIV-метод для исследования структуры пульсирующего течения в гладком канале // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 3. С. 367–374.
15. **Валуева Е.П., Зюкин В.С.** Теплообмен на начальном гидродинамическом участке плоского канала с граничными условиями первого рода на стенках при ламинарном пульсирующем течении // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60, вып. 1. С. 56–62.
16. **Ray S., Ünsal B., Durst F.** Development length of sinusoidally pulsating laminar pipe flows in moderate and high Reynolds number regimes // Intern. J. Heat and Fluid Flow. 2012. Vol. 37. P. 167–176.
17. **Давлетшин И.А., Михеев Н.И.** Структура течения и теплообмен при отрыве пульсирующего потока // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 3. С. 442–449.
18. **Nazarov N.A., Terekhov V.V.** High level GPU-accelerated 2D PIV framework in Python // Comput. Phys. Commun. 2024. P. 109009–1–109009–9.
19. **Волчков Э.П., Семенов С.В.** Основы теории пограничного слоя. Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 1994. 224 с.
20. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 749 с.

*Статья поступила в редакцию 19 августа 2024 г.,
после доработки — 18 сентября 2024 г.,
принята к публикации 8 февраля 2024 г.*