

УДК 532.5.032, 532.582.31, 532.542

Исследование динамики крупномасштабных вихревых структур в колеблющейся струе, истекающей в щелевой канал*

М.В. Шестаков, Д.М. Маркович

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

E-mail: maximvsh@gmail.com

Выполнено экспериментальное исследование истечения осциллирующей затопленной турбулентной струи в щелевой канал высотой $h = 4$ мм. Колеблущаяся турбулентная струя создавалась при помощи струйного осциллятора с двумя каналами обратной связи и шириной горловины выходного сопла $d = h$. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Измерения двухкомпонентных полей скорости проводились при помощи PIV-метода с высоким временным разрешением до 5 кГц. Получены данные о структуре и динамике течения колеблющейся турбулентной струи в щелевом канале в диапазоне чисел Рейнольдса от 1500 до 8000. Показано, что при истечении струи в щелевой канал формируются устойчивые крупномасштабные квазидвумерные вихревые структуры. Частота прохождения данных структур определяется частотой колебания струи, генерируемой струйным осциллятором. Анализ сопоставления результатов исследования с имеющимися в литературе экспериментальными данными показал, что в случае щелевого канала с соотношением $h/d = 1$ наблюдается уменьшение угла колебания струи, изменение распределения средних и пульсационных характеристик колеблющейся струи, а также уменьшение безразмерной частоты колебания струи с увеличением числа Re.

Ключевые слова: струйный осциллятор, колеблющаяся турбулентная струя, динамика вихревых структур, TR-PIV метод, щелевой канал.

Введение

Активные методы управления потоком широко внедряются в различные области автомобилестроения, турбостроения и авиастроения [1]. В настоящее время струйные осцилляторы достаточно распространены и активно используются в качестве управляющих элементов в большом спектре технических приложений, в том числе для управления отрывом потока [2], снижения трения [3], охлаждения лопаток турбин [4], интенсификации горения [5] и теплообмена [6]. Заметный интерес к струйным осцилляторам возник благодаря их свойствам. Они работают в большом диапазоне скоростей, обеспечивают широкий диапазон частот колебаний, не имеют движущихся частей и при этом обладают простой конструкцией. Наиболее распространенными являются струйные

* Исследование затопленной осциллирующей струи в щелевом канале выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-79-30075); исследование неограниченной затопленной осциллирующей струи выполнено в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

осцилляторы с двумя каналами обратной связи, которые генерируют автоколебания струи с частотой, линейно зависящей от расхода жидкости, подаваемой на вход осциллятора [7].

Основное количество работ по исследованию колеблющейся струи, генерируемой струйным осциллятором, проведено в условиях свободного, пристенного и импактного истечения. Истечение колеблющейся струи в ограниченную плоскими стенками внешнюю область — щелевой канал — может иметь ряд преимуществ при развитии методов интенсификации теплообмена, например, за счет генерации продольных вихревых структур, формирующихся в щелевых сдвиговых течениях [8]. Однако исследованию динамики и структуры течения колеблющейся струи в ограниченном пространстве, которое реализуется в ряде технических приложений, посвящено всего несколько работ [9–11]. Результаты этих работ показали, что в определенном диапазоне чисел Рейнольдса колебательные движения струи, генерируемые струйным осциллятором, прекращаются вследствие устойчивого присоединения струи к стенке струйного осциллятора в одном из крайних положений. Авторы связывают это присоединение с проявлением эффекта Коанда, усиливающимся за счет формирования интенсивной вихревой структуры наподобие присоединения плоской струи к стенке [12]. Однако данные, полученные в работах [9–11], не дают четкого представления о механизме ее формирования. Кроме того, авторами не проводится анализ влияния геометрических соотношений ограниченной области, приводящих к присоединению струи и прекращению штатной работы осциллятора. Основываясь на результатах исследования истечения турбулентных струй в щелевые каналы [8], можно предположить, что уменьшение высоты канала и ограничение подвода вовлекаемой жидкости могло бы стабилизировать течение колеблющейся струи и обеспечить стабильную работу струйного осциллятора. Таким образом, цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании динамики вихревых структур колеблющейся струи в щелевом канале, генерируемой струйным осциллятором с двумя каналами обратной связи и соотношением сторон сопла, равном единице.

Параметры эксперимента и измерительной системы

Экспериментальные исследования динамики течения колеблющейся струи проводились на гидродинамическом стенде, оснащенный системами контроля расхода и термостабилизации рабочей жидкости, насосом, баком постоянного уровня и рабочим участком. Рабочий участок представлял собой щелевой канал, образованный двумя плоскопараллельными оргстеклянными пластинами, установленными на расстоянии $h = 4$ мм друг от друга. Модель жидкостного осциллятора толщиной h устанавливалась внутрь щелевого канала так, что стенки канала одновременно являлись стенками струйного осциллятора (рис. 1). Ширина горловины выходного сопла осциллятора составляла $d = 4$ мм, что обеспечивало соотношение сторон $d/h = 1$. Угол раствора выхода осциллятора α был равен 99° . В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. В отличие от работ [9–11], где жидкостный осциллятор имел конечную ширину ($16d$), в представленной работе ширина вставки с профилем струйного осциллятора равнялась ширине щелевого канала ($52d$) (рис. 1а). Число $Re = d \cdot U_Q / \nu$, рассчитанное по d и среднерасходной скорости на выходе осциллятора U_Q ($0,37 - 1,96$ м/с), варьировалось в диапазоне от 1500 до 8000. Измерения проводились с помощью высокоскоростной измерительной TR-PIV (Time Resolved Particle Image Velocimetry) системы «Полис», в состав которой входили сдвоенный Nd:YLF-лазер New wave Pegasus (10 мДж, 527 нм,

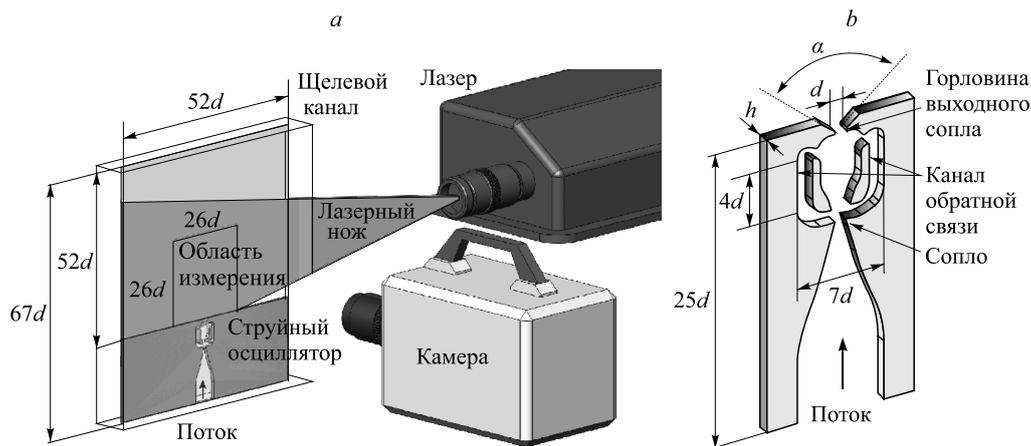


Рис. 1. Схема рабочего участка и расположения измерительной системы (а), геометрия и параметры струйного осциллятора (b).

180 нс), камера Photron FASTCAM SA5 (12 бит, 1024×1024 пикс., 7 кГц), объектив NIKKOR Micro Nikon с фокусным расстоянием 60 мм и синхронизирующий процессор «Полис» (рис. 1а). Толщина лазерного ножа в измерительной области составляла 0,7 мм. Камера устанавливалась по нормали к стенке щелевого канала. Измерительная область размером $105 \times 105 \text{ мм}^2$ располагалась в средней плоскости щелевого канала. В качестве трассеров использовались полиамидные частицы диаметром 20 мкм (1,05 кг/л). Частота съемки в зависимости от числа Re варьировалась от 1 кГц ($Re = 1500$) до 5 кГц ($Re = 8000$). Для каждого числа Re были получены временные последовательности из 8000 изображений. Обработка изображений выполнялась с помощью программного обеспечения ActualFlow. Корреляционный анализ проводился с использованием итерационного многосеточного алгоритма с непрерывным смещением расчетного окна. При расчете скорости было выполнено четыре итерации: по две с разрешением 32×32 и 16×16 пикселей. Пространственное разрешение с учетом 75 % перекрытия на последней итерации составило $0,83 \times 0,83 \text{ мм}^2$ на один вектор скорости.

Результаты эксперимента

Результаты исследования показали, что распределения продольной и поперечной компонент средней скорости существенно отличаются для случаев свободной [9], полуограниченной [9], а также ограниченной колеблющейся струи при высоких числах Рейнольдса ($Re > 2680$) [10]. Увеличение числа Re слабо влияет на распределения безразмерных осредненных характеристик колеблющейся турбулентной струи в щелевом канале.

На рис. 2 представлены измеренные безразмерные профили продольной и поперечной компонент скорости, которые демонстрируют существенные различия между истечением колеблющейся струи в неограниченный объем (сплошные линии) и щелевой канал (штриховые линии). Экспериментальные данные по истечению неограниченной осциллирующей струи, генерируемой струйным осциллятором с $h = d = 4 \text{ мм}$ (рис. 1b) в свободное пространство — бак размером $47d \times 45d \times 25d$, получены при помощи описанной выше PIV-системы. В исследуемом диапазоне чисел Re (от 1500 до 7650) истечение струи в свободное пространство приводит к формированию двух максимумов в профилях продольной компоненты средней скорости, что согласуется с данными работы [13]. В случае щелевого канала профили продольной средней скорости имеют распределения, характерные для течения затопленной квазидвумерной турбулентной струи —

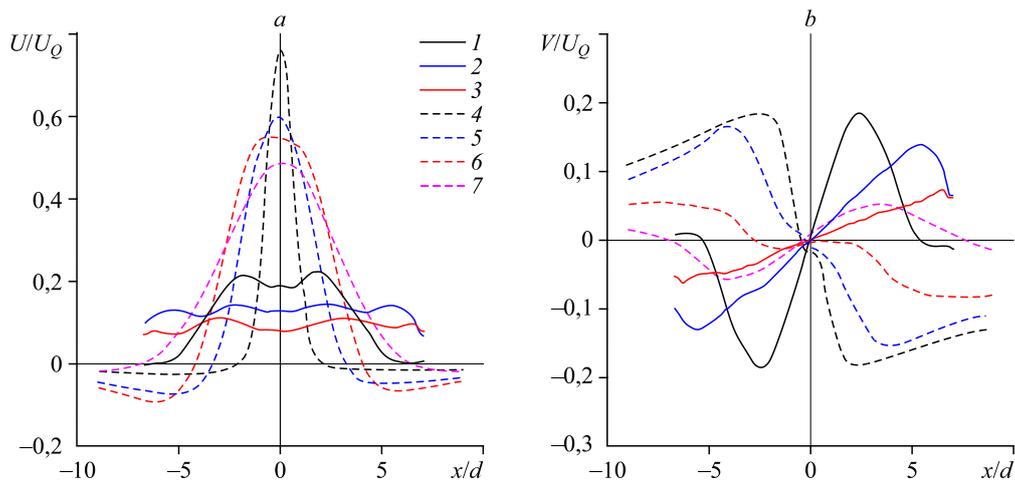


Рис. 2. Профили продольной (а) и поперечной (b) компонент средней скорости, построенные для колеблющейся струи в неограниченной области ($Re = 7650$) и в щелевом канале ($Re = 8000$).

Неограниченная осциллирующая струя: $y/d = 2$ (1), 5 (2), 8 (3),
ограниченная осциллирующая струя: $y/d = 2$ (4), 5 (5), 8 (6), 15 (7).

с одним выраженным максимумом. При наличии ограничивающих стенок щелевого канала истечение осциллирующей струи индуцирует поток внешней жидкости, направленный в струю, за счет формирования крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур, увеличивающих количество вовлекаемой жидкости за счет большего масштаба [8], что приводит к увеличению отрицательных значений продольной скорости на внешних границах струи. Интенсивное вовлечение жидкости в струю подтверждается и распределениями поперечной компоненты средней скорости, которые кардинально отличаются от случая неограниченной колеблющейся струи (рис. 2b). В случае неограниченной области поперечная компонента средней скорости образует V-образное распределение (сплошные линии). В щелевом канале распределение поперечной компоненты средней скорости соответствует двум горизонтальным течениям, направленным к оси струи (пунктирные линии).

Периодические колебания струи, генерируемые струйным осциллятором, задают волновую форму струйного течения в щелевом канале. Щелевая форма канала, как и в случае истечения турбулентной затопленной струи из прямоугольного сопла [8], способствует формированию устойчивых крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур. Характерная структура течения колеблющейся струи в щелевом канале для числа $Re = 8000$ представлена в виде мгновенных векторных полей, нормированных на модуль скорости $|V|$, построенных для трех фаз колеблющейся струи (рис. 3a–3c). Развитие квазидвумерных крупномасштабных вихревых структур может приводить к нарушению целостности струйного течения (рис. 3c). В исследуемом диапазоне чисел Re (1500–8000) анализ временных последовательностей мгновенных полей скорости показал, что, несмотря на наличие интенсивных крупномасштабных вихревых структур в потоке, случаи прекращения колебания струи вследствие присоединения струи в одном из крайних положений, описанные в работе [10], не наблюдались.

Динамика вихревых структур анализировалась на основе мгновенных распределений Q -критерия, представляющего собой второй инвариант тензора градиента скорости [14]. Анализ показал наличие двух типов вихревых структур, относящихся к двум диапазонам пространственных и временных масштабов (рис. 4a–4c). Это, во-первых, сдвиговые

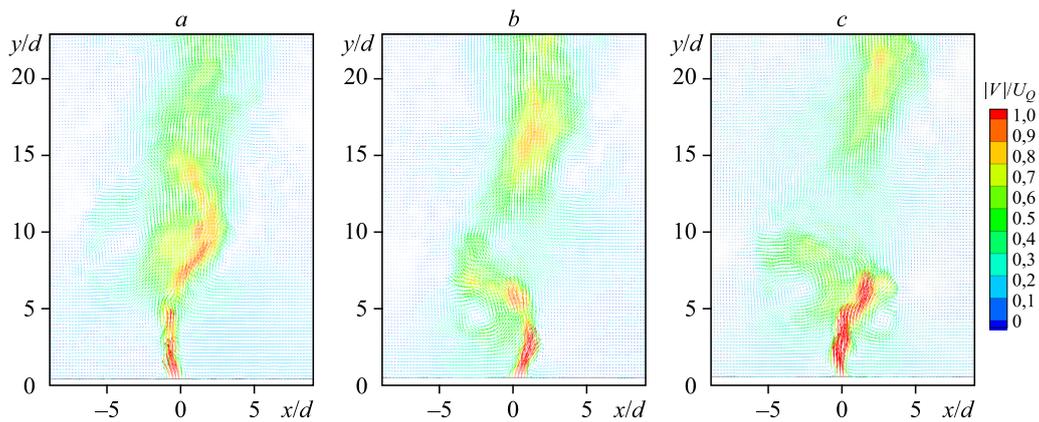


Рис. 3. Мгновенные векторные поля скорости, представленные для фаз 0° (a), 180° (b) и 90° (c).

вихревые структуры 1 (рис. 4a), генерируемые на начальном участке турбулентной струи и, во-вторых, крупномасштабные квазидвумерные структуры 2 (рис. 4b), формирующиеся в результате объединения сдвиговых вихревых структур [15]. Анализ мгновенных распределений Q^{2D} -критерия, рассчитанных по двум компонентам скорости, показал, что характерные частоты генерации сдвиговых вихревых структур на порядок превышают частоты формирования крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур, которые коррелируют с основной частотой работы струйного осциллятора.

Частота колебания струи определялась по частотным спектрам, рассчитанным по временным реализациям поперечной компоненты мгновенной скорости, полученным в различных точках на оси струи, описывающим колебания струи в поперечном направлении. На рис. 5a представлены спектры пульсаций поперечной компоненты скорости, рассчитанные для расстояний $y = 6d$ (сплошные линии) и $y = 15,5d$ (штриховые линии). Пики в области низких частот ($f = 2 - 12$ Гц) энергетических спектров соответствуют основной частоте работы струйного осциллятора и крупномасштабным квазидвумерным вихревым структурам для чисел Re от 1500 до 8000. Зависимость частоты, построенной по данным пикам, от числа Re является линейной, что согласуется с данными работ по колеблющимся струям в ограниченном пространстве [9 – 11]. Линейная зависимость также характерна и для истечения колеблющейся струи в неограниченное пространство [7].

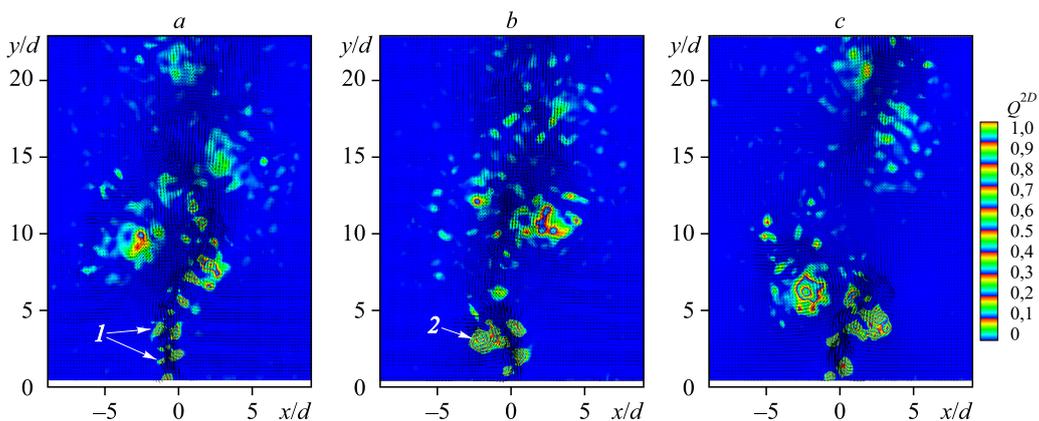


Рис. 4. Мгновенные распределения Q^{2D} -критерия, рассчитанные по двум компонентам скорости, соответствующим полям скорости, изображенным на рис. 3.

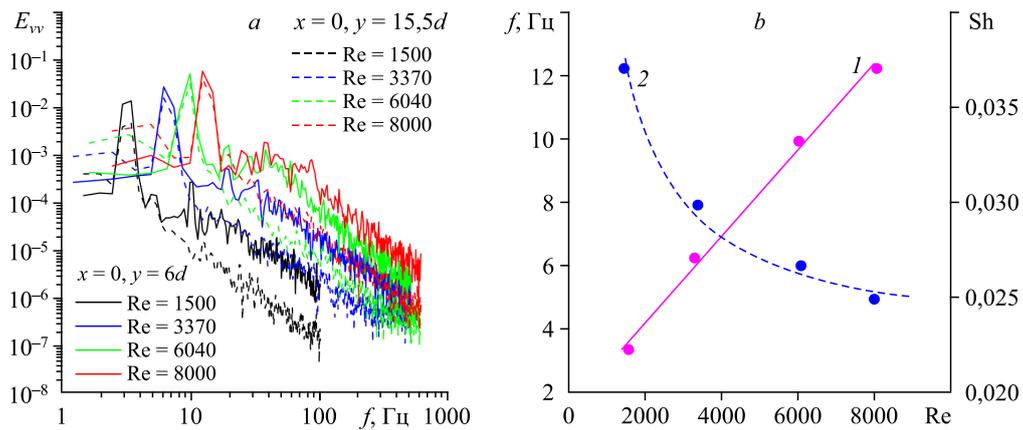


Рис. 5. Спектры пульсаций поперечной компоненты скорости (а), а также зависимости частоты колебания струи f от числа Re (1) и числа Струхали Sh от числа Re (2) (b).

Однако в отличие от неограниченных колеблющихся струй [7] и ограниченных колеблющихся струй [10] в колеблющейся струе в щелевом канале наблюдается убывающая зависимость числа Струхали от числа Re , которая при больших числах Re стремится к $Sh = 0,0225$ (рис. 5b). Убывающая зависимость числа Sh от числа Re появляется и в импактной колеблющейся струе [16]. Влияние числа Re на частоту колебания струи f и число Струхали $Sh = f \cdot d / U_0$ представлены соответственно линиями 1 и 2 на рис. 5b. Аппроксимация экспериментальных данных дает следующие выражения для этих зависимостей:

$$f(Re) = 1,45 + 0,00137 \cdot Re, \quad (1)$$

$$Sh(Re) = 0,0225 + 22,44/Re. \quad (2)$$

Полученные экспериментальные данные о распределениях средней скорости и динамике истечения колеблющейся струи в щелевой канал указывают на значительные расхождения с результатами работы [10]. Наличие близкорасположенных ограничивающих стенок щелевого канала приводит к уменьшению максимального угла отклонения струи. В отличие от результатов работы [10], где наблюдался значительный рост максимального угла отклонения с увеличением числа Re , в настоящем исследовании получено, что максимальные углы отклонения, определенные по границе струи $U = 0,1U_0$, составляют $\sim 20^\circ$ и слабо зависят от числа Re . Таким образом, несмотря на формирование крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур на начальном участке струи, ограничение максимального угла отклонения струи не приводит к устойчивому присоединению струи вследствие проявления эффекта Коанда.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при соотношении высоты канала к ширине горловины выходного сопла струйного осциллятора $h/d = 1$ истечение колеблющейся струи в щелевой канал сопровождается формированием крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур на основной частоте работы струйного осциллятора. Наличие ограничивающих стенок щелевого канала существенно влияет на распределения осредненной скорости и приводит к ограничению максимального угла отклонения струи. Значения максимального угла отклонения слабо зависят от числа Re и являются

намного меньшими по сравнению с представленными в литературе величинами. В исследуемом диапазоне чисел Re уменьшение высоты щелевого канала обеспечивает стабильную работу струйного осциллятора, что позволяет генерировать колебания струи с заданной частотой. На основе аппроксимации экспериментальных данных получены зависимости частоты колебаний струи и числа Струхала от числа Re .

Список литературы

1. Lin J.C., Whalen E.A., Andino M.Y., Graff E.C., Lacy D.S., Washburn A.E., Gharib M., Wygnanski I.J. Full-scale testing of active flow control applied to a vertical tail // J. Aircraft. 2019. Vol. 56, No. 4. P. 1–11.
2. Phillips E., Wygnanski I. Use of sweeping jets during transient deployment of a control surface // AIAA J. 2013. Vol. 51, No. 4. P. 819–828.
3. Schmidt H.-J., Woszidlo R., Nayeri C.N., Paschereit C.O. Fluidic oscillators for bluff body drag reduction in water // 54th AIAA Aerosp. Sci. Meet. 4–8 Jan. 2016, San Diego, California, USA. AIAA 2016-0591 P. 1–12.
4. Hossain M.A., Agricola L., Ameri A., Gregory J.W., Bons J.P. Sweeping jet film cooling on a turbine vane // J. Turbomach. 2019. Vol. 141. P. 031007-1–031007-11.
5. Guyot D., Paschereit C.O., Raghu S. Active combustion control using a fluidic oscillator for asymmetric fuel flow modulation // Int. J. Control. 2009. Vol. 1, No. 2. P. 155–166.
6. Zhou W. Heat transfer of a sweeping jet impinging at narrow spacings // Exp. Therm. Fluid Sci. 2019. Vol. 103. P. 89–98.
7. Ostermann F., Woszidlo R., Nayeri C.N., Paschereit C.O. Properties of a sweeping jet emitted from a fluidic oscillator // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 857. P. 216–238.
8. Шестаков М.В. Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах // Дис. ... канд. физ.-мат. наук: 1.1.9. Новосибирск, 2022. 219 с.
9. Mohammadshahi S., Samsam-Khayani H., Nematollahi O., Kim K.C. Flow characteristics of a wall-attaching oscillating jet over single-wall and double-wall geometries // Exp. Therm. Fluid Sci. 2020. Vol. 112, No. 1. P. 110009-1–110009-13.
10. Samsam-Khayani H., Mohammadshahi S., Kim K.C. Experimental study on physical behavior of fluidic oscillator in a confined cavity with sudden expansion // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 8668-1–8668-17.
11. Mohammadshahi S., Samsam-Khayani H., Cai T., Kim K.C. Experimental and numerical study on flow characteristics and heat transfer of an oscillating jet in a channel // Int. J. Heat Fluid Flow. 2020. Vol. 86. P. 108701-1–108701-14.
12. Алексеенко С.В., Маркович Д.М. Присоединение плоской турбулентной струи к стенке в условиях вдува и отсоса // Прикл. механика и технич. физика. 1997. Т. 38, № 3. С. 99–105.
13. Kim S.H., Kim H.D. Quantitative visualization of the three-dimensional flow structures of a sweeping jet // J. Visualization. 2019. Vol. 22. P. 437–447.
14. Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows // Cent. Turbul. Res. Proc. Summer Progr. 1988. Vol. 1970. P. 193–208.
15. Winant C.D., Browand F.K. Vortex pairing: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number // J. Fluid Mech. 1974. Vol. 63, No. 2. P. 237–255.
16. Wen X., Liu Y., Tang H. Unsteady behavior of a sweeping impinging jet: time-resolved particle image velocimetry measurements // Exp. Therm. Fluid Sci. 2018. Vol. 96. P. 111–127.

*Статья поступила в редакцию 8 июля 2022 г.,
после доработки — 14 июля 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.*