

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-628-639

УДК 532.5-1/-9

Экспериментальное и численное исследования структуры течения в щелевых каналах с плавным расширением и сужением

Павел Александрович Брызгунов¹✉, Даниил Витальевич Паторкин²,
 Максим Сергеевич Кожемякин³, Михаил Сергеевич Жилин⁴,
 Владимир Олегович Киндра⁵

^{1,2,3,4,5} Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация

¹ bryzgunovpa@mpei.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3710-5116>

² patorkindv@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9326-9996>

³ kozhemiakinms@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9381-4158>

⁴ zhilinms@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2062-216X>

⁵ kindravo@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8406-7901>

Аннотация

Введение. В настоящее время одним из наиболее распространенных типов теплообменных аппаратов являются пластинчатые теплообменники, в том числе микроканальные. Для повышения эффективности теплообменных аппаратов необходима оптимизация геометрии пластин, что реализуется с помощью численного моделирования течения и теплообмена. Численное моделирование требует валидации результатов не только по интегральным характеристикам, таким как перепад давлений или коэффициент теплоотдачи, но и по структуре течения. **Метод.** В работе экспериментально и численно исследована структура течения в щелевых каналах с односторонним плавным расширением и сужением: с минимальной (33 %), средней (53 %) и максимальной (200 %) степенью расширения при числе Рейнольдса около 300. Для численного моделирования использовалась стационарная трехмерная несжимаемая постановка на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с их замыканием посредством модели турбулентности $k-\varepsilon$ Realizable. В ходе экспериментальных исследований был применен оптический метод анемометрии по изображениям частиц, заключающийся в кросс-корреляционном анализе последовательных снимков потока с засеянными частицами-трассерами, что позволяет определять их среднее смещение за время между кадрами, и, как следствие — двумерное поле скоростей. Для реализации данного метода был создан стенд, в том числе разработан, изготовлен и испытан капельный генератор на основе сопла Ласкина. **Основные результаты.** Результаты численного моделирования и эксперимента показали мгновенные и осредненные поля скоростей в срединном продольном сечении каналов. Полученные результаты подтвердили качественное и количественное согласие с экспериментальными данными, отклонение не превышает 8 %. Установлено, что в случае значительных расширений в широкой части канала может возникать вихревое течение, при этом вихрь не является стационарным, несмотря на низкое число Рейнольдса и перемещается как влево-вправо, так и вверх-вниз, что при осреднении приводит к различиям в векторных полях скорости между результатами эксперимента и моделирования. **Обсуждение.** Подтверждено, что используемые в настоящем исследовании модели и подходы обеспечивают приемлемую точность с точки зрения воспроизведения структуры течений. Ввиду наличия вихревых структур при большой степени расширения, которая может быть образована оребрением со значительной высотой ребер, для использования в теплообменных каналах рекомендуются каналы с малым и средним расширениями как обеспечивающие безотрывный характер течения.

Ключевые слова

структура течения, анемометрия по изображениям частиц, PIV, теплообменные каналы, оребрение, визуализация течений

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта государственного задания № FSWF-2026-0005 в сфере научной деятельности на 2026–2028 гг.

Ссылка для цитирования: Брызгунов П.А., Паторкин Д.В., Кожемякин М.С., Жилин М.С., Киндра В.О. Экспериментальное и численное исследования структуры течения в щелевых каналах с плавным расширением и сужением // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 3. С. 628–639. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-628-639

Experimental and numerical flow visualization in rectangular cross-section channels with smooth expansion and contraction

Pavel A. Bryzgunov¹✉, Daniil V. Patorkin², Maxim S. Kozhemyakin³,
Mikhail S. Zhilin⁴, Vladimir O. Kindra⁵

^{1,2,3,4,5} National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation

¹ bryzgunovpa@mpei.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3710-5116>

² patorkindv@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9326-9996>

³ kozhemiakinms@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9381-4158>

⁴ zhilinms@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0005-2062-216X>

⁵ kindravo@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8406-7901>

Abstract

Currently, one of the most common types of heat exchangers is plate heat exchangers, including microchannel heat exchangers. To improve the efficiency of heat exchangers, optimization of the plate geometry is necessary which is achieved through numerical flow and heat transfer modeling. This requires validation of the results not only for integral characteristics such as pressure drop or heat transfer coefficient, but also for the flow structure. In this paper, we experimentally and numerically investigate the flow structure in slotted channels with a one-sided smooth expansion and contraction with a minimum (33 % of the slot height), average (53 % of the slot height), and maximum (200 % of the slot height) expansion at a Reynolds number of approximately 300. For numerical modeling, we used a steady-state three-dimensional incompressible formulation based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with their closure using the k - ε Realizable turbulence model. During the experimental studies, we employed the optical method of particle image velocimetry which consists of cross-correlation analysis of successive images of the flow seeded with tracer particles, which allows us to determine their average displacement over the time between frames, and, consequently, the two-dimensional velocity field. To implement this method, a setup was created, including the development, manufacture, and testing of a droplet generator based on a Laskin nozzle. Using numerical modeling and experiments, instantaneous and averaged velocity fields in the mid-longitudinal cross-section of the channels were obtained. The numerical modeling results show good qualitative and quantitative agreement with the experimental data, with deviations not exceeding 8 %. It was also established that, in the case of significant expansion, a vortex flow can occur in the wide section of the channel. The vortex is not stationary, despite the low Reynolds number, but moves both left and right and up and down. This, when averaged, leads to differences in the velocity vector fields between the experimental and modeled results. The models and approaches used in this study were found to provide acceptable accuracy in reproducing flow structures. Due to the presence of vortex structures at significant expansion, which can be formed by fins with significant fin heights, low- and medium-expansion channels are recommended for use in heat-exchange channels as they ensure a flow without separation.

Keywords

flow structure, particle image velocimetry, PIV, heat exchange channels, finning, flow visualization

Acknowledgements

This study conducted by the Moscow Power Engineering Institute was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWF-2026-0005).

For citation: Bryzgunov P.A., Patorkin D.V., Kozhemyakin M.S., Zhilin M.S., Kindra V.O. Experimental and numerical flow visualization in rectangular cross-section channels with smooth expansion and contraction. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 3, pp. 628–639 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-3-628-639

Введение

Применение плавного сужения и расширения является одним из широко используемых способов интенсификации конвективного теплообмена в щелевых каналах пластинчатых и трубчато-пластинчатых теплообменных аппаратов [1]. Сужения и расширения проточной части образуются оребрением пластин, из которых набирается теплообменник, при этом, в зависимости от конструкции конкретного теплообменника, возможны конфигурации как с двухсторонними сужениями и расширениями [2], когда канал образован двумя пластинами, так и с односторонними, имеющи-

ми место в крайних щелевых каналах, образованных с одной стороны пластиной, а с другой — корпусными деталями теплообменного аппарата [3].

Пластины могут иметь различную конструкцию, как с прямым [4], так и с наклонным, прерывистым и V-образным оребрением [5]. Теплогидравлическая эффективность того или иного типа оребрения определяется конкретными режимными параметрами, типом среды, рядом экономических и технологических ограничений. Исследованию данных аспектов посвящено большое количество численных и экспериментальных исследований, исчерпывающие обзоры которых представлены в работах [5, 6], причем в настоящее время

все более широко применяется подход вычислительной гидродинамики Computational Fluid Dynamics (CFD)-моделирование.

Популярность применения CFD-моделирования обусловлена тем фактом, что теплогидравлическая эффективность различных каналов обуславливается в первую очередь структурой течения, наличием отрывов потока и интенсивностью его турбулизации. В отличие от традиционных экспериментальных исследований теплопередачи, позволяющих получить данные по плотности теплового потока, числам Нуссельта, коэффициентам сопротивления, численное моделирование позволяет также визуализировать структуру течения, за счет чего возможно изучение механизмов интенсификации теплообмена.

Однако в большинстве случаев практически значимыми являются турбулентные режимы течения теплоносителей, для моделирования которых наиболее широко применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, использующие полуэмпирические модели турбулентности, требующие валидации по результатам экспериментальных исследований как с точки зрения интегральных характеристик, таких как средняя плотность теплового потока, число Нуссельта и коэффициент потерь давления, так и с точки зрения структуры потока. В этой связи актуальными являются исследования, направленные на экспериментальное изучение полей скорости при течениях в теплообменных каналах и визуализацию общей структуры потока.

Обзор публикаций по тематике визуализации течений в теплообменных каналах

Визуализации течений в теплообменных каналах с применением различных методов посвящено значительное количество публикаций. В работе [7] представлены результаты численного и экспериментального исследований структуры течения в модели теплообменного канала пластинчатого теплообменника с луночными интенсификаторами при числах Рейнольдса 70–470, при этом рабочим телом являлась вода, а для визуализации потока использовались струйки краски разных цветов. Данный подход позволил визуализировать траектории жидких частиц и сопоставить их с линиями тока, получаемыми по результатам численного моделирования, однако при использовании такого метода нет возможности построения поля скорости. В работе [8] описано численное и экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамики в теплообменных каналах с штырьковыми и штырьково-луночными интенсификаторами теплообмена при течении воздуха. Для подтверждения гипотезы об увеличении масштаба и интенсивности подковообразного вихря, формирующегося в местах установки штырька при размещении его в лунке использовалась техника визуализации «oil-and-dye», суть которой заключается в нанесении вязкой подкрашенной жидкости перед продувкой модели канала, при этом зоны с более тонким слоем краски соответствуют наличию вблизи них интенсивных вихревых структур, однако данный метод позволяет лишь на качественном уровне валидировать модель.

Методы, основанные на измерении градиентов коэффициента преломления оптически прозрачной среды такие, как, например, фонов-ориентированный шликрен [9, 10], позволяют при постобработке получить поля плотности и температуры, что может быть также актуально для валидации результатов численного моделирования, однако, построение поля скорости является затруднительным. Примером работы, в которой реализовано получение поля скорости с использованием метода фонов-ориентированный шликрен, является работа [11], где для обработки данных использованы физически информированные нейронные сети. Встраивая уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу в функцию потерь нейронной сети, в [11] был восстановлен полный набор физических переменных применительно к задаче взаимодействия ударной волны с пристеночным слоем. Однако применение нейронных сетей может приводить к искусственным искажениям, вызванным особенностями данного подхода, вследствие чего возможны неточности в определении поля скорости.

Наиболее подходящим для экспериментального исследования поля скорости жидкостей и газов является анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV). Сущность метода PIV заключается в кросс-корреляционном анализе пар фотографий потока с засеянными частицами, при этом по среднему смещению групп частиц в рамках выделенных ячеек определяется векторное поле скорости [12].

Визуализация течений методом PIV в каналах теплообменных аппаратов в настоящее время является актуальным направлением исследований. В работе [13] были исследованы X-образные каналы пластинчатых аппаратов с перетоками при числах Рейнольдса порядка 10^3 , при этом визуализация течений применялась для валидации результатов моделирования на примере упрощенной модели канала. По результатам исследования было установлено, что наибольшей точностью характеризуется модель турбулентности $k-\omega$ Shear Stress Transport. В [14] приведены результаты исследования поля скорости в модели канала с установленными кеглеобразными интенсификаторами теплообмена в диапазоне Re 1100–5100. Выполнен анализ поля скорости и турбулентной кинетической энергии, но не представлено сопоставления с результатами численных исследований.

В [15] представлены результаты исследования поля скорости и температуры (посредством градиентной теплотометрии) при течении пара вокруг цилиндров круглого сечения. В работе подробно описаны профили скорости, представлены распределения чисел Нуссельта по поверхности цилиндров в диапазоне Re 4000–40 000. В [16, 17] исследованы поля скорости при течении воздуха в поворотных коленах прямоугольного и круглого сечений. Особенностью работы [15] является тот факт, что рассматривается поворот после вихревой матрицы, являющейся типовым элементом охлаждаемой лопасти турбины, в результате особое внимание уделено исследованию формы, размера и эволюции вихревых структур, генерируемых матрицей. В [16] кроме полей скорости, применительно к которым наблюдается хо-

рошее согласие с результатами CFD-моделирования, анализируются также поля турбулентной кинетической энергии (ТКЭ), причем в случае ТКЭ наблюдается приемлемое количественное согласие с CFD, но неудовлетворительное качественное.

В [18] приведены результаты исследования структуры течения в модели теплообменного канала с ребрами-интенсификаторами в виде аэродинамических поверхностей. Отмечено, что структура течения после ребер-интенсификаторов, подобна течению в конфузорном канале, однако из-за особенностей экспериментальной установки не исследовано поле скорости вблизи самих ребер. Соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных данных на уровне погрешности не более 7–10 % получено в [19] на примере структуры течения в поперечном сечении межтрубного пространства кожухотрубного теплообменника.

Наибольший интерес среди рассмотренных исследований структуры течения в теплообменных каналах представляют результаты работы [20], посвященной визуализации потока в модели микроканального теплообменного пластинчатого аппарата. Исследовались модели зигзагообразных каналов, изготовленные из прозрачного акрила, что позволило осветить «лазерным ножом» всю представляющую интерес область. Были получены осредненные поля скорости и завихренности, причем наблюдается хорошее качественное и количественное согласие с результатами CFD-моделирования. Таким образом, визуализация течений в традиционных и перспективных теплообменных каналах совместно с валидацией используемых при их проектировании численных моделей и методов позволяет лучше понять механизмы интенсификации теплообмена, а также сделать обоснованный вывод о применимости выбранных подходов к моделированию.

Целью настоящей работы является валидация результатов численного моделирования и исследование структуры течения в теплообменных каналах с односторонним плавным расширением и сужением при низких числах Рейнольдса, свойственных микроканалам.

Объект и методы исследования

Объектами исследования в настоящей работе выбраны модели теплообменных каналов с плавным расширением и сужением. Эскизы моделей представлены на рис. 1. Модели выполнены по сравнению с натурными каналами микроканальных теплообменников пластинчатого аппарата в увеличенном масштабе с целью луч-

шей визуализации течения, так как вблизи прозрачных и непрозрачных стенок аппарата луч лазера может создавать избыточную засветку, и влияние засветки тем меньше, чем масштаб модели больше. Криволинейная поверхность модели образует верхнюю стенку канала, при этом нижнюю стенку образует стекло, через которое трассирующие частицы будут подсвечиваться «лазерным ножом». Остальные поверхности моделей служат для их установки на рабочем участке стенда. В работе рассматриваются три модели канала в зависимости от высоты щели: с минимальным сужением и расширением (33 %), средним (53 %) и максимальным (200 %).

Экспериментальный стенд для исследования полей скорости показан на рис. 2, *a*, рабочий участок (рис. 2, *b*), устройство для засева потока (рис. 2, *c*). Стенд функционирует следующим образом: поток воздуха, создаваемый воздушной подушкой, смешивается с аэрозолем микрокапель, создаваемым генератором капель и через расходомер направляется на рабочий участок стенда, который имеет две прозрачные стенки. Через боковую прозрачную стенку осуществляется подсветка трассирующих капель аэрозоля импульсным лазером, на котором установлена фокусирующая линза, создающая плоский направленный луч света, так называемый «лазерный нож». Импульсный лазер формирует пары вспышек, время между которыми составляло 200 мкс, при этом время между парами вспышек — 200 мс. Масштабный коэффициент равен 0,03 мм/пиксел. С учетом данных параметров и неопределенности кросс-корреляции, составляющей по данным работы [21] 0,1 пиксел, неопределенность измерения скорости можно оценить в 0,015 м/с. Высокоскоростная камера, синхронизированная с лазером посредством процессора-синхронизатора, осуществляла съемку через фронтальную прозрачную стенку рабочего участка засвеченных частиц во время вспышки, таким образом формировались пары кадров, которые в дальнейшем подвергались кросс-корреляционному анализу в программе ActualFlow. В настоящей работе исследовалось поле скорости в срединном продольном сечении каналов.

При эксперименте было применено следующее оборудование: термоанемометрический расходомер EE741, процессор-синхронизатор «ПОЛИС», импульсный лазер Beamtech Optronics Vlite 200 с длиной волны 532 нм, высокоскоростная камера Imperx Bobcat GEV.

Для засева потока использован специально разработанный и изготовленный генератор капель на основе сопла Ласкина. Генератор капель работает следующим образом: трубка внутренним диаметром 8 мм соединена с компрессором или магистралью сжатого воздуха,

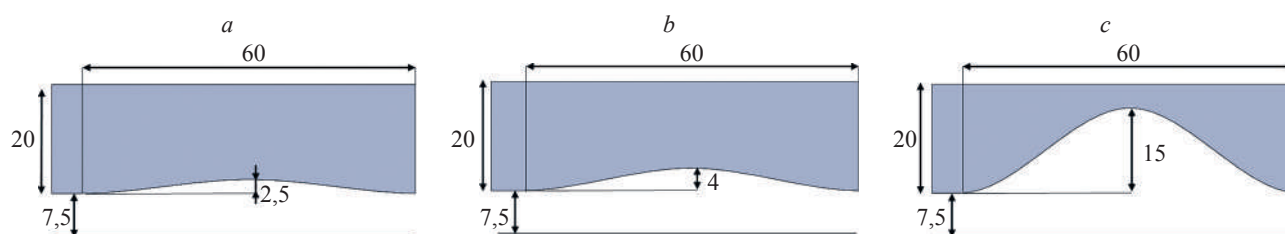


Рис. 1. Эскизы экспериментальных моделей каналов (в мм) со степенью расширения: 2,5 мм (*a*); 4 мм (*b*); 15 мм (*c*)

Fig. 1. Sketches of experimental channel models: with an expansion of 2.5 mm (*a*), 4 mm (*b*), 15 mm (*c*)

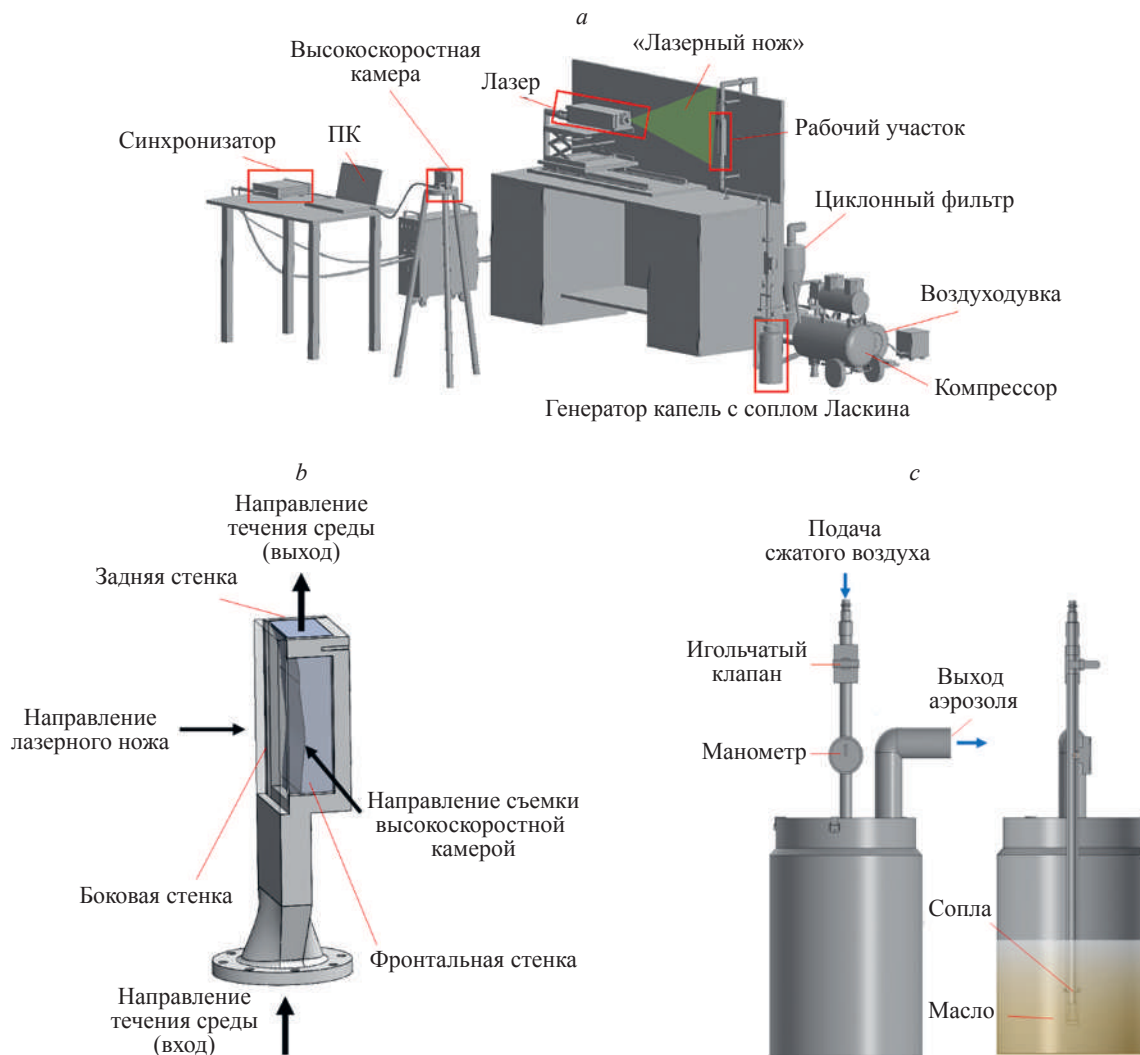


Рис. 2. Устройство экспериментального стенда: общий вид (а); рабочий участок (б); генератор капель (с).

ПК — персональный компьютер

Fig. 2. The experimental setup: general view of the setup (a); working section of the setup (b); droplet generator (c)

нижний конец трубки опущен в минеральное масло, конец трубки запаян, при этом в нижней части просверлены отверстия диаметром 1 мм, выступающие в качестве сопел. Сжатый воздух с высокой скоростью выходит из сопел, разрывает и вспенивает поверхность масла, образуя мелкодисперсный аэрозоль и крупные капли. Далее аэрозоль вместе с потоком воздуха уходит в отводящую трубу в верхней части емкости, тогда как крупные капли опадают и стекают по стенкам обратно. Расход сжатого воздуха и плотность засева аэрозоля регулируется игольчатым клапаном.

Для проверки работоспособности капельного генератора и оценки параметров создаваемого аэрозоля были проведены его испытания с помощью определения поля скорости на выходе из капельного генератора. На рис. 3 представлена фотография засеянного потока, демонстрирующая хорошую плотность засева и равномерность размеров тразирующих частиц. Размер частиц аэрозоля порядка 10 мкм. Число Стокса оценивалось по формуле:

$$Sk = \frac{\rho d^2 u}{18 \mu D},$$

где ρ — плотность масла, около 800 кг/м³; d — диаметр частиц; u — характерная скорость (средняя скорость в узком сечении равная 0,3 м/с); μ — динамическая вязкость воздуха; D — характерный размер канала (высота узкой части канала — 7,5 мм).

Число Стокса составило около 10^{-2} , что соответствует условию применимости частицы как трассера при PIV-исследованиях $Sk \ll 1$.

Была выполнена обработка снимков и получены поля мгновенной скорости и поле осредненной скорости (рис. 4). Как видно, используемый генератор капель позволяет сформировать засеянный поток, хорошо подходящий для PIV: засев достаточно равномерный, поле практически не имеет разрывов, при этом скорость меняется плавно. Таким образом, по результатам предварительных испытаний была подтверждена работоспособность и эффективность разработанного устройства.

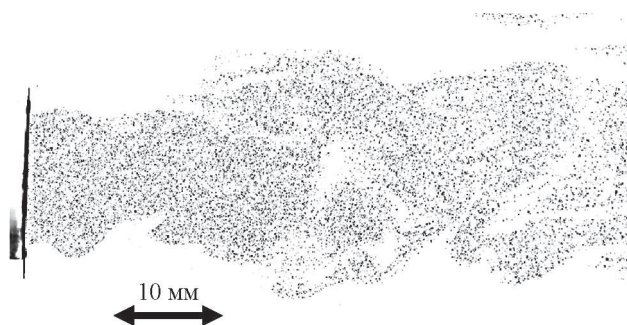


Рис. 3. Фотография засеянного потока на выходе из капельного генератора (негатив)

Fig. 3. Photograph of the seeded flow at the outlet of the drip generator (negative)

В рамках экспериментальных исследований было реализовано численное моделирование течений при условиях эксперимента. На рис. 5 представлен пример сеточной модели проточной части канала с обозначенными граничными условиями. На входе задавалась скорость течения 0,45 м/с, соответствующая $Re = 300$ и расходу воздуха 0,75 кг/ч, который поддерживался в ходе экспериментальных исследований.

Свойства воздуха были приняты при атмосферном давлении и температуре 25 °С, из-за малой скорости течения использовалась несжимаемая постановка, для замыкания уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу была выбрана модель турбулентности $k-\epsilon$ Realizable [22], демонстрирующая высокую точность при моделировании течений в каналах. В качестве решателя применялся Ansys Fluent, сетка была построена в Ansys Meshing. Размер тетраэдрических ячеек сетки был установлен равным 1 мм в ходе исследований на сеточную сходимость. При анализе полученных по результатам CFD-моделирования полей скорости, аналогично эксперименту, рассматривалось поле в продольном срединном сечении каналов.

Результаты исследования

Наиболее важными с точки зрения валидации численных моделей являются результаты расчетных и экспериментальных исследований в канале с наибольшей

степенью расширения, составляющей 15 мм, так как в данном случае могут присутствовать значительные вихревые течения. На рис. 6 представлен пример экспериментального кадра съемки потока с засеянными частицами, демонстрирующий высокую плотность засева (примерно 50 частиц на квадратный миллиметр кадра). Как видно по фотографии, обеспечивается приемлемая плотность засева потока, частицы распределены достаточно равномерно и хорошо отслеживаются. В случае остальных каналов с меньшими степенями расширения и сужения наблюдалась схожая картина.

На рис. 7 представлены примеры мгновенных полей скорости. Как видно, в каналах наблюдается нестационарное, турбулизированное векторное поле в области расширения потока. При этом уровень турбулизации течения возрастает с увеличением степени расширения. В случае с каналом с минимальным расширением турбулизация течения незначительная, что видно по малым отклонениям векторов скорости от горизонтального направления. Важно отметить, что вихревые структуры в случае канала со степенью расширения 15 мм также имеют нестационарность, и вихри в расширяющейся части канала перемещаются по вертикали и по горизонтали. В ходе исследования для каждого канала было построено по 1000 мгновенных полей скорости для формирования осредненного во времени поля. Заметим, что при использовании метода RANS результаты CFD-моделирования соответствуют осредненному полю.

На рис. 8, *a*, *b* изображены осредненные по времени поля модуля скорости для канала со степенью расширения 15 мм, полученные по результатам эксперимента (рис. 8, *a*) и моделирования (рис. 8, *b*). Наблюдается высокое согласие результатов моделирования и эксперимента. Можно отметить, что CFD-моделирование достаточно точно воспроизводит отклонение струи вверх, при этом наблюдается согласие также и по значениям величины модуля скорости. Однако в верхней части канала экспериментальная картина течений значительно отличается: уменьшение скорости наблюдается плавное и монотонное, тогда как для CFD-моделирования после уменьшения наблюдается увеличение скорости вблизи наиболее высокой точки.

Для анализа возможных причин расхождения модуля скорости рассмотрим векторные поля осредненной по времени скорости для результатов эксперимента и

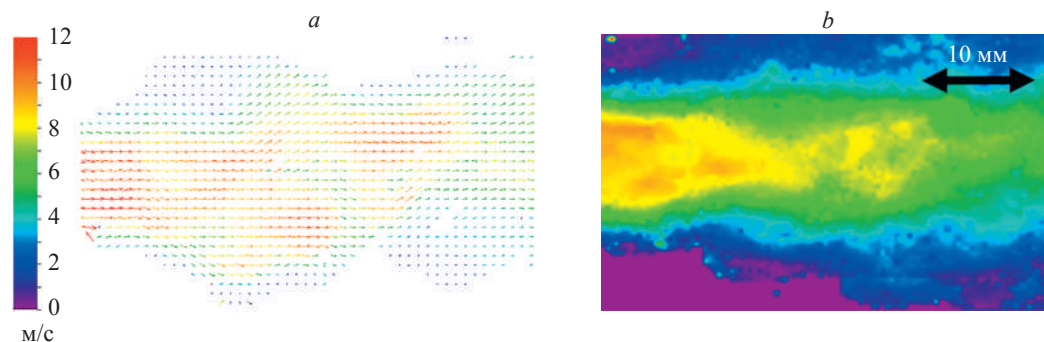


Рис. 4. Результаты испытаний капельного генератора: пример мгновенного векторного поля скорости (*a*); осредненное поле модуля скорости (*b*)

Fig. 4. Test results of the drop generator: example of instantaneous velocity vector field (*a*); averaged velocity magnitude field (*b*)

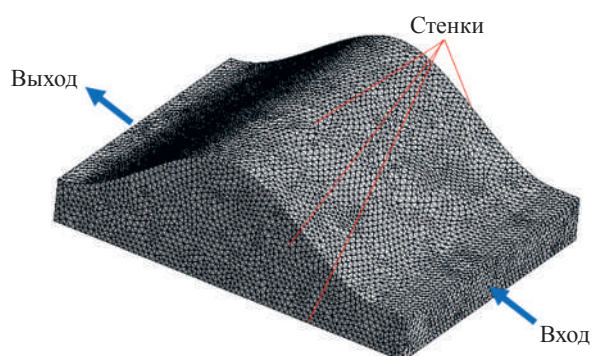


Рис. 5. Пример сеточной модели проточной части канала с граничными условиями

Fig. 5. Example of a grid model of a channel flow with boundary conditions

моделирования (рис. 8, *c, d*). Видно, что по результатам CFD-моделирования в верхней части канала наблюдается стационарный вихрь большого размера, тогда как в случае PIV вихря в верхней части не наблюдается. Данный факт можно объяснить с учетом мгновенных полей скорости (рис. 7): в условиях эксперимента вихрь в верхней части канала со степенью 15 мм движется вниз-вверх и вправо-влево, в результате чего при осреднении по времени он равномерно «размазывается» по верхней части канала, что приводит к структуре потока, показанной на рис. 8, *a, b*.

Отметим, что в остальной части канала с наибольшей степенью расширения наблюдается приемлемое согласие результатов расчета и эксперимента, что говорит о высокой точности выбранных методов и моделей.

Поля скорости применительно к каналам с небольшой степенью расширения — 2,5 и 4 мм представлены на рис. 9 и 10. В случае каналов с небольшой степенью не наблюдается значительных стационарных отрывных

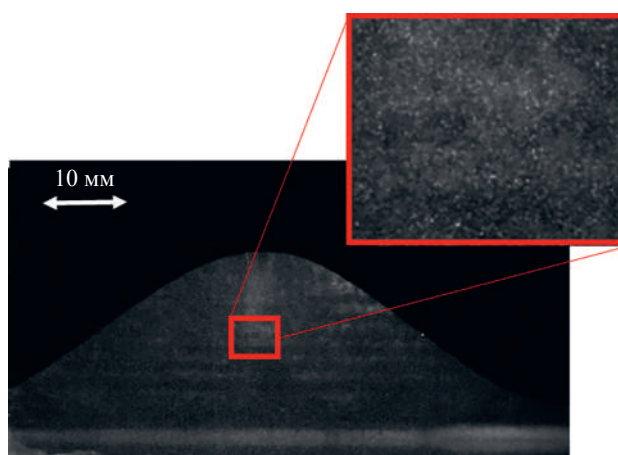


Рис. 6. Пример фотографии засеянного потока в случае канала со степенью расширения 15 мм

Fig. 6. Example of a photograph of a seeded flow in the case of a channel with an expansion of 15 mm

течений как по результатам эксперимента, так и по результатам CFD-моделирования. Для данных каналов наблюдается хорошее согласие данных эксперимента и моделирования: в обоих случаях видно замедление потока в расширяющейся части канала с последующим ускорением, при этом для канала со степенью расширения 2,5 мм ускорение и замедление незначительны, и слабо видны в результатах PIV-исследования. В целом режимы течения во всех рассмотренных каналах можно охарактеризовать как нестационарные перемежающиеся.

Для более точного качественного и количественного сопоставления результатов CFD-моделирования и PIV-исследования были построены профили скорости по высоте каналов в сечении с наибольшей высотой канала (рис. 11). В результате получено, что погрешность CFD-моделирования в сравнении с экспериментальными

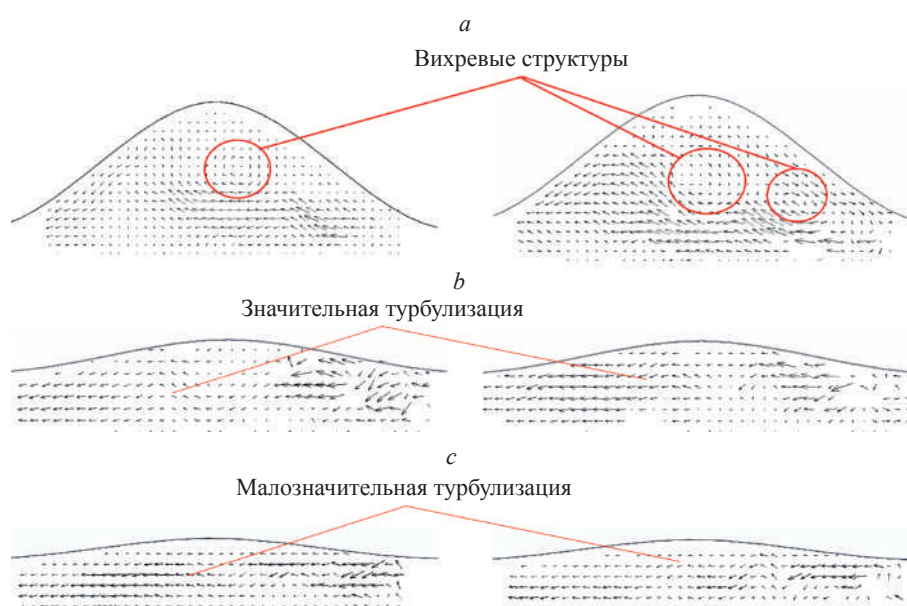


Рис. 7. Примеры мгновенных векторных полей для каналов со степенью расширения: 15 мм (*a*); 4 мм (*b*); 2,5 мм (*c*)

Fig. 7. Examples of instantaneous vector fields for channels with expansion efficiency of: 15 mm (*a*); 4 mm (*b*); 2.5 mm (*c*)

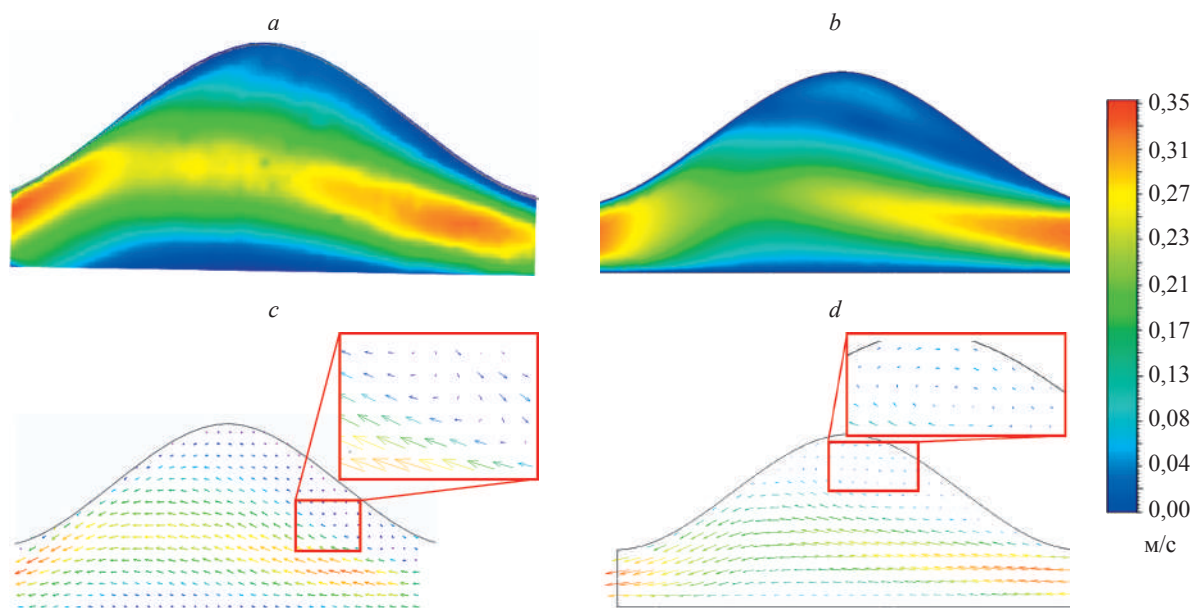


Рис. 8. Осредненные по времени скалярное (a, b) и векторное (c, d) поля модуля скорости для каналов со степенью расширения 15 мм: PIV (a, c); CFD (b, d)

Fig. 8. Time-averaged scalar (a, b) and vector (c, d) fields of the velocity modulus for a channel with an expansion efficiency of 15 mm: PIV (a, c); CFD (b, d)

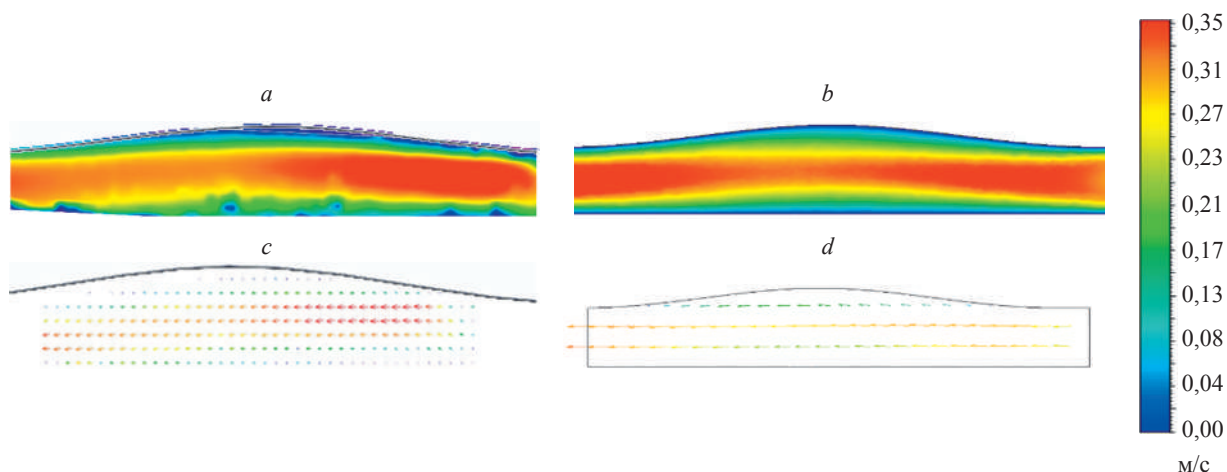


Рис. 9. Поля осредненной скорости для канала со степенью расширения 2,5 мм: скалярное, PIV (a); скалярное, CFD (b); векторное, PIV (c); векторное, CFD (d)

Fig. 9. Averaged velocity fields for a channel with an expansion of 2.5 mm: scalar, PIV (a); scalar, CFD (b); vector, PIV (c); vector, CFD (d)

данными не превышает 8 %, за исключением верхней части канала со степенью расширения 15 мм. Как было сказано выше, это связано с особенностями метода PIV.

При течениях жидкостей и газов в каналах с изменяющейся площадью проходного сечения большое значение могут иметь трехмерные вихревые явления. Для проверки значимости трехмерных эффектов выполнен анализ трехмерных результатов CFD-моделирования. Это связано с тем, что применяемая в настоящей работе техника не позволяет осуществлять анемометрию по трем направлениям скорости одновременно, однако может быть произведена съемка в другой плоскости. Для анализа целесообразности съемки в поперечном сечении были получены линии тока среды при течении

в рассматриваемых моделях (рис. 12). По полученным линиям тока, видно, что только в случае канала со степенью расширения 15 мм имеются малозначительные трехмерные эффекты, локализованные вблизи торцевых стенок. Вследствие их незначительности экспериментальное исследование трехмерных эффектов применительно к решаемой задаче нецелесообразно.

С целью количественного анализа турбулентных пульсаций на основе экспериментально полученных с применением метода PIV мгновенных и осредненных полей скорости были построены поля ТКЭ для рассматриваемых моделей каналов. На рис. 13 представлено сопоставление экспериментально и численно полученных полей ТКЭ. Как видно из рис. 13, a, b, поля

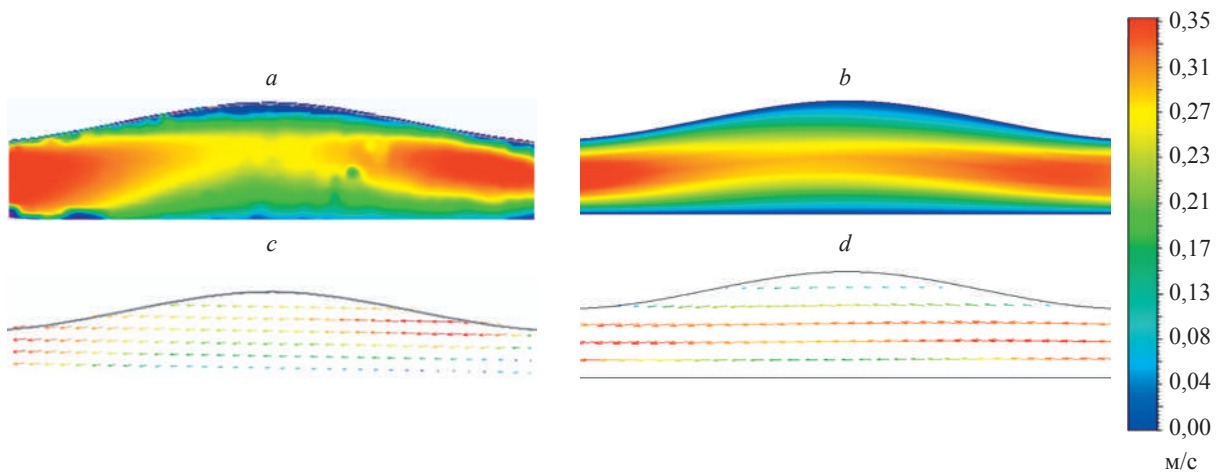


Рис. 10. Поля осредненной скорости для канала со степенью расширения 4 мм: скалярное, PIV (a); скалярное, CFD (b); векторное, PIV (c); векторное, CFD (d)

Fig. 10. Averaged velocity fields for a channel with an expansion of 4 mm: scalar, PIV (a); scalar, CFD (b); vector, PIV (c); vector, CFD (d)

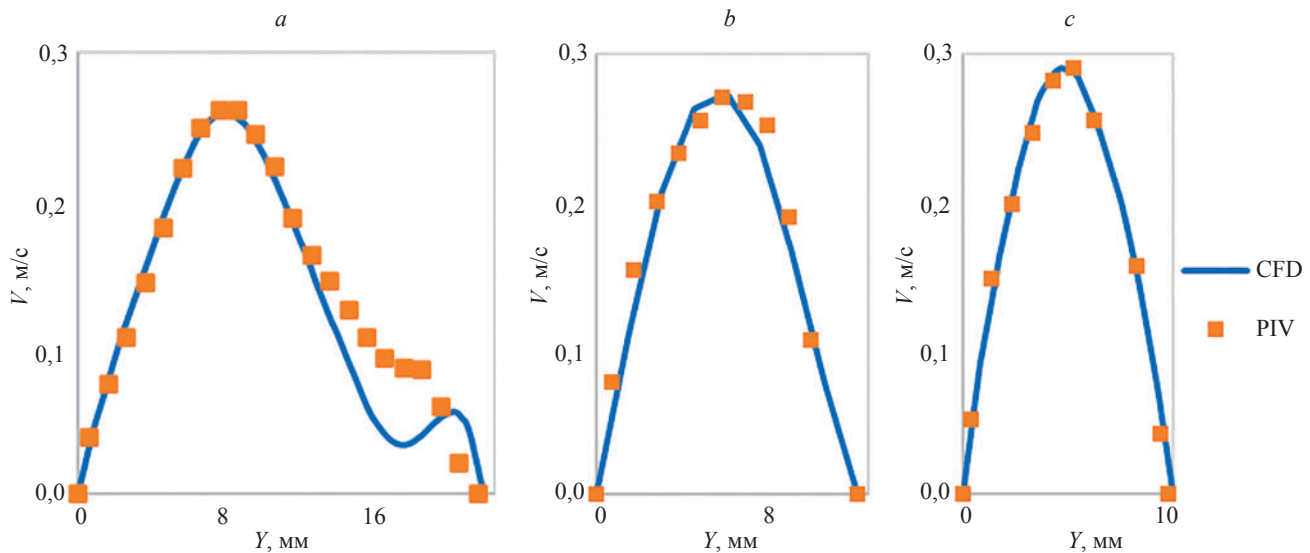


Рис. 11. Сопоставление профилей скорости (V) в зависимости от вертикальной координаты (Y), полученных по результатам моделирования и эксперимента для каналов со степенью расширения: 15 мм (a); 4 мм (b); 2,5 мм (c)

Fig. 11. Comparison of velocity (V) vs vertical coordinate (Y) profiles obtained from the results of simulation and experiment: channel with an expansion of 15 mm (a), with an expansion of 4 mm (b), with an expansion of 2.5 mm (c)

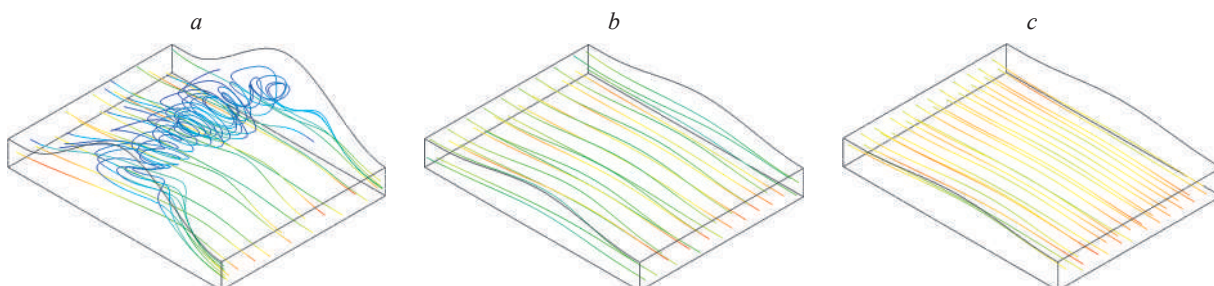


Рис. 12. Линии тока среды, полученные по результатам моделирования для каналов со степенью расширения: 15 мм (a); 4 мм (b); 2,5 мм (c)

Fig. 12. Streamlines obtained from the results of simulation: channel with an expansion of 15 mm (a), with an expansion of 4 mm (b), with an expansion of 2.5 mm (c)

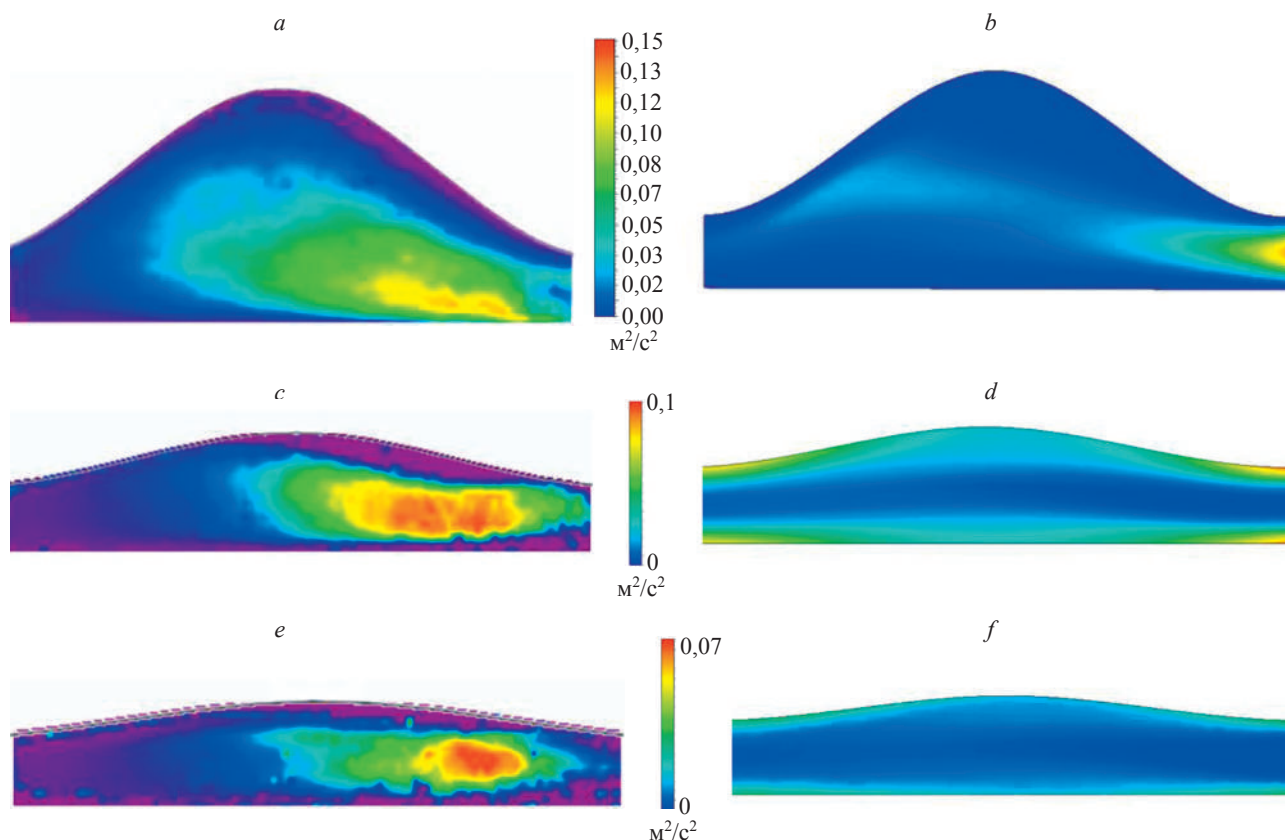


Рис. 13. Поля осредненной во времени турбулентной кинетической энергии по результатам моделирования и эксперимента для каналов со степенью расширения: 15 мм (a, b), 4 мм (c, d) и 2,5 мм (e, f): PIV (a, c, e); CFD (b, d, f)

Fig. 13. Fields of time-averaged turbulent kinetic energy based on the results of modeling and experiment for channels with degrees of expansion of 15 mm (a, b), 4 mm (c, d) and 2.5 mm (e, f): PIV (a, c, e); CFD (b, d, f)

ТКЭ, полученные с помощью CFD и PIV для канала со степенью расширения 15 мм имеют достаточно сильное расхождение на качественном уровне, однако и CFD, и PIV в целом схожим образом локализуют основные турбулентные зоны. В случае же каналов со степенью расширения 4 и 2,5 мм (рис. 13, c–f) согласие опытных и расчетных данных наблюдается только на уровне порядка величин, при этом в обоих случаях представлена различная локализация областей потока с высокой ТКЭ.

Отметим, что результаты анализа полей ТКЭ не дают оснований считать некорректными данные численного моделирования течения, в связи с тем, что техника PIV с импульсными лазерами, имеющими частоту вспышек до 15 Гц не позволяет корректно и в полной мере оценивать пульсации потока применительно к рассматриваемой задаче, так как значительная часть турбулентности (особенно в каналах с малым и средним расширениями) является мелкомасштабной и находится в области высоких волновых чисел. В связи с этим их амплитуда и, как следствие, ТКЭ не может быть корректно измерена посредством PIV. Оценка ТКЭ в данном случае возможна только в диапазоне волновых чисел пульсаций, соответствующих низким частотам до 15 Гц, например, в случае затопленных струй или вихревых следов за телом (дорожка Кармана). Схожие результаты были получены также в работе [17].

В результате, можно сделать вывод о достаточной точности выбранных методов и моделей турбулентно-

сти применительно к моделированию течений в каналах с плавным расширением и сужением при низких числах Рейнольдса. С точки зрения использования в теплообменном канале рекомендуется использовать каналы со средней степенью расширения (4 мм), так как в них не образуется крупных застойных зон, в которых может наблюдаться ухудшение теплоотдачи, а также скопление загрязнений, при этом в них обеспечивается значительный уровень турбулизации потока.

Заключение

Исследована структура течения в моделях теплообменных каналов с односторонним плавным расширением и сужением, которые имеют место в пластинчатых теплообменных аппаратах. По результатам численных исследований установлено, что в каналах с малой степенью расширения наблюдается безотрывный режим течения, тогда как при увеличенной степени расширения возникает застойная зона. Результаты численного исследования подтверждены экспериментально посредством использования метода анемометрии по изображениям частиц. Установлено, что численное моделирование течений данного класса с использованием модели турбулентности $k-\epsilon$ Realizable с хорошей точностью качественно и количественно воспроизводит поле скоростей, наблюдаемое экспериментально, с отклонением не более 8 %.

Литература

References

1. Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Varbanov P.S., Tovazhnyanskyy L.L. Heat transfer intensification in compact heat exchangers with channels of various geometries and size // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. V. 167. Part A. P. 109273. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109273
2. Киндра В.О., Максимов И.А., Паторкин Д.В., Злывко О.В., Комаров И.И. Численное и экспериментальное исследование теплогидравлических процессов в конфузorno-диффузорных каналах пластинчатых теплообменников с вытравленными каналами // *Теплоэнергетика*. 2026. № 1. С. 18–35. doi: 10.56304/S0040363625600776
3. Alyaseen N.O.M., Mehrzad S., Saffarian M.R. Modeling and design of a multistream plate-fin heat exchanger in the air separation units by pinch technology // *International Journal of Chemical Engineering*. 2023. V. 2023. P. 9204268. doi: 10.1155/2023/9204268
4. Mota F.A.S., Carvalho E.P., Ravagnani M.A.S.S. Modeling and design of plate heat exchanger // *Heat Transfer Studies and Applications*. 2015. doi: 10.5772/60885
5. Kumar S., Singh S.K., Sharma D. A Comprehensive review on thermal performance enhancement of plate heat exchanger // *International Journal of Thermophysics*. 2022. V. 43. N 7. P. 109. doi: 10.1007/s10765-022-03036-7
6. Arsenyeva O., Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Klemeš J.J., Varbanov P.S. Review of developments in plate heat exchanger heat transfer enhancement for single-phase applications in process industries // *Energies*. 2023. V. 16. N 13. P. 4976. doi: 10.3390/en16134976
7. Močnik U., Čikić A., Muhić S. Numerical and experimental analysis of fluid flow and flow visualization at low Reynolds numbers in a dimple pattern plate heat exchanger // *Energy*. 2024. V. 288. P. 129812. doi: 10.1016/j.energy.2023.129812
8. Kindra V., Bryzgunov P., Shevchenko I., Zlyvko O., Rogalev N. Numerical and experimental study of heat transfer augmentation using pin-in-dimple vortex generators // *Heat Transfer Engineering*. 2026. P. 1–15. doi: 10.1080/01457632.2026.2614111
9. Bryzgunov P.A., Pisarev D.S., Zlyvko O.V., Rogalev A.N., Rogalev N.D. Experimental study of the optically transparent gas flow and temperature field using the background oriented Schlieren method // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2025. V. 25. N 5. P. 952–960. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-5-952-960
10. Shimazaki T., Ichihara S., Tagawa Y. Background oriented schlieren technique with fast Fourier demodulation for measuring large density-gradient fields of fluids // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2022. V. 134. P. 110598. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110598
11. Rohlfs L., Weiss J. Assimilating mean velocity fields of a shockwave-boundary layer interaction from background-oriented schlieren measurements using physics-informed neural networks // *Physics of Fluids*. 2024. V. 36. N 7. P. 076134. doi: 10.1063/5.0208040
12. Yan Y., Mohanarangam K., Yang W., Tu J. Experimental measuring techniques for industrial-scale multiphase flow problems // *Experimental and Computational Multiphase Flow*. 2024. V. 6. N 1. P. 1–13. doi: 10.1007/s42757-023-0172-z
13. Wang R., Wang Y., Wang M., Wang Z., Chen X. Research on the influence of turbulence models on numerical simulation results of cross wavy heat exchanger channels // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2025. V. 161. P. 108461. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108461
14. Nguyen N.P., Maghsoudi E., Roberts S.N., Hofmann D.C., Kwon B. Understanding heat transfer and flow characteristics of additively manufactured pin fin arrays through laser-induced fluorescence and particle image velocimetry // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. V. 222. P. 125198. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125198
15. Seroshtanov V., Gusakov A. Gradient heatmetry and PIV investigation of heat transfer and flow near circular cylinders // *Inventions*. 2022. V. 7. N 3. P. 80. doi: 10.3390/inventions7030080
16. Chand A., Ali N., Tariq A. Experimental investigation of flow and heat transfer characteristics in the bend region of matrix channel // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2026. V. 172. P. 111632. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2025.111632
17. Ligus G., Wasilewski M., Anweiler S., Masiukiewicz M., Jurić F., Wojciechowski S., Pochwała S. Towards a better understanding of
1. Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P., Varbanov P.S., Tovazhnyanskyy L.L. Heat transfer intensification in compact heat exchangers with channels of various geometries and size. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, vol. 167, part A, pp. 109273. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109273
2. Kindra V.O., Maksimov I.A., Patorkin D.V., Zlyvko O.V., Komarov I.I. Numerical and experimental study of thermal-hydraulic processes in the convergent-divergent channels of plate heat exchangers with etched channels. *Thermal Engineering*, 2026, vol. 73, no. 1, pp. 14–29. doi: 10.1134/s0040601525700697
3. Alyaseen N.O.M., Mehrzad S., Saffarian M.R. Modeling and design of a multistream plate-fin heat exchanger in the air separation units by pinch technology. *International Journal of Chemical Engineering*, 2023, vol. 2023, pp. 9204268. doi: 10.1155/2023/9204268
4. Mota F.A.S., Carvalho E.P., Ravagnani M.A.S.S. Modeling and design of plate heat exchanger. *Heat Transfer Studies and Applications*, 2015, doi: 10.5772/60885
5. Kumar S., Singh S.K., Sharma D. A Comprehensive review on thermal performance enhancement of plate heat exchanger. *International Journal of Thermophysics*, 2022, vol. 43, no. 7, pp. 109. doi: 10.1007/s10765-022-03036-7
6. Arsenyeva O., Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Klemeš J.J., Varbanov P.S. Review of developments in plate heat exchanger heat transfer enhancement for single-phase applications in process industries. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 13, pp. 4976. doi: 10.3390/en16134976
7. Močnik U., Čikić A., Muhić S. Numerical and experimental analysis of fluid flow and flow visualization at low Reynolds numbers in a dimple pattern plate heat exchanger. *Energy*, 2024, vol. 288, pp. 129812. doi: 10.1016/j.energy.2023.129812
8. Kindra V., Bryzgunov P., Shevchenko I., Zlyvko O., Rogalev N. Numerical and experimental study of heat transfer augmentation using pin-in-dimple vortex generators. *Heat Transfer Engineering*, 2026, pp. 1–15. doi: 10.1080/01457632.2026.2614111
9. Bryzgunov P.A., Pisarev D.S., Zlyvko O.V., Rogalev A.N., Rogalev N.D. Experimental study of the optically transparent gas flow and temperature field using the background oriented Schlieren method. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 5, pp. 952–960. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-5-952-960
10. Shimazaki T., Ichihara S., Tagawa Y. Background oriented schlieren technique with fast Fourier demodulation for measuring large density-gradient fields of fluids. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2022, vol. 134, pp. 110598. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110598
11. Rohlfs L., Weiss J. Assimilating mean velocity fields of a shockwave-boundary layer interaction from background-oriented schlieren measurements using physics-informed neural networks. *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36, no. 7, pp. 076134. doi: 10.1063/5.0208040
12. Yan Y., Mohanarangam K., Yang W., Tu J. Experimental measuring techniques for industrial-scale multiphase flow problems. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2024, vol. 6, no. 1, pp. 1–13. doi: 10.1007/s42757-023-0172-z
13. Wang R., Wang Y., Wang M., Wang Z., Chen X. Research on the influence of turbulence models on numerical simulation results of cross wavy heat exchanger channels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, vol. 161, pp. 108461. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108461
14. Nguyen N.P., Maghsoudi E., Roberts S.N., Hofmann D.C., Kwon B. Understanding heat transfer and flow characteristics of additively manufactured pin fin arrays through laser-induced fluorescence and particle image velocimetry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 222, pp. 125198. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125198
15. Seroshtanov V., Gusakov A. Gradient heatmetry and PIV investigation of heat transfer and flow near circular cylinders. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 80. doi: 10.3390/inventions7030080
16. Chand A., Ali N., Tariq A. Experimental investigation of flow and heat transfer characteristics in the bend region of matrix channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2026, vol. 172, pp. 111632. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2025.111632
17. Ligus G., Wasilewski M., Anweiler S., Masiukiewicz M., Jurić F., Wojciechowski S., Pochwała S. Towards a better understanding of

- high Reynolds number flow in U-tube heat exchangers: Insights from particle image velocimetry and computational fluid dynamics // *Energy Conversion and Management*. 2025. V. 343. P. 120211. doi: 10.1016/j.enconman.2025.120211
18. Wang C.-S., Wang E.-S., Huang Y.-J., Liou T.-M. PIV and IRT measurements of hydrothermal performance in a U-shaped heat exchanger with 3D printed detached curved ribs // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023. V. 201. Part 1. P. 123562. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123562
 19. Ligus G., Wasilewski M., Kołodziej S., Zając D. CFD and PIV investigation of a liquid flow maldistribution across a tube bundle in the shell-and-tube heat exchanger with segmental baffles // *Energies*. 2020. V. 13. N 19. P. 5150. doi: 10.3390/en13195150
 20. Lee Y., Lee S., Park H.B., Seo K., Hsu W.-T., Moon H., et al. PIV visualization and CFD analysis of thermal-hydraulic performance in printed circuit heat exchangers with zigzag channels // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2025. V. 73. P. 106446. doi: 10.1016/j.csite.2025.106446
 21. Nobach H., Bodenschatz E. Limitations of accuracy in PIV due to individual variations of particle image intensities // *Experiments in Fluids*. 2009. V. 47. N 1. P. 27–38. doi: 10.1007/s00348-009-0627-4
 22. Kadivar M., Tormey D., McGranaghan G. A comparison of RANS models used for CFD prediction of turbulent flow and heat transfer in rough and smooth channels // *International Journal of Thermofluid*. 2023. V. 20. P. 100399. doi: 10.1016/j.ijft.2023.100399

Авторы

Брызгунов Павел Александрович — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3710-5116>, bryzgunovpa@mpei.ru

Паторкин Даниил Витальевич — ассистент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0004-9326-9996>, patorkindv@mpei.ru

Кожемякин Максим Сергеевич — инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0000-9381-4158>, kozheimiakins@mpei.ru

Жилин Михаил Сергеевич — инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0005-2062-216X>, zhilinms@mpei.ru

Киндра Владимир Олегович — кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-8406-7901>, kindravo@mpei.ru

Authors

Pavel A. Bryzgunov — PhD, Associate Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3710-5116>, bryzgunovpa@mpei.ru

Daniil V. Patorkin — Assistant, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0004-9326-9996>, patorkindv@mpei.ru

Maxim S. Kozhemyakin — Engineer, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0000-9381-4158>, kozheimiakins@mpei.ru

Mikhail S. Zhilin — Engineer, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0005-2062-216X>, zhilinms@mpei.ru

Vladimir O. Kindra — PhD, Associate Professor, National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8406-7901>, kindravo@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 19.02.2026

Одобрена после рецензирования 25.04.2026

Принята к печати 22.05.2026

Received 19.02.2026

Approved after reviewing 25.04.2026

Accepted 22.05.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»