

УДК 532.529.5:536.24

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КРУГЛЫХ СТРУЙ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ ТЕЧЕНИЯ

В. И. Терехов, В. В. Терехов, М. В. Филиппов, И. А. Чохар

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: terekhov@itp.nsc.ru, vt@itp.nsc.ru, mfilippov181096@gmail.com, dstarter@ngs.ru

Представлены результаты экспериментального исследования турбулентной структуры течения двух параллельных струй в ближней области, истекающих из длинных круглых трубок. Измерения проведены при различных расстояниях между осями трубок $s/d = 1,2; 1,8; 2,4$, а также при различных значениях числа Рейнольдса $Re = 5,5 \cdot 10^3; 1,1 \cdot 10^4$. Показано, что в ближней области тандема струй при малых расстояниях между ними продольная компонента скорости на их оси уменьшается медленнее, чем в одиночных струях. При этом расстояние между струями s/d практически не оказывает влияния на поперечный масштаб струи и турбулентные пульсации продольной компоненты скорости. Во всем поле течения, за исключением внешних областей струй, анизотропия турбулентности практически отсутствует.

Ключевые слова: две круглые струи, структура течения, турбулентность, интерференция, пульсации скорости, точка слияния, экспериментальное исследование, лазерный доплеровский измеритель скорости.

DOI: 10.15372/PMTF20220301

Введение. Аэродинамика и процессы переноса пассивной примеси в одиночных турбулентных круглых струях в настоящее время хорошо изучены [1]. Классические работы в этой области дают полное представление о структуре осредненного поля течения и характеристиках турбулентности как на основном участке струи [2, 3], так и в ее ближнем поле [4]. Течения двух параллельных струй или в общем случае системы струй, несмотря на большой практический интерес, исследованы недостаточно. Заметим, что использование пучка струй позволяет импактно охлаждать протяженные поверхности с помощью как однофазного [5–7], так и двухфазного [8] теплоносителей. Поскольку процесс взаимодействия струй в пучке является сложным и многофакторным, для решения данной задачи исследуется более простой случай истечения двух параллельных струй в затопленное пространство.

Экспериментальному и численному исследованиям распространения двух близко расположенных струй посвящено ограниченное число работ, причем большее внимание уделено плоским параллельным струям. Взаимодействие круглых струй изучалось в работах [9–18], в которых описаны некоторые особенности формирования потоков как в ближнем, так и в дальнем поле течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 20-58-26003) и в рамках государственного контракта № 121031800217-8.

© Терехов В. И., Терехов В. В., Филиппов М. В., Чохар И. А., 2022

Одним из первых экспериментальных исследований течения сдвоенных круглых струй является работа [9], в которой измерялось поле осредненных скоростей и статических давлений при числе Рейнольдса $Re = 2,3 \cdot 10^3$ и достаточно больших расстояниях между осями струй $s/d = 5,00; 8,06$ (d — диаметр сопла). Сначала две струи, взаимодействуя между собой, образуют эллипс, а затем, на расстоянии вдоль оси, приблизительно равном $x/d \approx 50$, течение становится осесимметричным. Координаты максимумов скорости струй постепенно становятся близкими, а их значения несущественно отличаются от значений максимумов в случае распространения одиночной струи в затопленном пространстве. В то же время статическое давление в двойной струе восстанавливается до давления окружающей среды быстрее, чем в одиночной струе.

В работе [10] с использованием термоанемометрического метода изучены эффекты аэродинамической интерференции между двумя параллельными струями. Показано, что распределения пульсаций продольной скорости вниз по течению в двух ортогональных плоскостях, проходящих через оси струй, имеют различный характер. При этом эффект подавления турбулентности на оси каждой струи усиливается по мере сближения струй. Аналогичным образом ведут себя рейнольдсовы напряжения.

Уменьшение расстояния между струями приводит к более быстрому их слиянию, о чем свидетельствуют экспериментальные данные [11]. Значение турбулентной кинетической энергии на оси между струями для случая близко расположенных сопел может превышать ее значение во внешнем слое смещения. По мере увеличения расстояния между струями в ближнем поле течения турбулентная энергия уменьшается. С использованием метода ортогонального разложения показано, что в спектре турбулентности наблюдаются две пиковые частоты, коррелирующие с вихревыми образованиями во внешнем и внутреннем слоях сдвига, при этом практически не зависящие от расстояния между струями.

Для недорасширенных осесимметричных струй с соотношением полных давлений $p_0/p_e = 3,4 \div 8,1$ в работе [12] экспериментально и численно показано, что по мере увеличения перепада давления взаимовлияние струй уменьшается и точка слияния струй перемещается вниз по потоку, а также предложены обобщающие корреляционные соотношения для поперечного масштаба струй и координат точки их слияния.

Наиболее детальное экспериментальное исследование процесса интерференции двух одинаковых струй выполнено в работах [13–18], в которых изучался широкий класс задач со сложными граничными условиями при наличии ограничивающих стенок и свободной верхней границы [13, 14], а также влияние расстояния между соплами на течение как круглых [15, 16], так и прямоугольных [17] струй.

Статистические свойства турбулентности трехмерного поля течения двух параллельных круглых струй с использованием PIV-метода изучались в работах [18, 19]. В парных струях перед точкой слияния значения интенсивности турбулентности и рейнольдсовых напряжений больше во внутренних слоях сдвига, ниже по потоку наблюдается обратная тенденция. Вихри более интенсивны во внутренних слоях сдвига перед точкой слияния, затем их интенсивность уменьшается и в конечном счете более интенсивными становятся вихри в области внешнего смещения.

Одним из важных факторов, влияющих на распространение затопленных турбулентных струй, является форма профиля скорости на выходе из сопла. В случае одиночных струй это влияние может быть существенным [20, 21]. Можно предположить, что и в случае двух параллельных струй будут иметь место такие же закономерности.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию аэродинамики взаимодействия двух одинаковых струй, вытекающих из длинных круглых трубок в затопленное пространство. Изучается ближнее поле течения ($x/d < 20$), где происходит формирование струйных потоков и их слияние, при различных значениях расстояния между струями

и числа Рейнольдса, а также проводится сравнение полученных данных с данными для одиночной струи.

1. Экспериментальная установка и методика измерений. Схема экспериментальной установки и характерная картина развития потоков показаны на рис. 1. Экспериментальный участок представляет собой две одинаковые параллельные трубки, закрепленные в специальной металлической пластине на заданном расстоянии s между осями трубок. Внутренний диаметр трубки равен $d = 10$ мм, толщина стенки — 1 мм. Крепящая пластина устанавливалась на расстоянии $h = 20$ мм до выходного среза трубок, что исключало ее влияние на процесс формирования течения непосредственно в зоне выхода струй и на образование застойных зон или возвратных течений. Длина трубки равна $l = 50d$, что обеспечивает на выходе развитый турбулентный профиль скорости с показателем степени $n = 1/7$ и характерным распределением пульсационной скорости, при этом на оси $u'/U_e = 0,07$, в пристенной области $u'/U_e \approx 0,17$.

Для измерений использовался двухкомпонентный лазерно-доплеровский анемометр (ЛДА) ЛАД-06С производства Института оптико-электронных информационных технологий (Россия), обладающий адаптивной временной селекцией каналов, обратным рассеянием, диапазоном измерения скоростей $0 \div 120$ м/с. Погрешность измерений мгновенной скорости составляла 2 %. Оптическая схема и полупроводниковый лазер располагались на

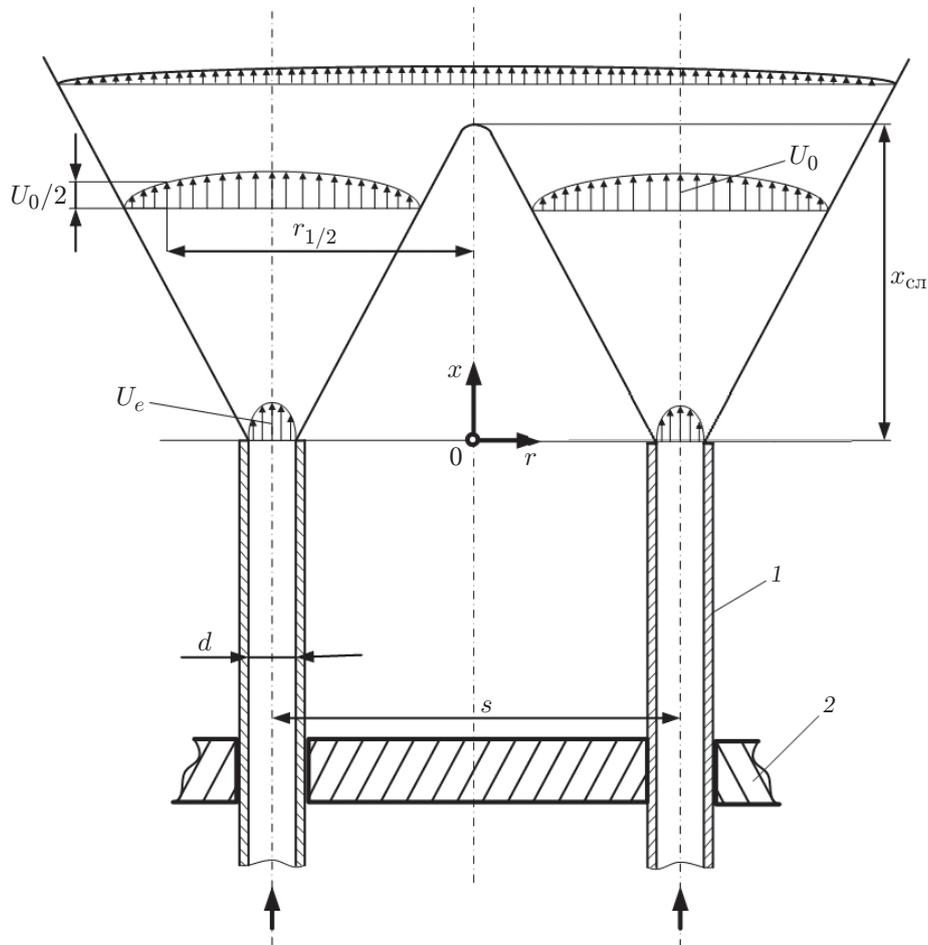


Рис. 1. Схема течения двух параллельных струй:

1 — трубки, 2 — державка; стрелки — направление вектора скорости

трехкомпонентном координатно-позиционирующем устройстве с точностью перемещения до 0,00125 мм. В качестве светорассеивающих частиц использовался аэрозоль, образующийся при конденсации паров глицерина с размером частиц, приблизительно равным 1 мкм. Среднее количество фиксируемых частиц в каждой измеряемой точке сечения составляло порядка 4000. Выполненные оценки показали, что неопределенности измерения средней скорости и ее пульсаций не превышали 1,1 %.

В качестве рабочего газа использовался воздух комнатной температуры, подаваемый из компрессора через электронные расходомеры. Для уменьшения возможного влияния гравитации на поле течения струй подводящие трубки располагались вертикально и вдув газа проводился снизу вверх. Кроме того, струи были ограждены от окружающей атмосферы прозрачным кожухом квадратного сечения с размером стороны 1 м. В ряде экспериментов, особенно при измерениях скоростей в периферийных областях струй, аэрозоль подавался вместе с рабочим газом, проходящим через трубки, а также внутрь кожуха.

Программа экспериментов включала измерение полей осредненных продольных и поперечных скоростей и их флуктуаций при различных расстояниях между струями ($s/d = 1,2; 1,8; 2,4$) и значениях числа Рейнольдса, рассчитанного по среднемассовой скорости в трубке и ее внутреннему диаметру, $Re = U_m d / \nu = 5,5 \cdot 10^3; 1,1 \cdot 10^4$.

2. Результаты измерений и их обсуждение. На первом этапе для тестирования используемых методик и аппаратуры проведено сравнение результатов измерений аэродинамических характеристик одиночной струи с имеющимися литературными данными. Полученные результаты количественно хорошо согласуются с данными [4, 20] о распределении средних скоростей по радиусу, а также о распределении максимального значения скорости по длине струи и об интенсивности ее расширения. Также полностью качественно и количественно согласуются максимальные значения компонент интенсивности пульсаций и координаты их расположения.

2.1. *Средние скорости.* Характерные профили продольной скорости в плоскости, проходящей через оси максимально близко расположенных струй ($s/d = 1,2$), показаны на рис. 2. Процесс слияния струй начинается практически сразу после их истечения, при-

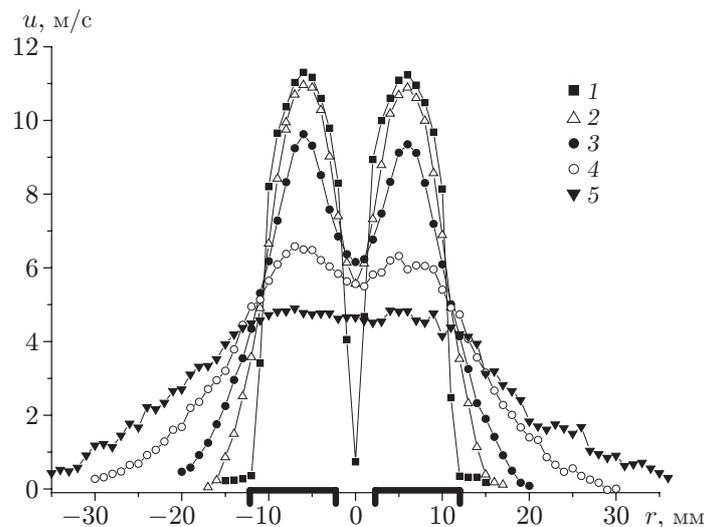


Рис. 2. Профили продольной скорости в двух затопленных параллельных струях при $Re = 5,5 \cdot 10^3$, $s/d = 1,2$ и различных значениях x/d :
 1 — $x/d = 0,5$, 2 — $x/d = 2,5$, 3 — $x/d = 5,0$, 4 — $x/d = 10,0$, 5 — $x/d = 15,0$;
 выделенные участки — границы трубок для подачи струй

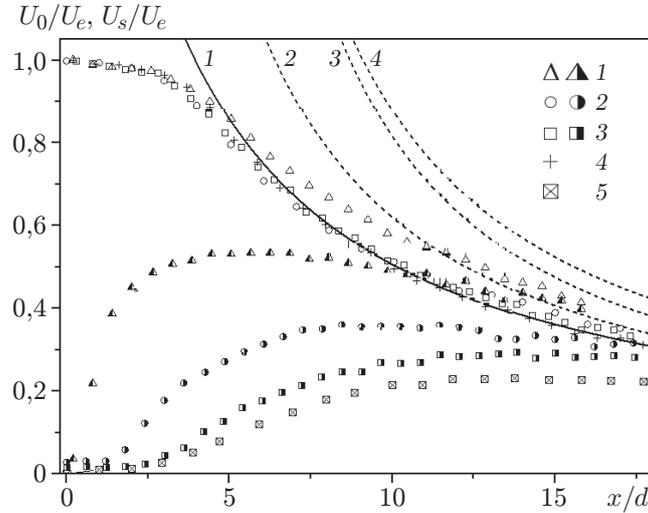


Рис. 3. Распределение максимальной скорости по длине двух параллельных струй при $Re = 5,5 \cdot 10^3$ и различных расстояниях между струями s/d : точки — эксперимент: 1–4 — данные настоящей работы (1 — $s/d = 1,2$, 2 — $s/d = 1,8$, 3 — $s/d = 2,4$, 4 — $s/d = 0$), 5 — данные [18] ($s/d = 2,8$), линии — расчет (1 — формула (1) настоящей работы, 2 — работа [4], 3 — работа [2], 4 — работа [20]); светлые точки — U_0/U_e , темные — U_s/U_e

близительно при $x/d > 15$ струи начинают двигаться как единая струя. Существенной деформации осей струй в ближнем поле течения не наблюдается, она происходит на достаточно больших расстояниях от сопла [11, 12].

Профили продольных скоростей при других расстояниях между струями аналогичны представленным на рис. 2, различие заключается лишь в том, что процесс слияния струй затягивается по длине по мере увеличения расстояния между струями. Процесс смешения также ослабляется при увеличении числа Рейнольдса.

По изменению продольной скорости на оси струи, а также ее ширины вниз по потоку от области выдува из сопла можно оценить интенсивность процесса смешения струй между собой и с окружающей средой. Изменение максимальной скорости U_0/U_e по длине струи, а также скорости U_s/U_e на линии симметрии между двумя струями при $Re = 5,5 \cdot 10^3$ и различных расстояниях между струями s/d показано на рис. 3, на котором экспериментальные данные отнесены к максимальной скорости на срезе трубок. Для сравнения на рис. 3 представлены опытные данные для случая истечения одиночной струи, описываемые эмпирическим соотношением

$$U_0/U_e = A(x/d + B)^{-1}, \quad (1)$$

где $A = 6,25$, $B = -2,3$ — коэффициенты. Худшее соответствие экспериментальным данным в ближнем поле течения имеют зависимости, полученные в работах [4] ($A = 5,9$, $B = -0,5$), [2] ($A = 5,7$, $B = -3,0$) и [20] ($A = 6,5$, $B = -2,6$). Однако в области автомодельного течения $x/d > 20$ результаты достаточно близки.

Из рис. 3 следует, что максимальная скорость уменьшается различным образом при различных расстояниях между трубками. Если при $s/d = 1,8$; $2,4$ экспериментальные данные близки и совпадают с изменением скорости для одиночной струи, то при максимально близком расположении трубок ($s/d = 1,2$) скорость на оси уменьшается менее интенсивно.

Изменение скорости на линии симметрии между струями U_s/U_e характеризует процесс смешения двух струй между собой (см. рис. 3). При малых расстояниях между струями

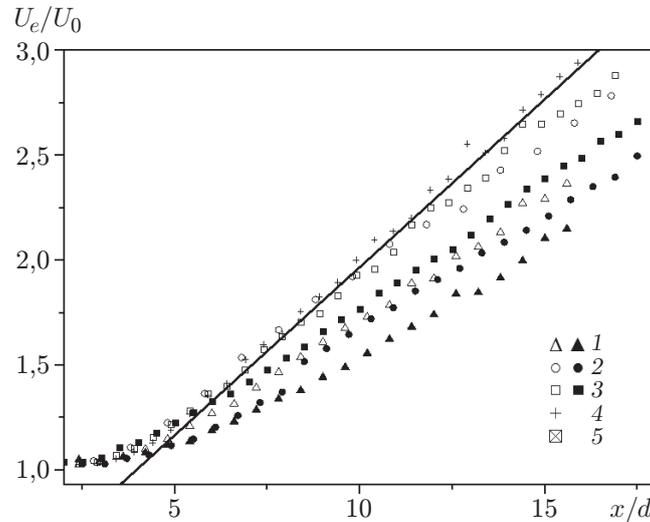


Рис. 4. Распределение максимальной скорости по длине двух параллельных струй при различных значениях числа Рейнольдса и расстояниях между струями s/d : точки — эксперимент (1 — $s/d = 1,2$, 2 — $s/d = 1,8$, 3 — $s/d = 2,4$, 4 — $s/d = 0$, 5 — $s/d = 2,8$ [18]), линия — расчет по формуле (1); светлые точки — $Re = 5,5 \cdot 10^3$, темные — $Re = 1,1 \cdot 10^4$

процесс их слияния начинается практически сразу после истечения. Полное объединение двух струй, определяемое условием равенства скоростей $U_s = U_0$, в случае максимально приближенных струй происходит при $(x/d)_{\text{сл}} \approx 15$ (см. рис. 1). По мере удаления струй друг от друга координата области их слияния смещается вниз по потоку. На рис. 3 представлены также экспериментальные данные [18] ($Re = 5,5 \cdot 10^3$, $s/d = 2,8$), которые достаточно хорошо коррелируют с результатами настоящей работы.

На рис. 4 представлены распределения скорости по оси струи при различных значениях расстояния между струями и числа Рейнольдса в координатах, обратных использованным на рис. 3, а именно $U_e/U_0 = f(x/d)$, когда изменение скорости по длине близко к линейному. Из рис. 4 следуют два важных вывода. Во-первых, в паре струй, как и при развитии одиночной струи в затопленном пространстве, максимальная продольная скорость уменьшается медленнее при большем значении числа Рейнольдса. Во-вторых, при уменьшении начального расстояния между струями s/d течение стабилизируется и скорость уменьшается более медленно. Это можно объяснить уменьшением площади области непосредственного контакта струй с окружающей средой, где процессы смешения происходят наиболее интенсивно. В промежутке между двумя спутно движущимися струями процесс смешения ослабляется, в результате чего скорость струи уменьшается значительно медленнее. Подобные эффекты наблюдались также в работе [15], однако они оказались значительно слабее вследствие большего, чем в настоящей работе, расстояния между струями.

Экспериментальные данные о характере расширения внешней части струи в плоскости, проходящей через оси струй, приведены на рис. 5, где в качестве поперечного масштаба используется координата $r_{1/2}$, в которой продольная скорость достигает половины максимального значения. Штриховая линия на рис. 5 соответствует экспериментальным данным для одиночной струи, сплошная линия получена по эмпирической формуле

$$r_{1/2}/d = C(x - x_0)/d, \quad (2)$$

обобщающей результаты работы [20] для случая истечения струи из длинной круглой трубки. В формуле (2) постоянная $C = 0,086$, величина x_0 принималась равной нулю.

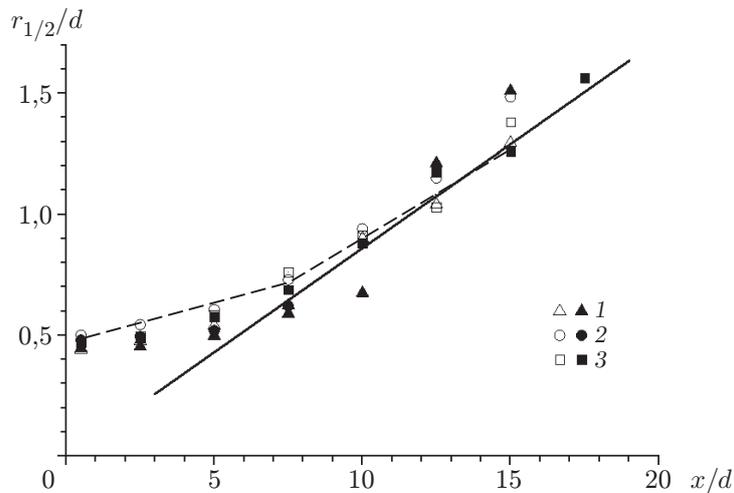


Рис. 5. Распределение полуширины струи по длине при различных значениях числа Рейнольдса и расстояниях между струями s/d : точки — эксперимент (1 — $s/d = 1,2$, 2 — $s/d = 1,8$, 3 — $s/d = 2,4$), штриховая линия — экспериментальные данные для одиночной струи, сплошная — расчет по формуле (2); светлые точки — $Re = 5,5 \cdot 10^3$, темные — $Re = 1,1 \cdot 10^4$

Несмотря на значительный разброс экспериментальных точек на рис. 5, можно отметить, что расстояние между струями и число Рейнольдса оказывают незначительное влияние на скорость расширения струй в ближней области течения. Это свидетельствует о том, что в данной зоне процессы взаимодействия струй не влияют на их расширение во внешней части. Об этом также свидетельствуют данные экспериментальных работ [15–19], в которых существенное влияние параметра s/d на расширение струй проявляется при больших расстояниях от сопла ($s/d > 30$).

2.2. Пульсационные характеристики. Поле пульсаций продольной компоненты скорости в паре параллельных струй характеризуется большой неоднородностью (рис. 6). На рис. 6, где все данные масштабированы на одну и ту же величину U_e — максимальную скорость в трубке, видно, что интенсивность турбулентности существенно меняется как в продольном, так и в поперечном направлениях. При небольших расстояниях от выхода из трубок ($s/d < 5$) имеются два отчетливо выраженных максимума пульсаций с каждой стороны относительно оси симметрии $r = 0$. Положение максимумов соответствует координатам точек внутреннего диаметра трубок, в которых начинается формирование слоев смещения как между струями, так и во внешней по отношению к паре струй области.

Как и предполагалось, в зоне между струями пульсации осевой скорости в начальных сечениях близки к нулю. Далее вниз по течению амплитуда пульсаций увеличивается, однако их уровень всегда ниже, чем во внешней зоне, и эта тенденция сохраняется на всем протяжении струи. Постепенно исчезает и максимум пульсаций во внутренней зоне между струями. В итоге распределение продольных пульсаций принимает форму кривой только с одним максимумом, расположенным во внешнем слое смещения каждой струи, что аналогично поведению одиночной струи.

Поперечные пульсации скорости ведут себя аналогично. Это следует из рис. 6, б, на котором показано распределение коэффициента анизотропии турбулентности, представляющего собой отношение среднеквадратичных компонент пульсационной скорости u'/v' , по поперечной координате. Практически во всем поле течения струй значение коэффициента анизотропии близко к единице: $u'/v' \approx 1$. Исключение составляют периферийные области струи, в которых продольные пульсации значительно превышают поперечные, а также

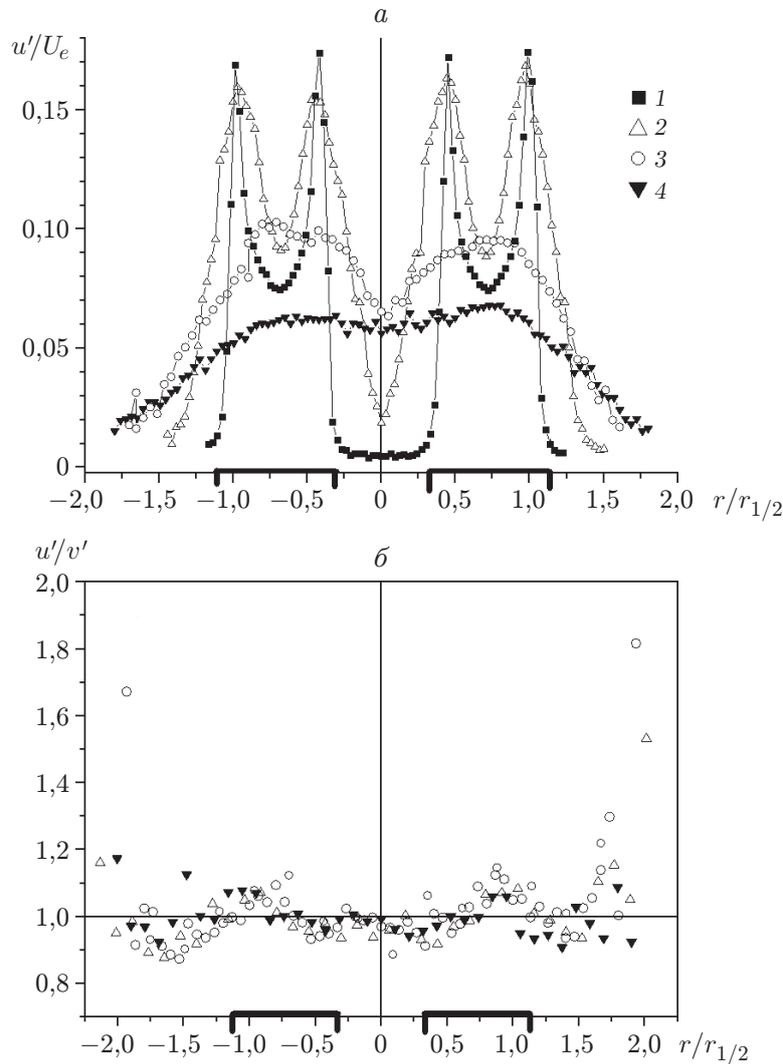


Рис. 6. Профили интенсивности продольной пульсации скорости при $Re = 5,5 \cdot 10^3$, $s/d = 2,4$ (а) и коэффициента анизотропии турбулентности при $Re = 5,5 \cdot 10^3$, $s/d = 1,2$ (б) в случае течения двух параллельных струй при различных значениях x/d : 1 — $x/d = 0,5$, 2 — $x/d = 2,5$, 3 — $x/d = 10$, 4 — $x/d = 15$

небольшие области при $r/r_{1/2} = \pm 1$, в которых наблюдаются локальные экстремумы, однако коэффициент анизотропии незначительно отличается от единицы.

Распределения продольной компоненты интенсивности турбулентности вдоль оси струй и в плоскости симметрии между ними представлены на рис. 7, где также приведены данные для одиночной струи.

Характеры изменения интенсивности турбулентности по длине для одиночной струи и пары струй качественно близки. После истечения струи величина u'/U_e начинает интенсивно возрастать, в конце начального участка ($x/d \approx 5$) достигает максимума, после чего турбулентность начинает уменьшаться. Количественные различия данных для этих случаев значительны, и процесс истечения двух параллельных струй происходит при более высоком (более чем на 40 %) уровне турбулентных пульсаций. При этом изменение расстояния между струями оказывает незначительное влияние на распределение турбулентных характеристик вдоль оси струй.

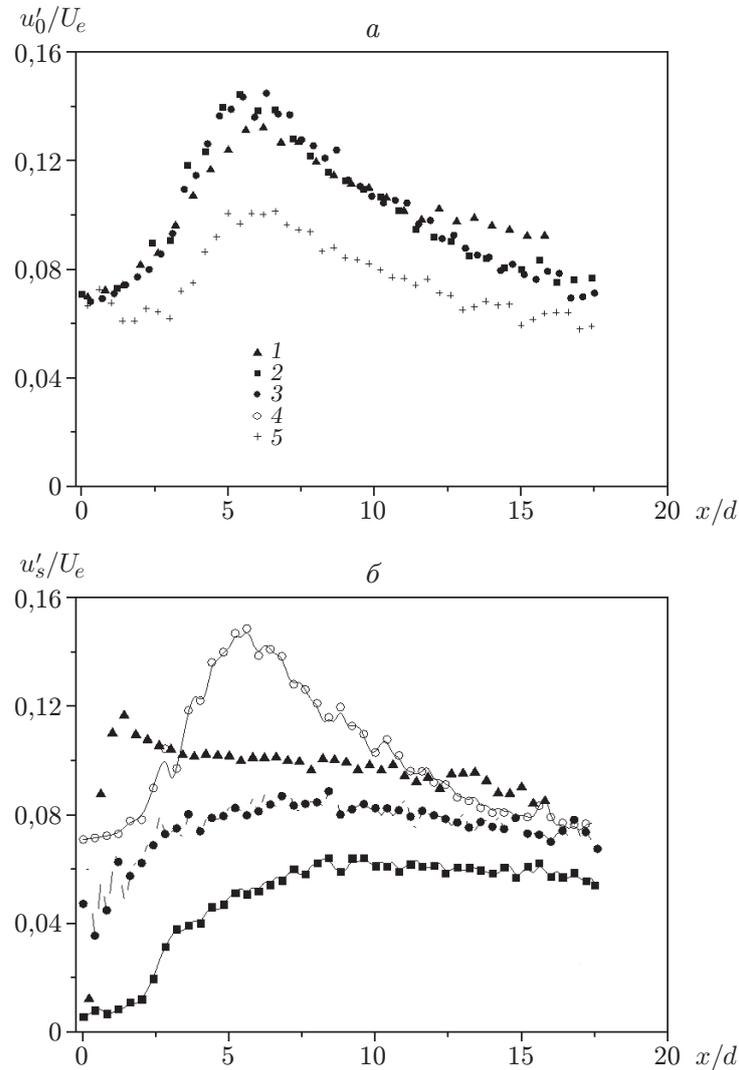


Рис. 7. Распределения продольных пульсаций скорости вдоль оси струй (а) и в плоскости симметрии (б) при $Re = 5,5 \cdot 10^3$ и различных расстояниях между струями:

1 — $s/d = 1,2$, 2 — $s/d = 1,8$, 3 — $s/d = 2,4$, 4 — $s/d = 1,8$ (на оси струи), 5 — $s/d = 0$ (одиночная струя)

Продольные пульсации на линии симметрии между струями ($s/d = 0$) существенно зависят от расстояния между осями струй. Это следует из рис. 7,б, где представлены результаты измерений при $Re = 5,5 \cdot 10^3$. Сначала непосредственно за областью ддува струй величина пульсаций скорости близка к нулю. Затем в зависимости от величины s/d происходит их резкий рост (при близком расположении трубок ($s/d = 1,2$)) либо плавное увеличение до достижения пологого максимума (для удаленных друг от друга трубок ($s/d = 1,8; 2,4$)). Из рис. 7,б следует, что по мере увеличения расстояния между трубками интенсивность турбулентности существенно уменьшается.

Для выявления особенностей поведения пульсационных характеристик на оси одной из двух струй и на линии симметрии между ними на рис. 7,б показаны результаты измерений на оси при $s/d = 1,8$. Эти данные принципиально различаются как качественно, так и количественно. Только на больших расстояниях от области истечения по мере слияния

струй экспериментальные данные на оси струи начинают сближаться с результатами измерений на оси симметрии.

Заключение. Представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия двух параллельных круглых струй, истекающих из длинных круглых трубок в затопленное пространство. Изучено влияние расстояния между осями струй ($s/d = 1,2; 1,8; 2,4$) при двух значениях числа Рейнольдса ($Re = 5,5 \cdot 10^3; 1,1 \cdot 10^4$) на распределение компонент средних и пульсационных скоростей. Наиболее сильная интерференция струй наблюдается при их максимальном сближении. Так, при $s/d = 1,2$ продольная скорость струй на оси значительно выше, чем в одиночной струе. Это свидетельствует о подавлении процессов смешения в области между струями. С увеличением числа Рейнольдса данный эффект ослабляется. Поперечный масштаб струи во внешней области смешения практически не зависит от параметра s/d и близок к соответствующему масштабу одиночной струи.

Распределение интенсивности пульсаций скорости неоднородно как поперек, так и вдоль струй. В области, примыкающей к срезу трубок, с каждой стороны от оси симметрии между струями имеется два максимума, положение которых соответствует координатам внутреннего диаметра трубок, где начинается формирование слоев смешения как между струями, так и во внешней области.

По мере продвижения вниз по течению максимум пульсаций во внутренней зоне между струями исчезает и начинают преобладать процессы смешения во внешней области. В результате распределение продольных пульсаций принимает форму кривой с одним максимумом, расположенным во внешнем слое смешения каждой струи, что аналогично поведению одиночной струи. Пульсации скорости в поперечном направлении подобны пульсациям для продольной координаты, в результате чего значения коэффициента анизотропии турбулентности близки к единице во всей области течения, за исключением узкой периферийной зоны во внешнем слое смешения.

Распределение продольной компоненты турбулентных пульсаций в двойных струях вдоль их осей качественно подобно распределению в случае течения одиночной струи. Однако ее значение в двойной струе более чем на 40 % выше, чем в одиночной струе, и от расстояния между струями величина пульсаций на оси практически не зависит. На линии симметрии между струями ($s/d = 0$), в отличие от оси струй, турбулентность существенно зависит от расстояния между осями струй и по мере увеличения расстояния между трубками интенсивность турбулентности значительно уменьшается. На больших расстояниях от источника струи, когда завершается процесс слияния струй, интенсивности турбулентных пульсаций на оси струи и на линии симметрии становятся близки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.
2. **Wyganski I., Fiedler H.** Some measurements in the self-preserving jet // J. Fluid Mech. 1969. V. 38, N 3. P. 577–612.
3. **Panchapakesan N. R., Lumley J. L.** Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium. 1. Air jet // J. Fluid Mech. 1993. V. 246. P. 197–223.
4. **Boguslawski L., Popiel Cz. O.** Flow structure of the free round turbulent jet in the initial region // J. Fluid Mech. 1979. V. 90, N 3. P. 531–539.
5. **Lee J., Ren Z., Ligrani P., et al.** Cross-flow effects on impingement array heat transfer with varying jet-to-target plate distance and hole spacing // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 75. P. 534–544.

6. **Caliskan S., Baskaya S., Calisir T.** Experimental and numerical investigation of geometry effects on multiple impinging air jets // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 75. P. 685–703.
7. **Ghahremanian S., Svensson K., Tummers M. J., Moshfegh B.** Near-field mixing of jets issuing from an array of round nozzles // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2014. V. 47. P. 84–100.
8. **Карпов П. Н., Назаров А. Д., Серов А. Ф., Терехов В. И.** Испарительное охлаждение импульсным спреем бинарного раствора этанола и воды // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 14. С. 8–15.
9. **Okamoto T., Yagita M., Watanabe A., Kawamura K.** Interaction of twin circular jets // Bull. JSME. 1985. V. 28, N 238. P. 617–622.
10. **Harima T., Fujita S., Osaka H.** Turbulent properties of twin circular free jets with various nozzle spacing // Proc. of the ERCOFTAC Intern. symp. engineering turbulence modelling and experiments, Sardinia (Italy), 23–25 May 2005. S. l.: Elsevier B. V., 2005. P. 501–510.
11. **Zang B., New T. H.** On the wake-like vortical arrangement and behaviour associated with twin jets in close proximity // Experim. Thermal Fluid Sci. 2015. V. 69. P. 127–140.
12. **Alkislar M. B., Krothapalli A., Choutapalli I., Lourenco L.** Structure of supersonic twin jets // AIAA J. 2005. V. 43, N 11. P. 2309–2318.
13. **Essel E. E., Laban A., Rahman M. S., et al.** Turbulent structure of submerged twin jets // Proc. of the 46th AIAA Fluid dynamics conf., Washington (USA), 13–17 June 2016. N. Y.: Amer. Inst. of Aeronaut. and Astronaut., Inc., 2016. P. 1–10.
14. **Essel E. E., Tachie M. F.** Flow characteristics of submerged twin jets interacting with free surface // AIAA J. 2017. V. 55, N 10. P. 3622–3625.
15. **Laban A., Aleyasin S. S., Tachie M. F., Koupriyanov M.** Experimental investigation of nozzle spacing effects on characteristics of round twin free jets // J. Fluids Engng. 2019. V. 141. 071201.
16. **Laban A.** Experimental investigation of nozzle spacing effects on characteristics of round twin free jets: Master of Sci. Thesis. Manitoba, 2018.
17. **Oskouie R. N., Tachie M. F., Wang B.-C.** Effect of nozzle spacing on turbulent interaction of low-aspect-ratio twin rectangular jets // Flow, Turbulence Combust. 2019. V. 103. P. 323–344.
18. **Aleyasin S. S., Tachie M. F.** Statistical properties and structural analysis of three-dimensional twin round jets due to variation in Reynolds number // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2019. V. 76. P. 215–230.
19. **Aleyasin S. S.** On the effects of initial conditions on statistical properties of single and twin turbulent jets: PhD thesis. Manitoba, 2018.
20. **Xu G., Antonia R. A.** Effect of different conditions on a turbulent round free jet // Experim. Fluids. 2001. V. 33. P. 677–683.
21. **Леманов В. В., Терехов В. И.** Особенности теплообмена в лобовой точке импактной осесимметричной струи при малых числах Рейнольдса // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 3. С. 482–484.

*Поступила в редакцию 21/І 2021 г.,
после доработки — 25/V 2021 г.
Принята к публикации 31/V 2021 г.*