

УДК 533.6

Исследование средних и пульсационных характеристик течения в следе за цилиндрами, покрытыми текстильными материалами*

Д.С. Миронов¹, В.А. Лебига^{1,2}, Дж.Дж. Мян³, В.Н. Зиновьев¹, А.Ю. Пак¹
М.-С. Цай³, Ю.-Х. Лай³

¹Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

²Новосибирский государственный университет

³Национальный Чен-Гун Университет, Тайнань, Тайвань

E-mail: mdsdaimond@gmail.com

В работе приводятся результаты исследования влияния текстильных материалов на структуру аэродинамического следа за моделью плохообтекаемого тела, в качестве которой использовались квазидвумерный и консольный цилиндры. Идентичные ткани были ранее опробованы в работах соавторов для определения коэффициента сопротивления двумерного цилиндра. Изменение его диаметра в таком случае составляло не более 1 % и считалось незначительным. Применение тканей позволило снизить значение критического значения числа Рейнольдса до величины $2 \cdot 10^5$. Двумерные и трехмерные течения оказались схожи по уровню пульсаций, при этом вследствие трехмерности течения за консольным цилиндром происходит сужение следа. По результатам спектрального анализа показано полное подобие трехмерных течений и двумерных течений как для обтекания гладкого цилиндра, так и для покрытого образцами тканей.

Ключевые слова: дозвуковое течение, двумерное обтекание цилиндра, трехмерное обтекание цилиндра, текстильные материалы, пульсации скорости.

Введение

При обтекании какого-либо тела, в зависимости от конкретных условий, может быть поставлена задача подавления или интенсификации процесса генерации вихрей, увеличения или уменьшения коэффициента сопротивления, усиления или подавления производимого уровня шума. Применяемые методы по управлению течением можно разделить на два общих класса: активные и пассивные. Активные методы подразумевают изменение геометрии обтекаемых поверхностей тела, внешнее воздействие на течение или подвод энергии в поток. Степень воздействия может определяться параметрами течения в реальном времени или по заранее определенным алгоритмам. Активные методы позволяют получать наиболее оптимальные характеристики в широком диапазоне параметров течения, но могут оказаться слишком сложными при проектировании

* Исследование поддержано РФФИ (грант № 18-58-52005 МНТ_а).

или изготовлении реальных устройств, а также более энергозатратными при функционировании.

Пассивные методы управления подразумевают внесение предопределенного изменения в геометрию обтекаемого тела, характеристики его поверхности и т.п. для изменения структуры течения желаемым образом. Такое изменение может иметь положительный эффект не при всех режимах течения, но является достаточно простым по сравнению с активными методами. Одним из наиболее распространенных методов управления течением является структурирование поверхности обтекаемого тела посредством нанесения на нее лунок [1, 2] шероховатости [3], выступов [4] и пр. [5–9].

Обтекание цилиндров с различного рода поверхностями является объектом исследования с середины прошлого века [5–9]. Отмечается, что использование структурированной поверхности может привести к переходу к критическому режиму обтекания при меньших числах Рейнольдса, по сравнению с гладкой поверхностью. При этом диапазон околокритического режима обтекания, в котором наблюдаются минимальные значения коэффициента сопротивления, будет более узким [5]. Для цилиндров с поперечными (направленными перпендикулярно образующей) V-образными пазами [6] зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса аналогична таковой для случая гладкого цилиндра с эффективным диаметром, пересчитанным по полной площади поверхности. В работе [7] было предложено использовать этот эффект для получения более высоких чисел Рейнольдса по диаметру цилиндра в экспериментах, т.к. его значения, достигаемые в аэродинамических установках, часто ниже наблюдаемых на практике.

С развитием современных технологий, в том числе микроэлектромеханических систем (МЭМС), трехмерной печати и пр., появилась возможность производить более сложное и точное структурирование поверхностей обтекаемых тел. Например, в работе [8] на поверхность цилиндра была приклеена пленка с V-образными пазами (микрориблетами), имеющими размеры 300×180 мкм по ширине и глубине и ориентированными перпендикулярно образующей цилиндра. Использование таких пазов позволило уменьшить коэффициент сопротивления цилиндра по сравнению с гладким цилиндром при малых числах Рейнольдса, но привело к обратному эффекту при высоких. Авторы связали этот эффект с тем, что при высоких числах Рейнольдса набегающий поток активнее взаимодействует с микрориблетами, это приводит к разбиванию вихрей в пристенной области на более мелкие и перекачки кинетической энергии потока в турбулентную.

В профессиональном спорте, связанном с относительно большими скоростями (конькобежный спорт, прыжки с трамплина, велоспорт и т.п.), в качестве средства для уменьшения сопротивления используется специальная ткань, из которой изготавливается костюм спортсмена [10]. Однако ткани могут быть удобны для применения и во многих других схожих аэродинамических задачах благодаря своей малой толщине, многообразию видов нитей и способов плетения, относительной простоте повторения сложной формы обтекаемого тела и т.д.

Для изучения влияния ткани на средние и пульсационные характеристики в следе за цилиндрами в настоящей работе были отобраны два образца из числа исследованных авторами [11, 12], имеющих условные обозначения C05 и C22 (рис. 1) и обеспечивающих в группе C один из наиболее низких коэффициентов лобового сопротивления при минимальной шероховатости.

Экспериментальное оборудование. Модели цилиндров

Эксперименты по измерению пульсаций за цилиндром проводились в дозвуковой аэродинамической трубе Аэрокосмического научно-технологического исследовательского центра национального Чен-Гун университета (Aerospace Science and Technology Research Center of National Cheng-Kung University, ASTRC/NCKU). Данная аэродинамическая труба представляет собой установку прямоточного типа с вентиляторным приводом,



Рис. 1. Образцы использованных тканей.

в которой реализуется поток в диапазоне скоростей от 0,5 до 48 м/с. Она имеет прямоугольную закрытую рабочую часть высотой 900 мм, шириной 1100 мм и длиной 4400 мм. Интенсивность турбулентности набегающего потока, измеренная на входе в рабочую часть, составляет около 0,6 %. Рабочие отверстия в нижней, верхней и боковой стенках рабочей части позволяют устанавливать различные пилоны для зондов.

Модели круговых цилиндров диаметром $D = 150$ мм располагались вертикально на оси симметрии нижней стенки. Для моделирования квазидвумерного обтекания использовалась модель цилиндра высотой $H = 900$ мм, для трехмерного — высотой $H = 600$ мм, соотношения высоты к диаметру составило соответственно $H/D = 6$ и 4. Согласно выводам исследования [7] оба цилиндра можно считать гладкими, поскольку относительная шероховатость Δ/D меньше $3,5 \cdot 10^{-5}$, где Δ — измеренный размер высоты шероховатости поверхности цилиндров.

Для измерения скорости за цилиндром использовался датчик термоанемометра с чувствительным элементом в виде вольфрамовой нити диаметром 8 мкм и длиной около 2 мм, который подключался к термоанемометру постоянного сопротивления СТА-5. Данный термоанемометр был разработан и изготовлен в Институте теоретической и прикладной механики им. Христиановича СО РАН (ИТПМ). Он имеет частотный диапазон до 200 кГц при высоких значениях перегрева нити датчика. Прибор может работать с ниточными датчиками, имеющими холодное сопротивление до 10 Ом, и обеспечивать относительный коэффициент перегрева нити до 0,8.

Пилон, на котором закреплялся датчик, устанавливался на нижней стенке рабочей секции. При этом обеспечивалась возможность его дискретного перемещения с помощью механического координатника. Используемая система координат изображена на рис. 2. Положение y' представляет собой расстояние по оси Y от свободного торца

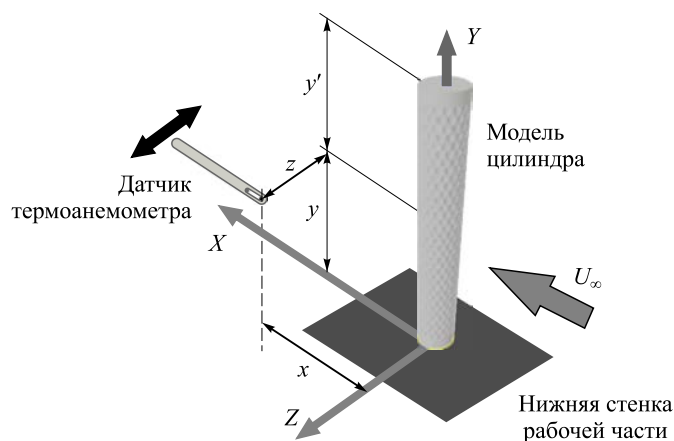


Рис. 2. Расположение системы координат.

цилиндра до сечения расположения датчика, что дает представление о том, как далеко находится датчик.

Изменение числа Рейнольдса при проведении экспериментов осуществлялось за счет изменения скорости набегающего потока, при этом общий диапазон числа Рейнольдса по диаметру цилиндра составил $9,7 \cdot 10^4 - 4,4 \cdot 10^5$ для всех экспериментов с двумерным и консольным цилиндрами.

Анализ экспериментальных данных

Рассмотрим вначале результаты измерений в следе за гладким квазидвумерным цилиндром. На рис. 3 представлены профили средней скорости и уровня пульсаций скорости в следе за двумерным цилиндром в положении $x/D = 3$, при этом положение y соответствует середине цилиндра. Для значений чисел Рейнольдса $Re_D = 1,24, 2,23$ и $3,35 \cdot 10^5$ имеет место постепенное увеличение дефекта средней скорости, а уровень пульсаций при этом постепенно уменьшается. Однако для максимального значения $Re_D = 4,4 \cdot 10^5$ наблюдается резкое снижение как величины дефекта скорости, так и интенсивности пульсаций, что, по всей видимости, свидетельствует о переключении течения в следе за цилиндром на критический режим при некотором числе Рейнольдса в диапазоне $3,35 \cdot 10^5 \leq Re_D \leq 4,4 \cdot 10^5$. При максимальном значении Re_D интенсивность пульсаций скорости примерно на 20 % ниже по сравнению с первыми тремя случаями. Для всех профилей пульсаций был также рассчитан третий статистический момент — коэффициент эксцесса, применение которого имеет определенный практический смысл, так как он является достаточно четким индикатором границ области следа (на рисунке не показан). С его помощью было установлено, что для первых трех значений числа Рейнольдса относительное положение границ следа меняется незначительно и равно $|z/D| = 1,5$, а для наибольшего числа Рейнольдса след становится более узким — $|z/D| = 1$.

Вторая серия экспериментов проводилась с цилиндром конечного удлинения. Сравнение профилей параметров потока, измеренных для одних и тех же условий при двумерном и трехмерном обтекании цилиндров, показано на рис. 4. Скорости потока во время экспериментов при двумерном и трехмерном обтекании цилиндров соответствуют числу

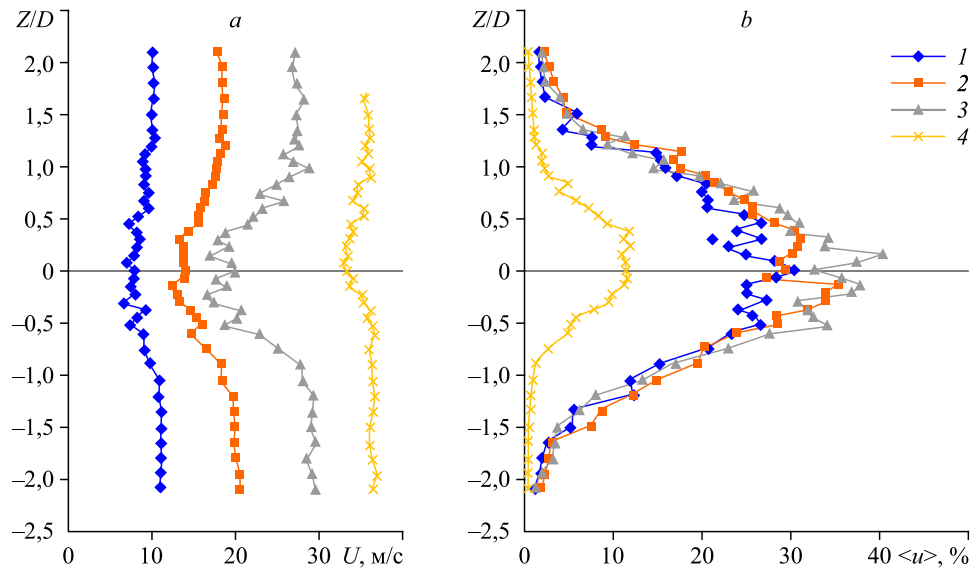


Рис. 3. Профили средней скорости (а) и пульсаций скорости (b) в следе за гладким двумерным цилиндром.
 $Re_D = 1,24 \cdot 10^5$ (1), $2,23 \cdot 10^5$ (2), $3,35 \cdot 10^5$ (3), $4,4 \cdot 10^5$ (4).

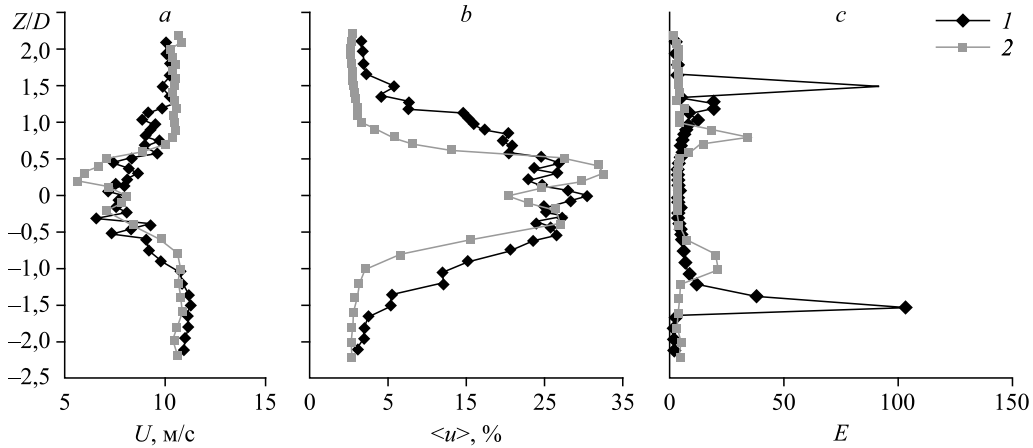


Рис. 4. Профили средней скорости (а), пульсаций скорости (b) и коэффициент эксцесса (с) в следе за гладкими цилиндрами при двумерном (1) и трехмерном (2) обтекании.

$$x/D = 2, y'/D = 0,87, Re_D = 1,1 \cdot 10^5.$$

Рейнольдса $Re_D = 1,1 \cdot 10^5$, то есть докритическому режиму течения в следе. Как видно из рисунка, значения дефекта максимальной скорости и уровня пульсаций практически не изменились. Однако наличие свободного торца цилиндра приводит к заметному сужению области следового течения. При положении датчика термоанемометра $y'/D = 0,87$ координаты границ следа составляют $|z/D| = 0,8$ вместо $|z/D| = 1,5$ для двумерного потока (см. рис. 4с). Описанные профили получены при $x/D = 2$.

Профили средней скорости потока, пульсаций скорости и коэффициента эксцесса для различных чисел Рейнольдса для трехмерного обтекания гладкого цилиндра представлены на рис. 5. Полученные профили соответствуют положению датчика термоанемометра $x/D = 5$ и $y'/D = 2$. Снижение уровня пульсаций скорости для $Re_D = 3,81 \cdot 10^5$ является значительным и составляет около 10 % по сравнению с более низкими значениями чисел Рейнольдса (см. рис. 5b). При этом дефект скорости и ширина области следа прак-

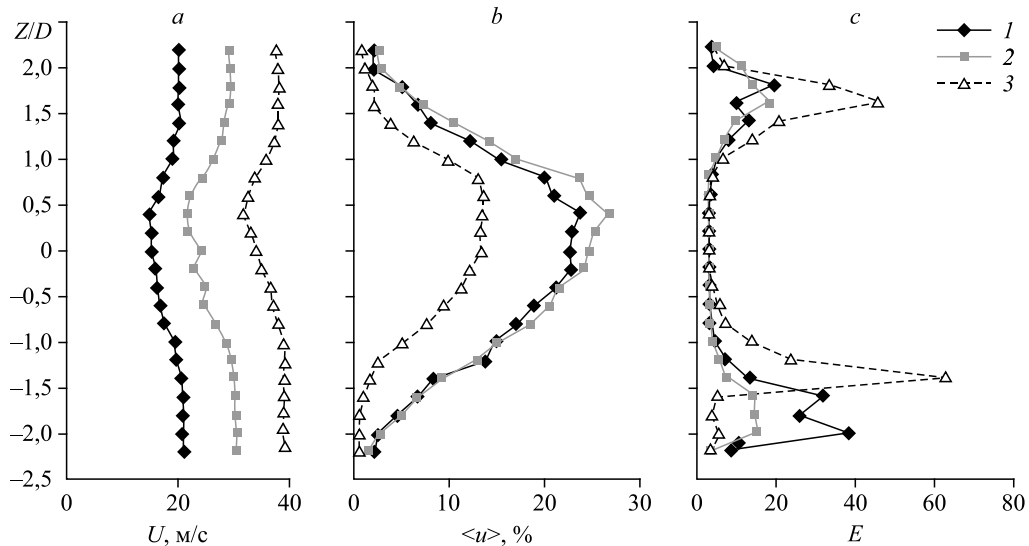


Рис. 5. Профили средней скорости (а), пульсаций скорости (b) и коэффициент эксцесса (с) в следе за гладким цилиндром при трехмерном обтекании для различных чисел Рейнольдса при $x/D = 5, y'/D = 2$.

$$Re_D = 1,95 \cdot 10^5 (1), 2,88 \cdot 10^5 (2), 3,81 \cdot 10^5 (3).$$

тически одинаковы. Это свидетельствует о том, что условия набегающего потока еще не достигли критического состояния.

Чтобы определить влияние текстильного материала на обтекание кругового цилиндра, были отобраны два вида образцов ткани. В исследовании [12] эти два образца были обозначены как С05 и С22. Было установлено, что при использовании ткани С05 коэффициент лобового сопротивления круглого цилиндра имеет одно из самых низких значений, а критическое число Рейнольдса $Re_{D,Crit}$ равно приблизительно $2 \cdot 10^5$. Ткань С22 имеет минимальную шероховатость в группе С образцов ткани. Шероховатость в работе [12] определялась как $S_{10z} = S_{5p} + S_{5v}$, где S_{5p} — средняя высота пяти самых высоких пиков, S_{5v} — средняя глубина пяти самых глубоких впадин в пределах измеренной площади поверхности. В результате цилиндру, покрытому образцом С22, соответствует наивысшее значение критического числа Рейнольдса — $Re_{D,Crit}$ приблизительно равно $2,5 \cdot 10^5$. При этом коэффициент лобового сопротивления данной ткани минимален среди всех материалов С-типа [11, 12].

Применяя подход, предложенный авторами [6], и принимая значение критического числа Рейнольдса для гладкого консольного цилиндра равным $3 \cdot 10^5$, можно рассчитать эквивалентный диаметр покрытых тканями цилиндров. Для цилиндра, покрытого образцом ткани С05, он составит 184 мм, для цилиндра с образцом С22 — 164 мм. Толщина слоя ткани составляет около 1,5 мм. Таким образом, при фактическом увеличении диаметра цилиндра на 1 %, можно достичь увеличения его эквивалентного диаметра по числу Рейнольдса более чем на 22 и 9 % соответственно, используя указанные материалы.

Сравнение средней скорости и уровня пульсаций скорости при одинаковых условиях потока для цилиндров с различными типами поверхностей представлено на рис. 6. Эти профили получены при $Re_D = 1,95 \cdot 10^5$ и положении датчика термоанемометра $x/D = 5$, $y'/D = 2$. Такая величина числа Рейнольдса близка к его критическому значению для цилиндра, покрытого образцом ткани С05, и к докритическому — для двух других случаев. Отличием режимов течения объясняется меньший дефект скорости и уровень пульсаций для случая с С05.

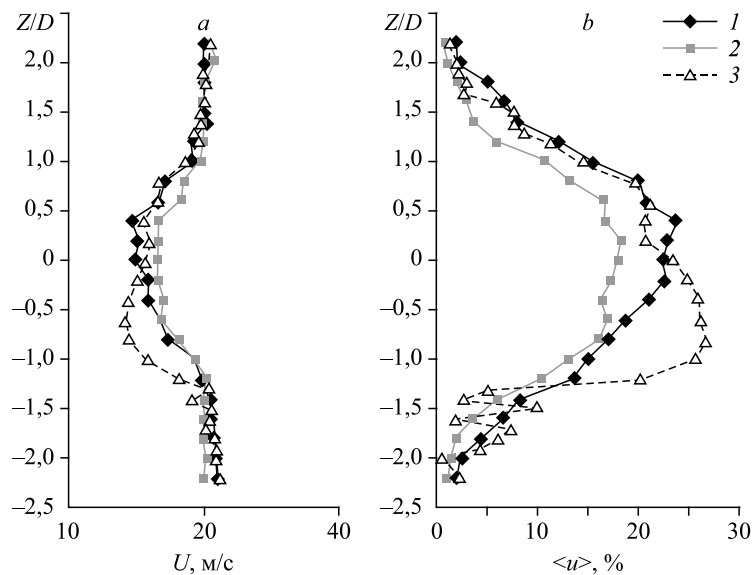


Рис. 6. Профили средней скорости (а) и пульсаций скорости (б) за цилиндром при трехмерном обтекании для различных видов поверхностей для $x/D = 5$, $y'/D = 2$, $Re_D = 1,95 \cdot 10^5$. Цилиндр с гладкой поверхностью (1) и с поверхностями С05 (2) и С22 (3).

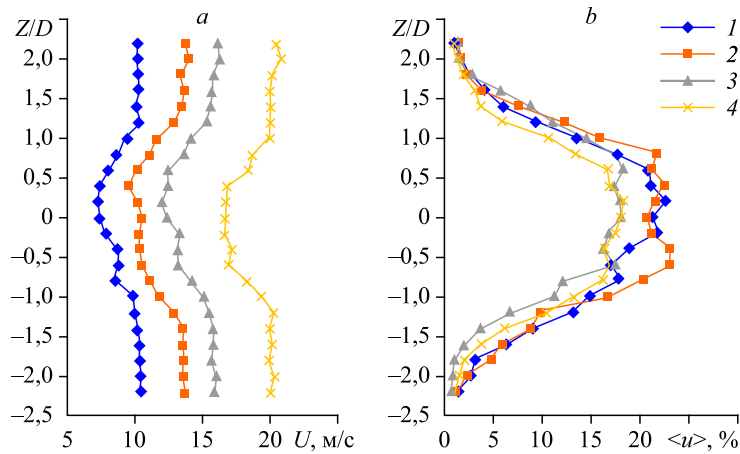


Рис. 7. Профили средней скорости (а) и пульсаций скорости (b) за цилиндром, покрытым образцом C05, при трехмерном обтекании при различных Re_D для $x/D = 5$, $y'/D = 2$.

$$Re_D = 0,97 \cdot 10^5 (1), 1,3 \cdot 10^5 (2), 1,53 \cdot 10^5 (3), 1,95 \cdot 10^5 (4).$$

Представленные на рис. 7 для образца ткани C05 профили средней скорости и пульсаций скорости подобны друг другу для различных чисел Рейнольдса. Это также подтверждает тот факт, что в рассматриваемом диапазоне не происходит смены режима течения.

На рис. 8 представлены профили средних значений скорости и пульсаций скорости для цилиндра, покрытого образцом ткани C22. Исходя из профиля пульсаций скорости для $Re_D = 1,93 \cdot 10^5$, можно сделать вывод, что течение, очевидно, соответствует докритическому режиму. Для трех случаев более высоких чисел Рейнольдса имеет место критическое обтекание цилиндра, а дефект скорости и интенсивность пульсаций скорости в следе показывают небольшой непрерывный рост по мере увеличения Re_D .

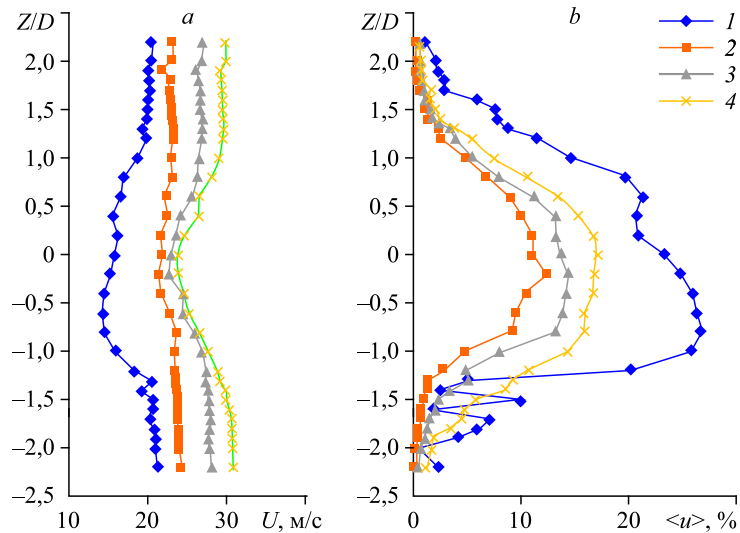


Рис. 8. Профили средней скорости (а) и пульсаций скорости (b) за цилиндром, покрытым образцом C22, при трехмерном обтекании и при различных Re_D для $x/D = 5$, $y'/D = 2$.

$$Re_D = 1,93 \cdot 10^5 (1), 2,26 \cdot 10^5 (2), 2,64 \cdot 10^5 (3), 2,92 \cdot 10^5 (4).$$

На рис. 9 представлены частотные спектры для режимов течения, при которых проводились эксперименты по обтеканию консольного цилиндра при положении датчика термоанемометра $x/D = 5$, $y'/D = 2$, где число Струхала было посчитано по диаметру цилиндра.

Как видно из представленных спектров, подобие течения сохраняется для всех докритических режимов обтекания, соответствующих низким числам Рейнольдса, и число Струхала при этом составляет около 0,18. Для цилиндра с гладкой поверхностью (рис. 9a) спектр, соответствующий числу Рейнольдса $Re_D = 3,81 \cdot 10^5$, демонстрирует отсутствие пика в частотном спектре, что свидетельствует о реализации критического режима обтекания, при котором происходит разрушение вихревой дорожки.

Для цилиндра, покрытого образцом ткани C05, несмотря на приближение числа Рейнольдса к критическому значению, во всех спектрах отчетливо видны пики, соответствующие процессу вихреобразования (см. рис. 9b). При этом наблюдается некоторое увеличение числа Струхала (до 0,19–0,20) с увеличением числа Рейнольдса.

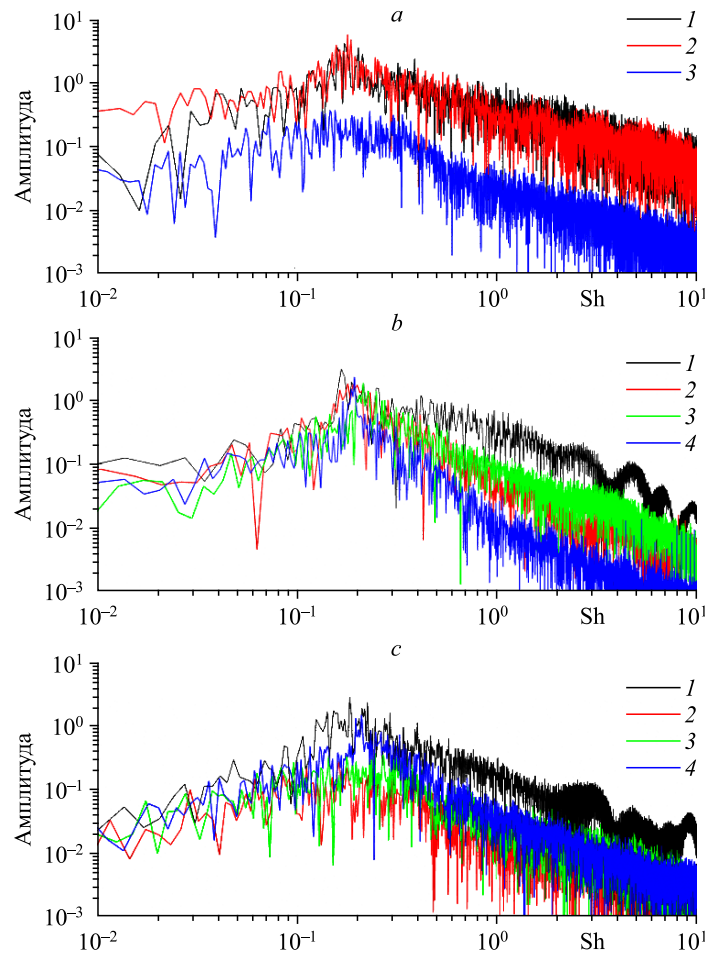


Рис. 9. Амплитудные спектры пульсаций скорости за цилиндром при трехмерном обтекании.

a — гладкий цилиндр: $Re_D = 1,95 \cdot 10^5$ (1), $2,88 \cdot 10^5$ (2), $3,81 \cdot 10^5$ (3);
b — цилиндр с покрытием C05: $Re_D = 0,97 \cdot 10^5$ (1), $1,3 \cdot 10^5$ (2), $1,53 \cdot 10^5$ (3), $1,95 \cdot 10^5$ (4);
c — цилиндр с покрытием C22: $Re_D = 1,93 \cdot 10^5$ (1), $2,26 \cdot 10^5$ (2), $2,64 \cdot 10^5$ (3), $2,92 \cdot 10^5$ (4).

Увеличение скорости набегающего потока для случая цилиндра, покрытого образцом ткани С22, позволило получить режим, соответствующий закритическому обтеканию. Судя по спектрам (см. рис. 9b), для средних значений $Re_D = 2,26$ и $2,64 \cdot 10^5$ вихревая дорожка за цилиндром не формируется, в то время как при превышении критического значения процесс генерации вновь восстанавливается. При этом также наблюдается некоторое увеличение значения числа Струхала — до 0,21.

Заключение

Сравнение двумерного и трехмерного обтекания гладкого кругового цилиндра показало, что для консольного цилиндра область следа становится более узкой к свободному торцу модели, в то время как дефект средней скорости и уровень пульсаций скорости очень близки к соответствующим характеристикам двумерного потока.

Для докритического режима обтекания в случае, когда текстильный материал установлен на конечный цилиндр, значительной разницы в дефекте скорости не наблюдается, а уровень пульсаций скорости примерно на 5 % ниже для ткани с большей шероховатостью С05 по сравнению с тканью С22.

Расчет эквивалентного диаметра по числу Рейнольдса показал, что при физическом увеличении диаметра на 1 %, увеличение эквивалентного диаметра составило более 22 и 9 % для образцов тканей С05 и С22 соответственно.

Спектральный анализ пульсаций скорости в следе за цилиндрами показал полное подобие трехмерных и двумерных течений как для обтекания гладкого цилиндра, так и для цилиндров, покрытых образцами тканей.

Список литературы

1. Баранов П.А., Исаев С.А., Ключева О.Г., Стернин Л.Е. Численное моделирование интенсификации теплообмена в трактах двигательных установок при нанесении на стенки одного продольного ряда сферических или траншейных лунок // Труды РНКТ-4. 2006. Т. 6. С. 162–165.
2. Исаев С.А., Грицкевич М.С., Леонтьев А.И., Мильман О.О., Никущенко Д.В. Ускорение турбулентного потока в узком облуженном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 5. С. 697–702.
3. Михеев Н.И., Давлетшин И.А., Кирилин А.К. Эффект дополнительной интенсификации теплообмена при обтекании дискретно-шероховатой стенки пульсирующим потоком // Сборник научных статей. Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. 2012. Вып. 2. С. 207–213.
4. Дьяченко А.Ю., Жданов В.Л., Смутьский Я.И., Терехов В.И. Экспериментальное исследование теплообмена в отрывной области за обратным уступом при наличии табов // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 4. С. 549–560.
5. Achenbach E. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder // J. Fluid Mechanics. 1971. Vol. 46. Iss. 2. P. 321–335.
6. Ko N.W.M., Leung Y.C., Chen J.J.J. Flow past V-groove circular cylinder // AIAA J. 1987. Vol. 25, No. 6. P. 806–811.
7. Szechenyi E. Supercritical Reynolds number simulation for two-dimensional flow over circular cylinders // J. Fluid Mechanics. 1975. Vol. 70, No. 3. P. 529–542.
8. Lee S.-J., Lim H.-C., Han M., Lee S.S. Flow control of circular cylinder with a V-grooved micro-riblet film // Fluid Dynamics Research. 2005. Vol. 37. P. 246–266.
9. Yamagishi Y., Oki M. Effect of groove shape on flow characteristics around a circular cylinder with grooves // J. Visualization. 2004. Vol. 7, No. 3. P. 209–216.
10. Chowdhury H., Alam F. An experimental investigation on the aerodynamic drag coefficient and surface roughness properties of sport textiles // J. Textile Institute. 2013. Vol. 105, No. 4. P. 414–422.

11. Miao J.J., Tsai J.H., Hsu X.Y., Tsai Z.X., Lai Y.H., Ciou Y.S., Shen P.T., Chuang P.C., Lebiga V., Isaev S., Mironov D., Pak A., Zinovyev V. On critical transition of flow over a circular cylinder roughened by textile materials // AIP Conference Proceedings 2027. 2018. P. 020004-1–020004-10.
12. Hsu X.Y., Miao J.J., Tsai J.H., Tsai Z.X., Lai Y.H., Ciou Y.S., Shen P.T., Chuang P.C., Wu C.M. The aerodynamic roughness of textile materials // J. Textile Institute. 2019. Vol. 110, Iss. 5. P. 771–779.

*Статья поступила в редакцию 5 июля 2021 г.,
после доработки — 27 июля 2021 г.,
принята к публикации 30 июля 2021 г.*