

УДК 533.682

Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции

С.Д. Саленко, А.Д. Обуховский, Ю.А. Гостеев, Ю.В. Телкова

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: Salenkod@yandex.ru

Исследована зависимость картин течения в окрестности двух призматических тел с квадратными поперечными сечениями от расстояния между ними. Получены характерные структуры, возникающие в окрестности двух плохообтекаемых тел, которые подразделены на четыре основных типа. Проведено термоанемометрическое зондирование в аэродинамическом следе позади этих же двух тел, в результате чего представлена зависимость значений чисел Струхала от относительного расстояния между исследуемыми призмами.

Ключевые слова: структура течения, плохообтекаемое тело, интерференция, визуализация, аэродинамическая труба, пульсации скорости.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из проявлений аэродинамической интерференции между двумя плохообтекаемыми телами является изменение структуры течения как в окрестности самих тел, так и в следе, возникающем за ними. При этом изменения могут проявляться в виде отрыва потока, его повторном присоединении, изменение частоты схода вихревых дорожек и т.д., которые зависят от таких факторов, как скорость набегающего потока, относительное расстояние между телами, геометрическая форма самих тел и т.д. [1, 2, 3]. Определение структуры потока в окрестности самых простых тел, являющихся типичными формами строительных конструкций или их составляющих, полезно для понимания течения в окрестности сложных и масштабных сооружений. Наиболее элементарным из плохообтекаемых тел является цилиндр с круглым поперечным сечением. В настоящее время представлено большое количество работ по исследованиям структуры течения в окрестности неподвижного, либо колеблющегося изолированного цилиндра, по изучению взаимного влияния двух одинаковых круговых цилиндров, расположенных непосредственно друг за другом, параллельно друг другу или в шахматном порядке, проявляющееся в зависимости картин обтекания или частоты схода вихревых дорожек от расстояния между цилиндрами.

Анализируя работы по исследованиям двух одинаковых круговых цилиндров, расположенных параллельно друг к другу [1, 2, 4, 5], хотелось бы отметить,

что изменение расстояния между ними приводит к изменению структур обтекания. При этом можно выделить три основных структуры, каждая из которых характеризуется своим числом Струхала. При первом режиме относительное расстояние $T/d < 0,2 \div 0,3$ (T — зазор между цилиндрами в поперечном направлении, d — диаметр цилиндра) и два круговых цилиндра обтекаются как одно тело, при этом позади них генерируется одна вихревая дорожка с единым числом Струхала. В работе [6] особо подчеркивается, что при значении зазора $T/d = 0,1$ струя потока, протекающая в зазоре между цилиндрами, образует в донной части одного из цилиндров отрывной пузырь. При $T/d = 0,2$ поток, проходящий через зазор, срывается с цилиндров без дальнейшего присоединения, тем самым не образуя отрывной зоны. А при промежуточном значении зазора $T/d = 0,13$ наблюдалось внезапное нерегулярное зарождение и разрушение отрывного пузыря, при этом направление отклонения струйки потока в сторону одного или другого цилиндра могло меняться без изменения внешних условий. Компоновка, когда два расположенных рядом круговых цилиндра немного смещены относительно друг друга, т. е. $\alpha < 90^\circ$ и $\alpha > 90^\circ$, где α обозначает угол между направлением набегающего потока и линией, проходящей через центры цилиндров, подробно исследована в совместной работе [7]. В ней авторы отметили, что если α немного меньше 90° , то несимметричная струя, протекающая между цилиндрами, постоянно отклонялась в сторону одного цилиндра, если α немного больше 90° — в сторону другого, а если α равнялся 90° струя, протекающая между цилиндрами, периодически отклонялась в разные стороны.

При изменении параметра T/d в диапазоне от $0,2 \div 0,3$ до $1,2 \div 1,5$ возникает второй режим течения, со смещением струи потока, протекающей между цилиндрами, в сторону одного из них. В этом случае за цилиндрами образуются так называемые широкий и узкий следы, характеризующиеся при сравнении с первым режимом меньшими и большими числами Струхала соответственно. Причем в работе [7] отмечено, что, когда величина $T/d = 0,3 \div 0,6$, изменение числа Рейнольдса при постоянном значении зазора приводит к тому, что возникающая за цилиндрами одна вихревая дорожка сменяется на две.

Из результатов, опубликованных в работах [2, 5, 6], видно, что третий режим возникает при $T/d > 1,2 \div 1,5$ и характеризуется наличием в следе за цилиндрами двух вихревых дорожек Кармана с одинаковыми числами Струхала, совпадающими с соответствующим значением для одиночного круглого цилиндра.

Для цилиндрических тел с квадратными поперечными сечениями представлено не так много работ, как для круговых цилиндров, но при этом можно также отметить, что при увеличении зазора между двумя одинаковыми цилиндрами с квадратными поперечными сечениями происходит изменение картины течения в их окрестности. С увеличением же относительного расстояния между цилиндрами проявляется несимметричность протекающего между ними потока, то есть струя сильнее отклоняется в сторону одного из цилиндров и позади них образуется один вихревой след. При $T/b > 1$ (T — зазор между цилиндрами в поперечном направлении, b — ширина сечения цилиндра) за каждым телом возникает уже своя вихревая дорожка [3]. Четкой систематизации структур течения в окрестности двух цилиндрических тел с квадратными поперечными сечениями в зависимости от относительного расстояния между ними в рассмотренных работах не представлено, поэтому для решения этого вопроса требуются дополнительные исследования.

В настоящей работе исследована зависимость структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения, расположенных рядом друг с другом, от относительного поперечного расстояния между ними.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования проводились в лаборатории промышленной аэродинамики НГТУ на дозвуковой аэродинамической трубе Т-503 замкнутого типа с открытой рабочей частью. Длина рабочей части составила 2 м, диаметр — 1,2 м. Рабочий диапазон скоростей аэродинамической трубы — 0–60 м/с.

Модели призм, изготовленные из дерева и оклеенные черной матовой пленкой ПВХ, имели квадратное поперечное сечение размерами 45×45 мм и высоту $L = 1200$ мм. В ходе экспериментов модели располагались в рабочей части аэродинамической трубы вертикально, перпендикулярно набегающему потоку, при этом нижними концами упирались в горизонтальный экран, имитирующий земную поверхность. Размеры экрана в плане составляли 2500×1000 мм, толщина — 25 мм. Передняя кромка имела удобообтекаемую форму, а задняя — клиновидную, обеспечивающую безотрывный сход потока с поверхности экрана. Верхние концы балок выходили за границы потока в рабочей части и жестко крепились (рис. 1). В ходе экспериментов изменялся зазор между балками в поперечном направлении в диапазоне $S = 0 \div 10H$, где S – расстояние между балками, H — ширина балки.

В процессе работы в окрестности двух балок проводилась визуализация течения, и измерялись пульсации скорости потока. Визуализация течения осуществлялась с помощью метода “дымящей проволоки”, который является разновидностью дымового метода. Нихромовая проволока диаметром 0,6 мм натягивалась в подпружиненной рамке для компенсации ее удлинения при нагреве и равномерно покрывалась мелкими каплями глицерина, которые, испаряясь в результате электрического нагрева проволоки, образовывали дымовые поверхности или дискретные линии дымовых струй. Для достижения необходимой контрастности и четкости видеоматериала плоскость визуализации подсвечивалась параллельно потоку “световым ножом”, а экран затемнялся. Вследствие того, что визуализация при высоких скоростях затруднена размыванием дымовых струй, исследования проводились при малых (~1 м/с) скоростях потока. Устанавливая рамку с дымящей проволокой горизонтально и параллельно моделям на высоте $B = 8H$ над экраном, с помощью цифровой видеокамеры Sony HDR-SR10E были получены кинограммы пространственного обтекания моделей.

Термоанемометрическое зондирование потока является полезным инструментом для исследования более полной картины нестационарного течения и выявления в общих чертах его наиболее существенных особенностей. Пульсации ско-

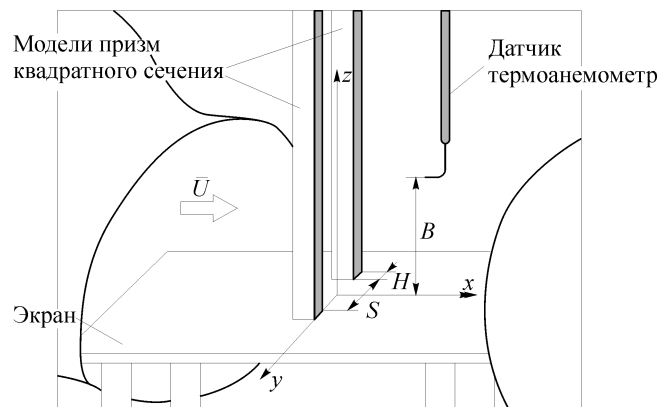


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

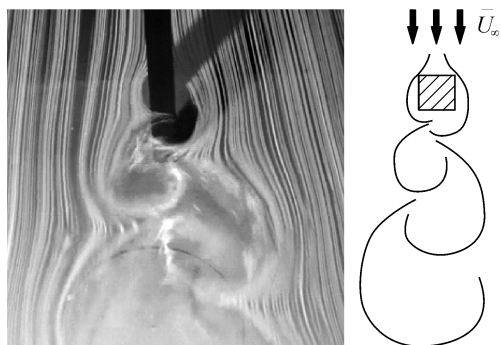


Рис. 2. Фотография и схема картины обтекания одиночной квадратной призмы.

рости измерялись с помощью двухниточного термоанемометра постоянного сопротивления, датчик которого устанавливался на высоте $8H$ над экраном. С помощью координатника датчик мог перемещаться параллельно осям OX и OY . Все регистрируемые электрические сигналы с датчика преобразовывались в цифровую форму и обрабатывались.

налы с датчика преобразовывались в цифровую форму и обрабатывались.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

2.1. Визуализация структуры течения

В процессе визуализации подтвержден уже известный факт, что за одиночной квадратной призмой образуется устойчивая вихревая дорожка Кармана (рис. 2).

В случае совместного обтекания двух балок квадратного сечения, расположенных рядом друг с другом параллельно набегающему потоку, картины течения изменяются при увеличении зазора между телами. При этом все полученные структуры потока можно разделить на четыре типа.

Тип 1. Такой тип структуры наблюдался в случае установки балок вплотную друг к другу, т. е. величина зазора составляла $S/H = 0$, и две балки квадратного сечения обтекаются как одно тело. При сравнении с обтеканием одиночной квадратной балки, вихревая дорожка здесь формируется на достаточно большем удалении от задних граней моделей (рис. 3).

Тип 2. Структуры второго типа обтекания возникают при малых расстояниях между балками ($S/H = 0,11 \div 0,56$). Особенности обтекания таких компоновок заключаются в том, что в зазоре между моделями происходит протекание струйки, которая вихря не образует, но может отклоняться либо в сторону одной балки, либо в сторону другой, независимо от внешних условий (рис. 4). С внешних граней балок срываются спутные струи, которые формируют вихревые структуры. Эти вихри имеют нечеткий вид, и, по крайней мере, в пределах рабочей части аэродинамической трубы вихревые дорожки Кармана не формируются.

Тип 3. Разновидность структур третьего типа возникала, когда зазор между балками составлял $S/H = 0,7 \div 1,9$. При таких расстояниях все картины течения объединяет одна общая особенность. Сход вихрей, образующих дорожку Кармана, происходит только с одной из двух балок, причем с увеличением значения зазора

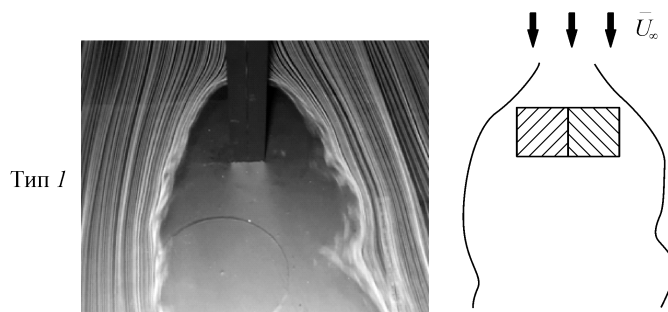


Рис. 3. Фотография и схема картины обтекания первого типа ($S/H = 0$).

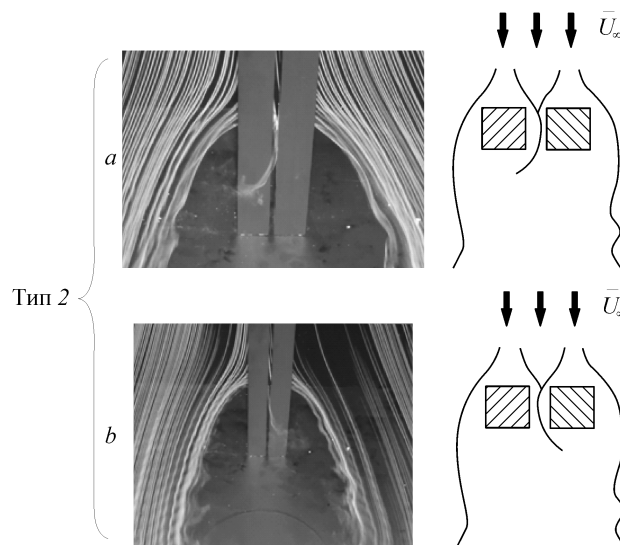


Рис. 4. Фотографии и схемы картины обтекания второго типа ($S/H = 0,11 \div 0,56$).

вихревая дорожка становится более выраженной и четкой. Со второй, расположенной рядом призмы, также наблюдается срыв потока с боковых граней, но вихревая дорожка за ней при этом не формируется (рис. 5). В структурах течения данного типа, так же как и в структурах второго типа, присутствует явление многовариантности: при одних и тех же внешних условиях реализуются две вариации течения, т. е. если с правой балки сходит вихревая дорожка, то с левой — турбулентная спутная струя, а если дорожка сходит с левой балки, то за правой она не образуется (см. рис. 5).

Тип 4. Представленные картины течения наблюдались, когда расстояние между двумя квадратными призмами превышало значение $2H$, и характеризовались наличием позади каждой призмы своей вихревой дорожки. Было замечено, что при каждом исследованном зазоре возникали две разновидности схода вихрей: симметричная и антисимметричная (рис. 6). При симметричном сходе вихрей наблюдался

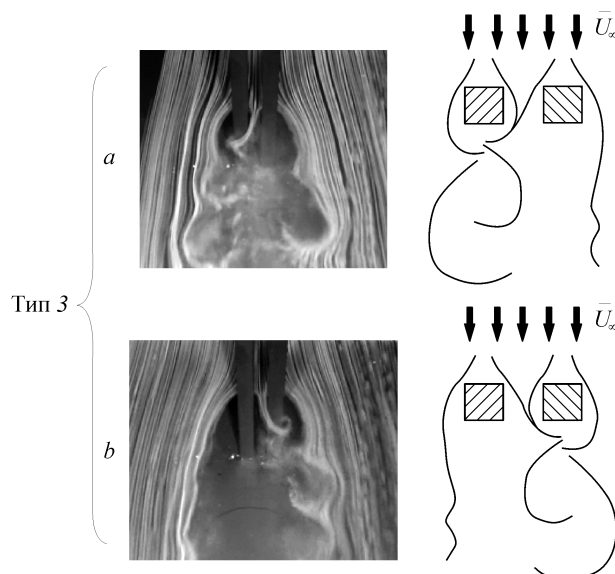


Рис. 5. Фотографии и схемы картины обтекания третьего типа ($S/H = 0,7 \div 1,9$).

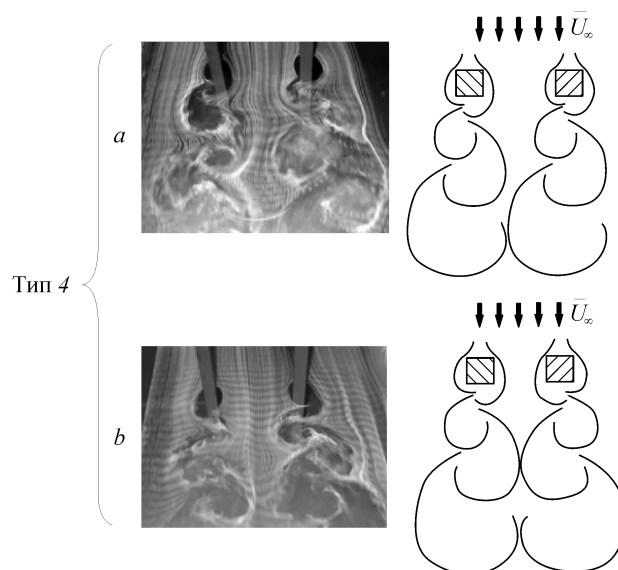


Рис. 6. Фотографии и схемы картины обтекания четвертого типа ($S/H = 2 \div 10$).

синхронный срыв потока с противоположных граней балок, т. е. картина течения становилась симметричной относительно оси OX . При антисимметричном — синхронный сход осуществлялся с одноименных граней обеих балок, и, таким образом, за ними возникали одинаковые по виду вихревые дорожки. Хотелось бы отметить, что симметричная картина реализовывалась чаще, чем антисимметричная, и даже если возникал антисимметричный сход вихрей, то через некоторое время он менялся на противоположный.

Подобные результаты для двух круговых цилиндров, расположенных рядом друг с другом, были опубликованы в работе [5], где отмечено, что при зазоре между цилиндрами $T/d > 2$ образуется режим, характеризующийся наличием позади тел двух вихревых дорожек Кармана, сходящихся с одинаковыми частотами как в противофазе, так и в фазе. Причем срыв, возникающий в противофазе, является преобладающим и сохраняется на протяжении 30 диаметров цилиндра вниз по потоку.

На основе полученных структур течения можно сказать, что взаимное влияние вихревых дорожек, сходящихся с двух призм, а именно, их пересечение или соприкосновение, наблюдалось при зазоре $S/H = 2 \div 7$. Когда расстояние между балками превышало значение $7H$, взаимного влияния вихревых дорожек друг на друга не наблюдалось.

2.2. Термоанемометрические исследования

Замеры пульсаций скорости с помощью термоанемометра проводились при числах Рейнольдса $Re = 0,4 \times 10^5$. Данные измерения позволили определить характерные числа Струхала при различных расстояниях между моделями в поперечном направлении.

Для одиночной призмы с квадратным поперечным сечением измерения пульсаций скорости проводились вдоль потока на трех удалениях от ее задней грани — $3H$, $5H$ и $10H$. Результаты исследований показали, что в каждом сечении непосредственно в тени за балкой ($z \approx -0,9H \dots 0,9H$) спектры пульсаций были размыты, что не позволяло выделить одной доминирующей частоты схода вихрей (рис. 7, *b*). Однако, когда датчик термоанемометра в каждом сечении удалялся от оси симметрии более, чем на $1H$, в полученных спектрах наблюдался четкий пик частоты,

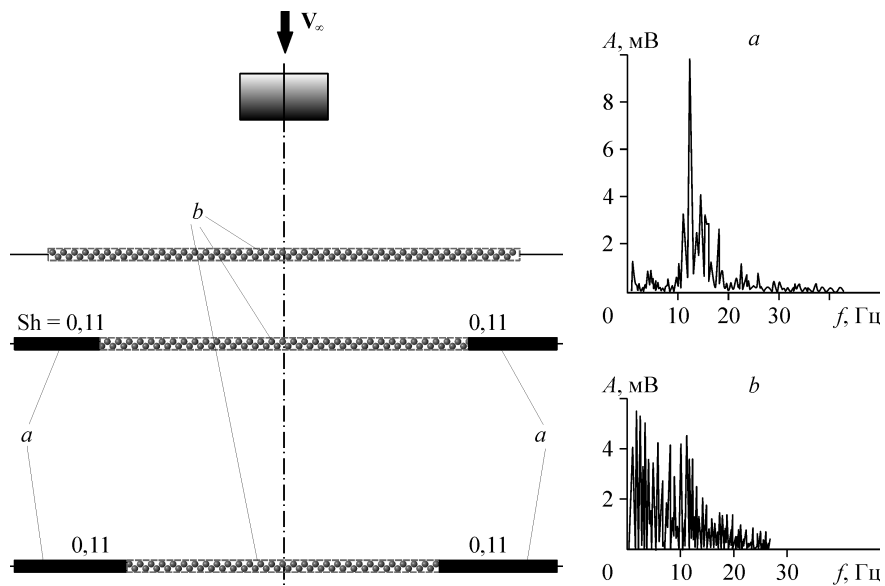


Рис. 7. Спектры пульсаций скорости в следе за одиночной призмой.

соответствующей числу Струхала $Sh = 0,13$ (см. рис. 7, *a*). Эти результаты хорошо согласуются с литературными данными, приведенными для балок квадратного поперечного сечения, и подтверждают, что за исследуемой балкой действительно образуется вихревая дорожка Кармана.

Для балок, установленных вплотную друг к другу ($S/H = 0$), термоанемометрические измерения проводились также в трех сечениях ($x = 3H, 5H, 10H$). Полученные спектры частот пульсаций во всех экспериментальных точках вдоль сечения $x = 3H$ и в точках, удаленных от оси симметрии OX не более чем на $4H$, при прохождении датчика термоанемометра по сечениям $x = 5H$ и $10H$ имели размытый характер (не имели доминирующей частоты). Когда же датчик в сечениях $x = 5H, 10H$ отодвигался от оси OX на расстояние $z > 4H$, в спектрах выделялись четкие пики частот, соответствующие числу Струхала $Sh = 0,11$ (рис. 8). В этом случае за характерный размер при расчете числа Струхала принималась удвоенная

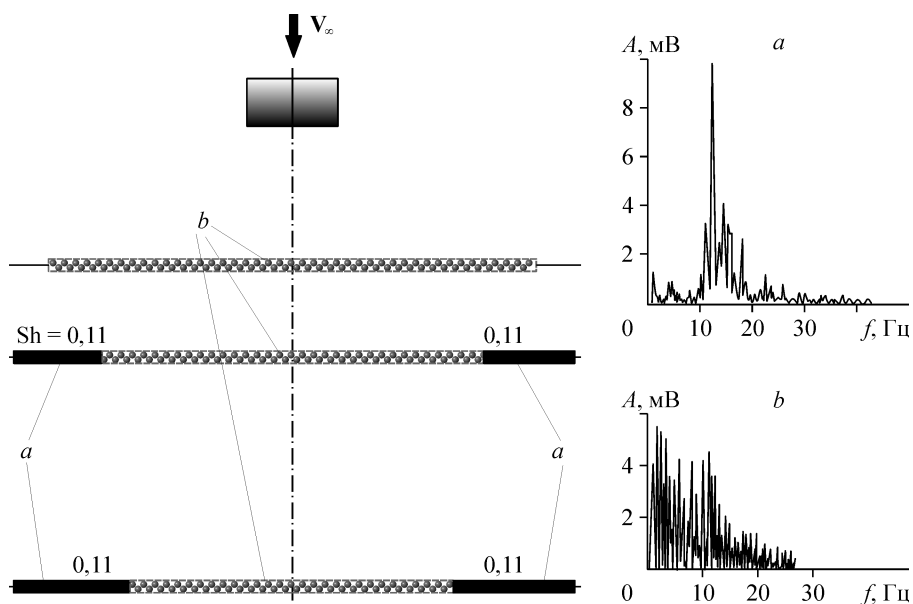


Рис. 8. Спектры пульсаций скорости в следе за двумя призмами ($S/H = 0$).

ширина балки, при этом полученные результаты совпали с теоретическими, приведенными именно для тел с прямоугольным поперечным сечением [9]. Проводя аналогию данных результатов с визуализационными, полученными для подобного расположения балок, можно утверждать, что они согласуются друг с другом, и за двумя балками, установленными вплотную, в действительности вихревая дорожка формируется при достаточно большом удалении от них ($x > 5H$).

В случае, когда значения зазоров между балками лежали в диапазоне $S/H = 0 \div 0,22$, спектральные картины, полученные на всех трех удалениях датчика от исследуемых тел, совпадали с аналогичными результатами, полученными при исследовании балок, расположенных вплотную. Числа Струхала, соответствующие доминирующим частотам, принимали значение 0,11. При этом в качестве характерного размера для их расчета использовалось расстояние между внешними боковыми гранями двух балок (т. е. ширина следа в точках отрыва потока). Хотелось бы отметить, что в спектрах пульсаций четкие пики частот возникали только тогда, когда датчик термоанемометра проходил боковые области $z < -4H$, $z > 4H$, и протекание струйки между балками, которое наблюдалось при визуализации, термоанемометром не было зафиксировано. Следовательно, непосредственно за балками образуется широкий турбулентный след, а вихревая дорожка формируется существенно ниже по потоку ($x > 5H$, $z > 4H$, $z < -4H$). Поэтому можно сказать, что две балки, расположенные достаточно близко друг к другу, обтекаются как единое тело, обладающее прямоугольным поперечным сечением, и в этом случае число Струхала рассчитывалось не по ширине балки, а по ширине следа в точках отрыва потока.

Для балок, имеющих между собой зазор $S/H = 0,5 \div 1,5$, термоанемометрические измерения проводились в трех сечениях ($x = 3H$, $5H$ и $8H$). В этом случае уже нельзя утверждать, что модели обтекаются как одно тело. Это связано с тем, что в спектрах, полученных в областях предполагаемого схода вихрей, доминируют две частоты, которым соответствуют числа Струхала $Sh = 0,06$ и $Sh \approx 0,18$ (рис. 9).

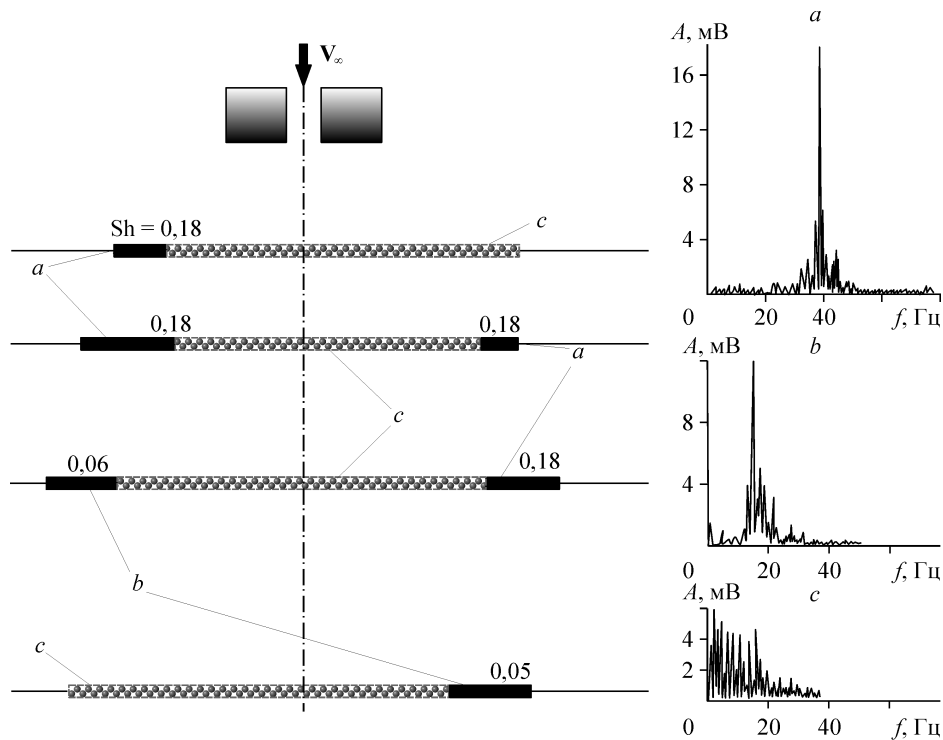


Рис. 9. Спектры пульсаций скорости в следе за двумя призмами ($S/H = 0,5$).

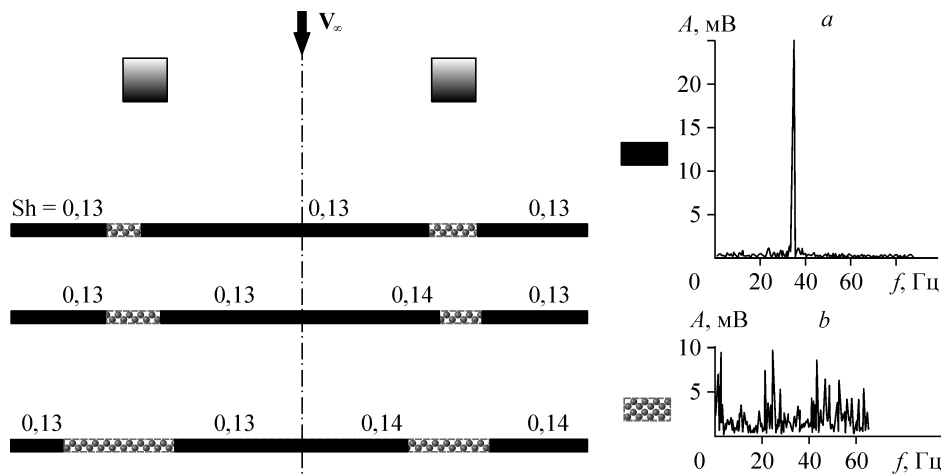


Рис. 10. Спектры пульсаций скорости в следе за двумя призмами ($S/H = 6$).

Причем эти числа рассчитаны по формуле, в которой за характерный поперечный размер принималась ширина балки. К тому же от сечения к сечению области доминирующих частот изменяют свою ширину по координате z . Размытые спектры частот пульсаций возникали во всех пройденных сечениях в окрестности оси симметрии OX ($-3H < z < 3H$), и диапазон их существования сокращался с увеличением зазора между балками. Поэтому можно сделать вывод о том, что при данной компоновке неоднозначность результатов, полученных в ходе термоанемометрии, говорит о спонтанной смене картин обтекания, что подтверждается данными визуализации.

При измерениях пульсаций скорости в следе за балками, удаленными друг от друга более чем на $2H$, получено, что непосредственно за каждой моделью, а именно в окрестности осей симметрии каждой балки, спектры частот размыты, и ширина отрезка, на котором сохранялся такой характер спектра, увеличивалась по мере удаления от балок вдоль потока ($x = 3H, 5H, 8H$). Пики доминирующих частот наблюдались в спектрах, полученных в местах предполагаемого схода вихревых структур, а именно при перемещении датчика термоанемометра влево или вправо от боковых граней балок. Хотелось бы отметить, что при $S/H = 2 \div 9$ в каждом сечении окрестности оси OX в спектрах еще можно было выделить четкие пики (рис. 10), а при $S/H = 10$ спектры частот уже были размыты (рис. 11). Поэтому

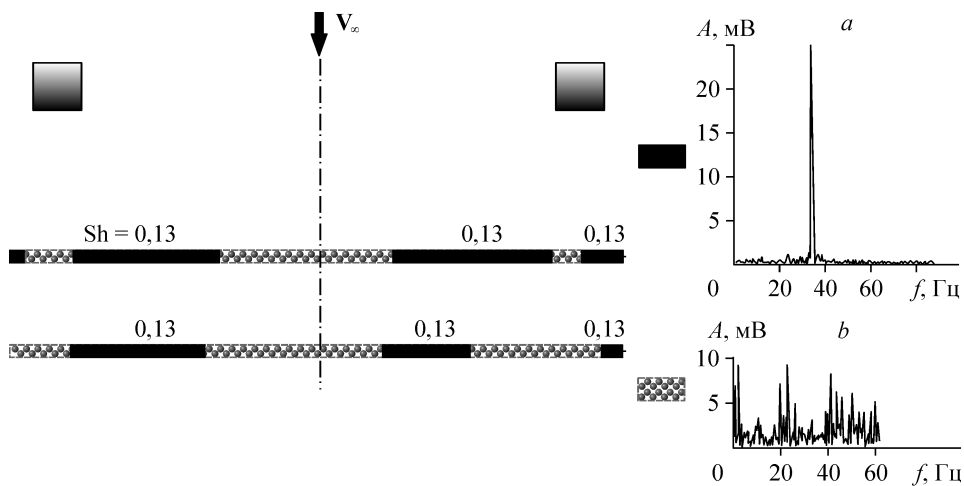


Рис. 11. Спектры пульсаций скорости в следе за двумя призмами ($S/H = 10$).

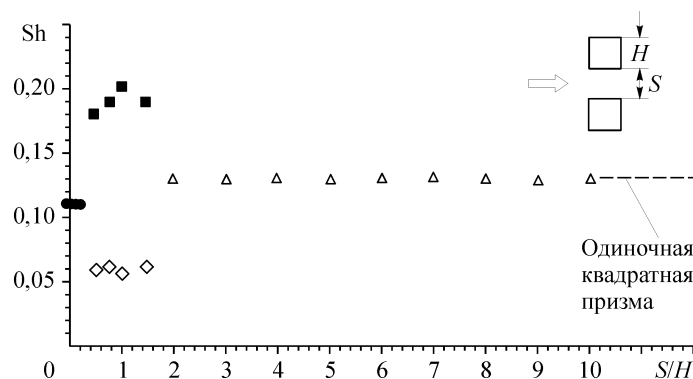


Рис. 12. Зависимость числа Струхала от относительного расстояния между балками.

можно сказать, что при зазоре между балками $S/H > 9$ возникает независимый сход вихрей с каждой балки, и вихревые дорожки практически не влияют друг на друга.

На рис. 12 представлен график зависимости числа Струхала от безразмерного зазора между балками. На графике видно, что диапазон $S/H = f(Sh)$ можно разделить на три области в зависимости от величины числа Струхала. Одна область характеризуется тем, что если балки расположены близко друг к другу, то в диапазоне значений $S/H = 0 \div 0,22$ числа Струхала постоянны и равны $Sh \approx 0,11$. При дальнейшем увеличении параметра S/H до значения 1,5 возникает неоднозначность обтекания балок (при одинаковых внешних условиях картины течения меняются), которая проявляется в существовании двух чисел Струхала $Sh = 0,06$ и $0,18$, что отражает следующая область. Для последней области характерно одно число Струхала $Sh = 0,13$, так как при зазоре $S/H = 2 \div 10$ с каждой балки сходят отдельные вихревые дорожки Кармана, имеющие одинаковые частоты, совпадающие с частотой схода вихрей с одиночной балки квадратного сечения.

Аналогичные результаты были описаны в работе [5] для двух цилиндров с квадратными поперечными сечениями. Хотелось бы отметить, что полученные нами результаты не во всей области относительных расстояний хорошо согласуются с результатами, представленными в работе [5]. Так, в этой статье отмечено, что в диапазоне значений $S/H = 0,3 \div 1,8$ каждому относительному расстоянию между балками S/H соответствует три числа Струхала, причем все эти числа монотонно приближаются к значению числа Струхала для одиночной призмы с квадратным поперечным сечением. Однако при значении зазора $S/H > 2$ полученные нами данные хорошо согласуются с результатами, представленными в работе [5], которые показывают, что при таких значениях зазоров числа Струхала совпадают с соответствующими значениями для одиночной квадратной призмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследованы особенности структуры течения и пульсационные характеристики в следе при обтекании однородным потоком пары расположенных параллельно друг другу квадратных призм при изменении расстояний между ними от 0 до 10 высот сечения H .

Полученные при визуализации обтекания ряда компоновок результаты показали наличие различных картин течения, которые в зависимости от структуры поделены на несколько типов. В отличие от зарубежных работ [3, 5], в которых отражена зависимость картин обтекания в окрестности двух призм от величины зазора между ними, но при этом четкой классификации структур не представлено,

в настоящей работе приведена классификация картин обтекания расположенных параллельно друг другу неподвижных квадратных призм и отмечено, что четыре структуры течения сменяют друг друга при увеличении относительного расстояния S/H .

Близкорасположенные балки обтекаются как единое целое, в группе промежуточных компоновок реализуются более сложные картины течения, характеризующиеся многовариантностью, а начиная с величины зазора $S/H > 7$ балки обтекаются как изолированные.

Результаты термоанемометрического зондирования в целом согласуются с визуализацией течения. Так, в спектрах за одиночной балкой квадратного сечения наблюдается доминирующий пик на частоте схода вихрей и соответствующее ему число Струхала $Sh = 0,13$. За двумя близкорасположенными балками число Струхала меняется на $Sh = 0,11$ и совпадает с соответствующим значением для балки с прямоугольным поперечным сечением подобного размера. Для группы компоновок с расстоянием между балками $0,5 \dots 1,5H$ отмечено существование двух доминирующих частот пульсаций, связанное с многовариантностью их обтекания. В спектрах за двумя достаточно удаленными друг от друга балками четкий пик наблюдается на той же частоте, что и в случае схода вихрей с одиночной балки квадратного поперечного сечения.

Представленные в работе результаты открывают новые особенности обтекания пары расположенных параллельно друг другу неподвижных квадратных призм. Также они могут применяться для верификации численных результатов и использоваться для оценки взаимного влияния друг на друга сооружений с подобными геометрическими размерами, находящихся в аналогичных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Здравкович М.М.** Обзор исследований интерференции между двумя круглыми цилиндрами при различном их взаимном расположении // Теоретические основы инженерных расчетов. 1983. Т. 105, № 2. С. 91–95.
2. **Blevins R.D.** Flow-induced vibration. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 451 p.
3. **Kumar R.A., Gowda B.H.L.** Flow-induced vibration of a square cylinder without and with interference // J. of Fluids and Structures. 2006. Vol. 22. P. 345–369.
4. **Zhou Y., Wang Z.J., Xu S.J., Jin W.** Free vibrations of two side-by-side cylinders in a cross flow // J. of Fluid Mechanics. 2001. Vol. 443. P. 197–229.
5. **Alam M.M., Moriya M., Sakamoto H.** Aerodynamic characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon // J. of Fluids and Structures. 2003. Vol. 18. P. 325–346.
6. **Alam M.M., Zhou Y.** Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders // J. of Fluids and Structures. 2007. Vol. 23. P. 799–805.
7. **Alam M.M., Sakamoto H., Zhou Y.** Determination of flow configurations and fluid forces acting on two staggered circular cylinders of equal diameter in cross-flow // J. of Fluids and Structures. 2005. Vol. 21. P. 363–394.
8. **Xu S.J., Zhou Y.** Reynolds number effects on the flow structure behind two side-by-side cylinders // Physics of Fluids. 2003. Vol. 15. P. 1214–1219.
9. **Девнин С.И.** Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. Л.: Судостроение, 1983. 331 с.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2009 г.