

ВИХРЕВОЕ И СТРУЙНОЕ СОПРЯЖЕННОЕ ОБТЕКАНИЕ ГРУППЫ ЦИЛИНДРОВ НА ПЛАСТИНЕ

А. А. ВОСКОБОЙНИК, А. В. ВОСКОБОЙНИК, В. А. ВОСКОБОЙНИК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина

The experimental research results on the study of kinematics and dynamics of the horseshoe vortex systems, which are conditioned by interaction of stream with the three-row cylinders, established on a flat surface, are represented. Visual measurements of the vortex flow structure are carried out in the junction region by means of dye-stuffs and washed off contrast coatings. The convective velocity measurements of vortical structures near to cylindrical models was made by the thermistor sensors which are taking place in the correlation block that has allowed to determine not only velocity, but also a movement direction of the large-scale coherent vortices in the junction flows. The horseshoe vortex system before the central cylinder is turned with frequency near 1 Hz, which is corresponded by the Strouhal number $St=0.27$, and its oscillated in a horizontal and vertical plane with frequency 0.5 Hz or $St=0.14$.

ВВЕДЕНИЕ

Сопряженное обтекание тел различной формы и размеров имеет широкое применение в технике и технологиях, где используется движение тел в жидкой или газообразной среде либо при их обтекании потоками несжимаемой или сжимаемой жидкости. В местах сопряжения, при определенных условиях, формируются вихревые системы и струйные течения, которые существенно увеличивают акустическую и псевдозвуковую составляющие гидродинамического шума. Генерация крупномасштабных вихревых систем приводит к появлению дискретных подъемов большой интенсивности в спектрах пульсаций скорости и давления, что значительно уменьшает динамический диапазон гидроакустических комплексов и понижает их эффективность.

Следствием неблагоприятного градиента давления, обусловленного наличием цилиндра сопрягающегося с обтекаемой поверхностью, является отрыв набегающего пограничного слоя и формирование отрывной линии на поверхности вокруг сопряженного плохообтекаемого тела. Эти продольные неблагоприятные градиенты давления являются также основными причинами формирования подковообразных вихрей вокруг фронтальной части основания цилиндра [1, 2]. Первичная подковообразная вихревая структура имеет то же направления вращения, что и завихренность в набегающем пограничном слое. Подковообразный вихрь вытягивается вокруг цилиндра и изгибается вокруг его передней части вблизи сопряженной плоскости, его боковые вихревые линии становятся ориентированными в продольном направлении и имеют завихренность, противоположно направленную по обеим боковым сторонам обтекаемого цилиндра. Подковообразные вихри переносят более высокоскоростную жидкость вдоль фронтальной части цилиндра по направлению к сопрягаемой поверхности, формируя ниспадающее течение. Как результат взаимодействия между ниспадающим течением, обтекаемой поверхностью и подковообразным вихрем сопротивление вокруг фронтальной части цилиндра увеличивается. В случае набегающего турбулентного течения местоположение, масштаб и интенсивность подковообразных вихрей сильно изменяется во времени. Они генерируют высокую турбулентность и пульсации давления и образуют значительные касательные напряжения на обтекаемых поверхностях [1-3].

Целью данной экспериментальной работы является определение механизмов генерации и развития вихревых структур, формируемых при сопряженном обтекании



Рис. 1

группы трех рядов цилиндров на плоской поверхности и их влияние на поле скоростей, давлений и касательных напряжений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились в гидродинамическом лотке гидравлической лаборатории Института гидромеханики НАН Украины. Лоток имеет длину около 14 м сечением 0.8 м на 1 м. Измерительный участок находился на расстоянии 6 м от входа лотка. Стенки гидродинамического лотка были изготовлены с прозрачного толстого стекла, что дало возможность проводить визуальные исследования. Вода в лоток подавалась с помощью насосов через успокоительную камеру, диффузор, хонейкомб и спрямляющие и турбулизирующие решетки. Сброс воды с гидродинамического лотка осуществлялся через щиты и заслонки, регулирующие уровень, а также конфузор и устройства, направляющие поток и поглощающие его шум. Таким образом, оборудование гидродинамического лотка позволяет в широких диапазонах регулировать скорость потока, его уровень и степень турбулентности. Наличие координатных устройств, поддерживающих хорошо обтекаемые элементы и ножи, позволяют достаточно точно, в соответствии с расчетными значениями, устанавливать исследованные модели, а также измерительные устройства, инструменты и датчики.

Группа трехрядных цилиндров устанавливалась на специально изготовленной плоской пластине с заменяемыми тонкими листами, на которых была сделана координатная сетка. При проведении визуальных исследований на тонкие листы наносился контрастный слой покрытия, который смывался набегающим на исследуемую конструкцию потоком. Плоская пластина имела ширину 0.6 м и длину 2 м. Цилиндрическая групповая модель размещалась на расстоянии 1 м от начала пластины, в ее срединном сечении. Плоская пластина с исследуемой моделью устанавливалась вдоль оси и вблизи дна гидродинамического лотка на высоте приблизительно $70 \cdot 10^{-3}$ м (для уменьшения влияния пограничного слоя над дном и краевых эффектов от стенок гидродинамического лотка). Уровень воды над пластиной с моделью был приблизительно 0.2 м и скорость потока регулировалась от 0.06 м/с до 0.25 м/с. Измерения проводились для модели трех рядов цилиндров, установленных в шахматном порядке, шириной 0.103 м и длиной 0.597 м, состоящей из 31 цилиндра диаметром 0.027 м, при этом число Рейнольдса: $Re_x = x U_\infty / \nu = (4.4 \dots 18.6) \cdot 10^5$ и число Фруда $Fr = U_\infty / \sqrt{gH} = (0.04 \dots 0.18)$, где x - расстояние от носка пластины до первого центрального цилиндра, U_∞ - скорость

течения в лотке, ν - кинематическая вязкость воды, g - ускорение свободного падения и H - глубина воды в лотке. Уровень турбулентности потока в гидродинамическом лотке не превышал нескольких процентов.

Прежде чем провести инструментальные измерения делалась визуализация потока с помощью водорастворимых красок и контрастных пленок сгущенного молока на поверхности пластины. Наблюдение за движением красителей и размывом пленки, а также обработка и анализ картин видео и фотоматериала дали возможность зарегистрировать зоны наибольших размывов контрастного слоя возле цилиндров, масштабы, скорости переноса и вращения вихревых структур в этих зонах. В дальнейшем в наиболее характерных областях вихревого движения в виде подковообразных вихрей проводились инструментальные исследования с использованием термисторных датчиков скорости и пьезорезистивных датчиков скоростного напора по специально разработанной программе и методикам.

Погрешность при измерениях осредненных показаний скорости не превышала 4% (с надежностью 0.95 или 2σ), для пульсационных значений – погрешность была менее 6%. Корреляционные зависимости получены с погрешностью до 8% с надежностью 0.95. Количественные параметры поля скоростей, пространственно временных характеристик вихревых структур и зон размыва контрастных слоев на поверхности плоской пластины при визуализации были получены с погрешностью, не превышающей 10%. Инструментальные данные и результаты, которые получены при визуализации, в целом совпадали между собой с достаточной точностью.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Во время визуальных исследований проводились оценка пространственных и временных характеристик вихревого движения вблизи исследуемых объектов и степень их взаимодействия с обтекаемой поверхностью. Визуализация осуществлялась с помощью водорастворимых красителей и чернил, вводимых в исследуемую область потока через миниатюрные трубки, а также нанесением контрастных покрытий, которые смывались потоком жидкости, на обтекаемой поверхности. Результаты визуальных исследований сопряженного течения вокруг трехрядной цилиндрической модели показали, что перед цилиндрами формируются подковообразные вихревые системы, которые несколько отличаются от подобных вихрей, которые существуют при классическом обтекании одиночных цилиндров или их групп в виде продольной шеренги [1, 3]. При трехрядном расположении цилиндров на плоской поверхности интенсивные подковообразные вихревые системы формируются перед каждым из обтекаемых цилиндров. И их интенсивность убывает по мере приближения к середине трехрядной конструкции и возрастает вблизи кормовой группы сопряженных цилиндров. Перед трехрядной группой цилиндров зарождается глобальная крупномасштабная подковообразная вихревая система, которая имеет невысокую интенсивность. Эта система охватывает трехрядную группу, как одну целую конструкцию. Так для скорости потока 0.1 м/с и глубины русла 0.2 м, где исследовалось сопряженное обтекание трехрядной модели, зона отрыва пограничного слоя и место формирования этой глобальной крупномасштабной подковообразной системы находится на расстоянии около 2 диаметров цилиндра (рис. 1а) от первого осевого цилиндра. Эта подковообразная вихревая структура огибает переднюю часть трехрядной цилиндрической конструкции на расстоянии $2d$ или 0.5 ширины самой модели, а затем расширяется под углом приблизительно 5° при перемещении вниз по потоку.

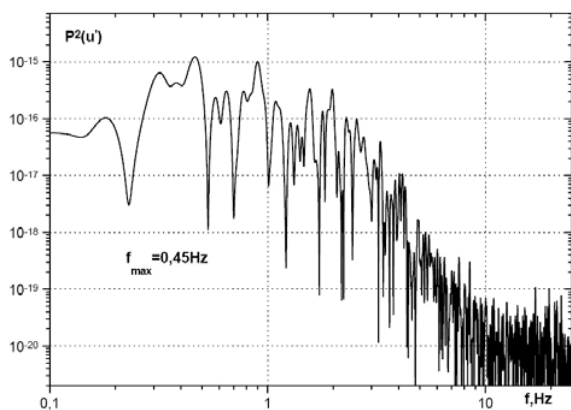


Рис. 2

гидродинамического давления и сопротивления в его корме. Взаимодействие подковообразного вихря, обтекающего первый центральный цилиндр с подковообразными вихрями, которые зарождаются при обтекании первых по потоку боковых цилиндров, приводит к появлению интенсивного течения между первыми и вторыми боковыми цилиндрами. Подобное, но менее интенсивное, сопряженное течение возникает между предпоследним и последним боковыми цилиндрами в конструкции трехрядного цилиндрического ростверка.

Позади обтекаемых цилиндров формируются следные вертикальные вихревые системы, которые, при соответствующих условиях, создают симметричную дорожку вихрей Кармана. За боковыми цилиндрами, особенно там, где появляются боковые течения, симметричность противоположно вращающихся вертикальных вихрей существенно нарушается. Например, для скорости потока 0.075 м/с одна из цепочек следных вихрей зарождается на расстоянии близком $(0.2 \dots 0.4)d$ вдоль внешней боковой границы трехрядной конструкции. Вторая цепочка вертикальных вихрей, которые вращаются в противоположном направлении относительно первых, зарождается в осевом сечении боковых цилиндров на расстоянии приблизительно $(0.4 \dots 0.6)d$ позади первого бокового цилиндра. Формирование противоположно вращающихся вертикальных вихрей в целом наблюдается периодически то с одной, то с другой стороны цилиндра, но иногда происходит одновременное зарождение пары вихрей, что проиллюстрировано на рис. 1б. Частота появления вертикальных следных вихрей составляет приблизительно 0.5 Гц, что отвечает числу Струхала $St = fd/U_\infty \approx 0.18$.

Формирование и развитие подковообразных вихрей, вертикальных следных вихрей позади обтекаемых тел, а также существование интенсивных пристеночных течений, наблюдаемые между группой трех рядов цилиндров, приводят к появлению значительных сдвиговых напряжений на обтекаемой поверхности вблизи сопряжения цилиндров с плоской поверхностью. Применение смываемых контрастных покрытий позволяет сделать оценку значений сдвиговых напряжений, которые наблюдаются на обтекаемой поверхности. Разрыв покрытия в первую очередь происходит сначала перед первым боковым цилиндром (азимутный угол около 65°), а затем перед первым центральным цилиндром (азимутный угол около 45°). Со временем разрыв контрастного покрытия наблюдается вокруг фронтальных частей передней группы цилиндров, и наибольшая область разрыва появляется между первыми и вторыми боковыми цилиндрами, где к разрывному действию подковообразных и следных вихрей прибавляется боковое течение между этими цилиндрами.

Более мелкие по размеру подковообразные вихри, как ранее было указано, формируются перед каждым из цилиндров, которые образуют исследуемую конструкцию, и их интенсивность уменьшается при увеличении расстояния вниз по потоку в зависимости от расположения отдельного цилиндра в обтекаемом ряду. В кормовой части трехрядной модели интенсивность подковообразных вихрей вновь увеличивается, что обусловлено ростом пористости трехрядной конструкции, а отсюда и уменьшением

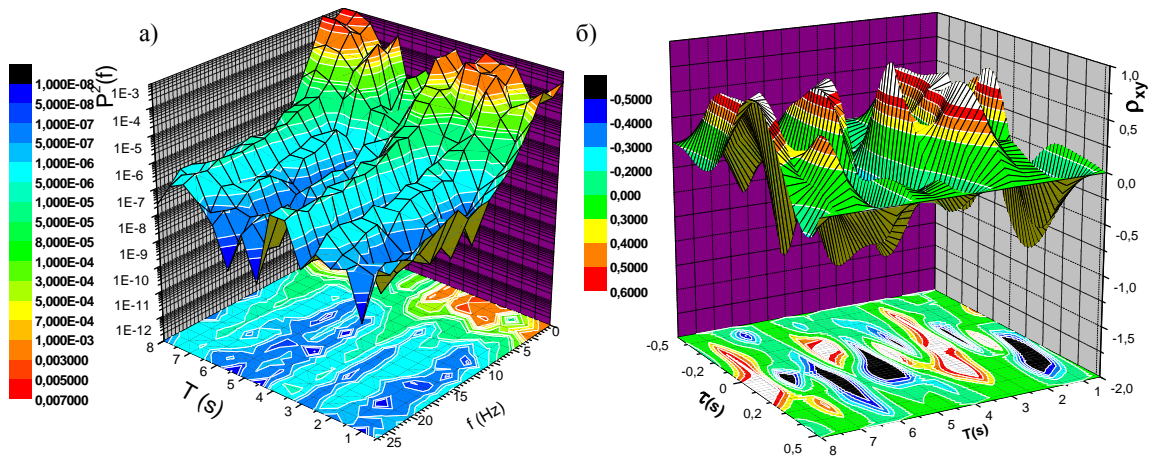


Рис. 3

Характерный график спектральной плотности мощности пульсаций скорости вихревого движения перед первым центральным цилиндром представлен на рис. 2 для координат $x=10 \cdot 10^{-3}$ м, $y=6 \cdot 10^{-3}$ м и $z=0$ при $U_{\infty}=0,1$ м/с. Пульсационная энергия подковообразной вихревой системы перед центральным цилиндром сосредоточена в частотном диапазоне до 10 Гц, что указывает на низкочастотный процесс вихревого движения в этом местонахождении. Этому диапазону частот соответствуют числа Струхала, рассчитанные по диаметру опоры и скорости потока в гидродинамическом канале, которые не превышают значения $St \leq 3$. Наибольшие уровни пульсаций скорости наблюдаются на частоте около 0,5 Гц или $St=0,14$ (рис. 2), что соответствует частоте колебаний подковообразного вихря, как когерентной структуры, в вертикальной и горизонтальной плоскости. Вращение подковообразного вихря вокруг своей оси происходит преимущественно с частотой близкой к 1 Гц ($St=0,27$). Пульсации скорости, которые соответствуют частоте вращения вихря, имеют меньшую амплитуду, что видно на рис. 2. Подобный колебательный процесс когерентного подковообразного вихря, огибающего передний центральный цилиндр, и его частота вращения наблюдались при визуальных опытах.

Подковообразные вихри и все вихревое движение в целом поблизости плохо обтекаемых тел является существенно нестационарным осциллирующим процессом, как показывает опыт экспериментальных работ и численного моделирования механизма образования вихрей и их развития в сопряженных течениях [1-4]. Кроме того, эти вихревые системы во многих случаях являются и неоднородными в пространстве. Поэтому статистическая обработка результатов таких случайных процессов с явной нестационарностью и неоднородностью должна быть выполнена по специальным программам и методикам, в частности, условными методами анализа данных. Нередко такие процессы анализируются с помощью мгновенных или кратковременных спектральных и корреляционных зависимостей [5]. В данных измерениях был использован кратковременный метод обработки экспериментальных данных. За промежуток времени статистического анализа было принято 1 с – а именно, то время, которое отвечает частотам вращения подковообразного вихря вокруг своей оси. Результаты опытов анализируются с 20 % перекрытием частотных интервалов.

На рис. 3 показано изменение спектральных характеристик во времени в виде трехмерной спектрограммы, где по соответствующим осям отложены время наблюдения в с, частота в Гц и спектральная плотность пульсаций скорости в $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$. Эта

спектрограмма соответствует спектральной зависимости пульсаций скорости, которая получена при статистической обработке экспериментальных данных за период 60 с, и отображена на рис. 3а. Спектрограмма четко характеризует нестационарность случайного процесса, что свойственно полю пульсаций скорости в передней части центрального цилиндра. На этом графике хорошо видно период формирования и развития квазиустойчивого подковообразного вихря, его частота вращения и степень трансформации энергии между частотными компонентами в процессе формирования и осцилляции в пространстве и во времени, как самого подковообразного вихря, так и окружающего его вихревого потока. Следовательно, частота вращения вихря составляет около (1...1,5) Гц, осцилляции его в вертикальной и горизонтальной плоскостях почти (0,45...0,75) Гц, энергия поля пульсаций скорости в сечении перед цилиндром сосредоточена, главным образом, до 10 Гц (в частности, в динамическом диапазоне около 60 дБ, смотри рис. 2).

Степень нестационарности процесса формирования и развития подковообразной вихревой системы также характеризует трехмерная коррелограмма, которая показана на рис. 3б. Она отображает изменения во времени функции взаимной корреляции между сигналами термисторных датчиков, которые расположены на расстоянии около 4 мм друг от друга. Коррелограмма приведена для пары датчиков, один из которых находился в ядре вихря, а другой в его периферийной области. Видно, что изменение коррелированности поля пульсаций скорости в вихревой области имеет осциллирующий характер с частотой около 1 Гц (частота вращения вихря). Направление конвективной скорости коррелированного сигнала в этом месте отвечает направлению основного потока. Но периодически (около 2 с) сигналы одного и другого датчиков находятся в противофазе (светлые и темные зоны на коррелограмме повторяются). Эти периодические ($f \approx 0,5$ Гц) появления максимумов корреляции и антикорреляции обусловлены колебательным процессом подковообразного вихря в пространстве и во времени.

ВЫВОДЫ

Использование визуальных методов исследований позволило оценить геометрические характеристики когерентных вихревых структур, которые генерируются в месте сопряжения трехрядной цилиндрической модели, расположенной на плоской поверхности. Кратковременный статистический анализ экспериментальных данных дал возможность определить динамические особенности подковообразных вихревых систем в сопряженном течении и оценить их пространственные и временные характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paik J., Escarriaza C., Sotiropoulos F. On the bimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system in a wing-body junction // *Phys. Fluids*. – 2007. – **19**, № 4. – P. 045107-1-20.
2. Sahin B., Ozturk N.F., Gurlek C. Horseshoe vortex studies in the passage of a model plate-fin-and-tube heat exchanger // *Int. J. Heat and Fluid Flow*. – 2008. – **29**, № 2. – P. 340-351.
3. Sumer B.M., Bundgaard K., Fredsoe J. Global and local scour at pile groups // *Int. J. Offshore Polar Eng.* – 2005. – **15**, № 3. – P. 204-209.
4. Воскобійник А.В., Воскобійник В.А., Воскобойник О.А. Спряжене обтікання трирядного пального ростверку на пласкій поверхні. Частина 2. Просторово-часові кореляції та спектри // *Прикладна гідромеханіка*. – 2008. – **10**, № 4. – С. 13-25.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ.– М.: Мир, 1974.– 464 с.