

УДК 532.5+532.527

Экспериментальное исследование взаимодействия вихревого кольца с твердой поверхностью в широком диапазоне скоростей его движения *

В.В. Никулин

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

Экспериментально исследовано взаимодействие распространяющегося в воде вихревого кольца с твердой поверхностью, движущегося по нормали к ней, при вариации скорости движения более чем в 30 раз и чисел Рейнольдса более чем в 60 раз. Рассмотрены ламинарные и турбулентные вихревые кольца. Установлено, что отношение диаметров вихревого кольца до взаимодействия с поверхностью и в момент его отхода от нее практически не зависит от скорости и числа Рейнольдса. Отмечено, что диаметр вихревого кольца в момент его отхода от поверхности в пределах экспериментального разброса совпадает с размером следа, остающегося на поверхности после налетания на нее вихревого кольца. На основании этого предполагается, что наблюдавшаяся ранее ограниченность такого следа связана с отходом вихря от поверхности.

Ключевые слова: вихревое кольцо, твердая плоская поверхность, взаимодействие.

Введение

Концентрированные вихри играют важную роль в динамике турбулентного пограничного слоя, в частности, в явлении выброса завихренной жидкости из пограничного слоя во внешнее течение. Гидродинамику взаимодействия вихрей с поверхностью наиболее удобно изучать на примере изолированных вихрей, в частности кольцевых, чему посвящено значительное количество работ, например, [1–3]. Установлено, что процесс приближения вихревого кольца к поверхности разделяется на качественно различные стадии. Вначале сближение и изменение радиуса кольца происходят в соответствии с моделью, построенной в рамках идеальной жидкости [1]. Начиная с некоторого расстояния движение вихря отклоняется от предсказываемой закономерности, затем сближение прекращается и вихрь отходит от поверхности. Помимо фундаментального значения исследование взаимодействия вихревого кольца с твердой поверхностью представляет и самостоятельный интерес, поскольку подобное явление может возникать в различных практических течениях. Например, когерентные структуры в виде кольцевых вихрей образуются в импактных струях, использующихся в технических устройствах [4]. Еще одно интересное приложение данной задачи связано с феноменом образования кольцевых структур на льду озера Байкал. Со спутниковых фотографий на его льду были обнаружены темные кольцевые образования диаметром в несколько километров [5].

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00226а) и программы фундаментальных исследований Президиума РАН (№ 23.2).

Данный феномен к настоящему времени не имеет общепринятого объяснения. В работе [6] представлена гипотеза, что кольцевые структуры появляются в результате удара о ледовую поверхность вихревых колец, налетающих на нее из глубины озера и образующихся при импульсном выбросе со дна озера вверх жидкости или газо-жидкостной смеси.

В экспериментах, посвященных исследованиям взаимодействия вихревого кольца с поверхностью, установлены отмеченные выше закономерности. Регистрация течения осуществлялась путем его визуализации с помощью подкраски. Однако эксперименты проводились в небольших диапазонах чисел Рейнольдса только для ламинарных вихрей, что связано с быстрым размыванием красителя в турбулентных режимах. Кроме того, ряд параметров остался не охваченным. В частности, не установлена зависимость диаметра вихревого кольца в момент его отхода от поверхности от скорости движения вихря и его размеров. Данный параметр представляет интерес, поскольку характеризует размер области взаимодействия вихря с поверхностью, его удаление от поверхности приводит к уменьшению такого взаимодействия. Этот параметр можно надежно регистрировать экспериментально в ламинарном и турбулентном режимах и использовать для проверки адекватности теоретических или численных моделей. Кроме того, определение диаметра кольца в момент отхода полезно для понимания причины ограниченности размеров следа, остающегося на поверхности после взаимодействия с ней вихревого кольца, что отмечалось в работе [6].

В настоящей работе экспериментально определяются величины диаметров вихревого кольца до взаимодействия с поверхностью и в момент начала его отхода от поверхности, их отношение в широком диапазоне скоростей движения вихря и чисел Рейнольдса, включая ламинарные и турбулентные режимы. Полученные результаты используются для объяснения установленной в работе [6] закономерности, связанной с размерами следа.

1. Экспериментальная установка и результаты экспериментов

Используемая экспериментальная установка аналогична представленной в [6] и представляет собой вертикальный сосуд высотой 300 мм, сечением 150×150 мм. На дне сосуда установлена цилиндрическая камера с ориентированным вертикально вверх выходным отверстием. Использовались камеры двух диаметров — 7 и 15 мм. Сосуд заполнен водой, поверхность которой закрыта плоской горизонтальной крышкой. Расстояние от среза выходного отверстия до крышки составляет 120 мм. Для образования колец из камеры поршнем импульсно вертикально вверх выбрасывается окрашенная струя воды. Поршень движется под действием копира, перемещающегося горизонтально. Копир за счет своей формы в виде прямоугольной трапеции сообщает поршню движение в вертикальном направлении. В свою очередь копир двигается в результате удара по нему маятника. Маятник ударяет по копиру в нижней своей точке, длина маятника 1100 мм, максимальный ход копира 35 мм, поршня — 20 мм. В экспериментах регистрируется закон движения поршня с помощью реостатного датчика. По закону движения вычисляется скорость поршня, которая за время истечения струи остается практически постоянной. Длина струи считается равной ходу поршня, поскольку в условиях эксперимента воду можно считать несжимаемой, а камера имеет постоянный радиус вплоть до выходного отверстия. Жидкость внутри камеры окрашивается красителем. Вытекающая окрашенная жидкость далее переносится вместе с кольцом. Движение вихревого кольца и его взаимодействие с поверхностью регистрируется с помощью скоростной видеосъемки со скоростью от 30 до 250 кадров в секунду. Освещение осуществляется щелевым источником света, проходящим через ось вихря. Ширина щели — 1 см, направление света — перпендикулярно оси видеосъемки. В качестве скорости кольца принята средняя скорость его движения на отрезке пути длиной 30 мм, отстоящем от поверхности на 20 мм, определяемая на основе видеозаписи. На таком расстоянии влияние поверхности на вихрь не обнаружено. В экспериментах варьировались следующие параметры:

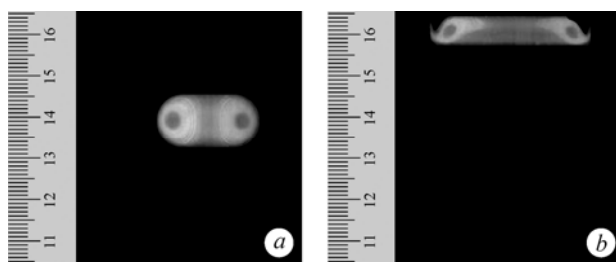


Рис. 1. Фотографии ламинарного вихревого кольца до взаимодействия с поверхностью (а) и в момент его отхода от поверхности (b). Диаметр камеры — 15 мм, длина струи — 15 мм, $Re = 1090$.

скорость струи, ее диаметр (равный диаметру камеры) и длина. При этом изменялись скорость и диаметр кольца.

На рис. 1а и 1b представлены фотографии осевого сечения ламинарного вихревого кольца, скорость которого до взаимодействия с поверхностью составляет 6,4 см/с. На рис. 1а — вихрь до взаимодействия, на рис. 1b — в начале отхода от поверхности, время между кадрами — 0,5 с. На рис. 2 отражена аналогичная картина, но вихрь — турбулентный, и его скорость составляет 100 см/с. Время между кадрами — 0,024 с, диаметр камеры — 15 мм, длина струи — 15 мм. В обоих случаях видна более темная, чем окружающая атмосфера, центральная часть ядра вихря. Это связано с тем, что в нее краситель не попадает, поэтому свет оттуда не рассеивается, и при щелевом освещении она выглядит темной. Известно, что осевое сечение ядра близко к окружности, то есть ядро приблизительно имеет форму тора [7]. В качестве диаметра вихревого кольца принят диаметр осевой окружности тора (окружности, описанной центром осевого сечения ядра вокруг оси симметрии). Диаметры кольца до взаимодействия (d_1) и в начале отхода от поверхности (d_2) определялись по фотографиям, аналогичным рис. 1 и 2, сделанным при различных параметрах вихря.

На рис. 3 представлена зависимость d_2 от числа Re , которое рассчитывается по параметрам вихря до взаимодействия с поверхностью: диаметру d_1 , скорости движения вихря, а также кинематической вязкости воды ν . Полагается $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$. На рис. 4 изображена зависимость d_2/d_1 от Re .

Оценим погрешности определения диаметров и их отношения. Погрешность определения величины d_1 составляет $\pm 0,5$ мм, что для вихрей 1 и 2, получаемых из камеры диаметром 7 мм, составляет примерно 5 %, а для вихрей 3 и 4, получаемых из камеры диаметром 15 мм, — 3 %. Погрешность определения величины d_2 складывается из погрешности измерения диаметра, которая составляет 0,5 мм, и погрешности, связанной с определением момента отхода вихря от поверхности. Момент отхода при малых скоростях находится с точностью до двух кадров, при больших — до одного. При этом диаметр кольца изменяется не более чем на 2 мм для вихрей 1 и 2 и на 4 мм для вихрей 3 и 4, что соответствует погрешностям ± 1 и ± 2 мм соответственно. Таким образом, общая погрешность определения d_2 составляет $\pm 1,5$ мм (или 10 %) при $d_2 = 15$ мм и $\pm 2,5$ (или 9 %)

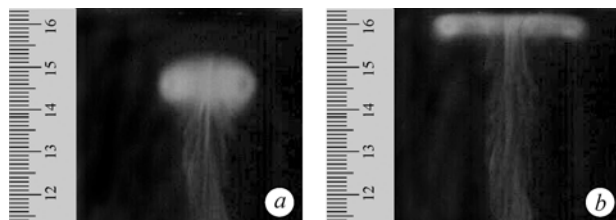


Рис. 2. Фотографии турбулентного вихревого кольца до взаимодействия с поверхностью (а) и в момент его отхода от поверхности (b). Диаметр камеры — 15 мм, длина струи — 15 мм, $Re = 17000$.

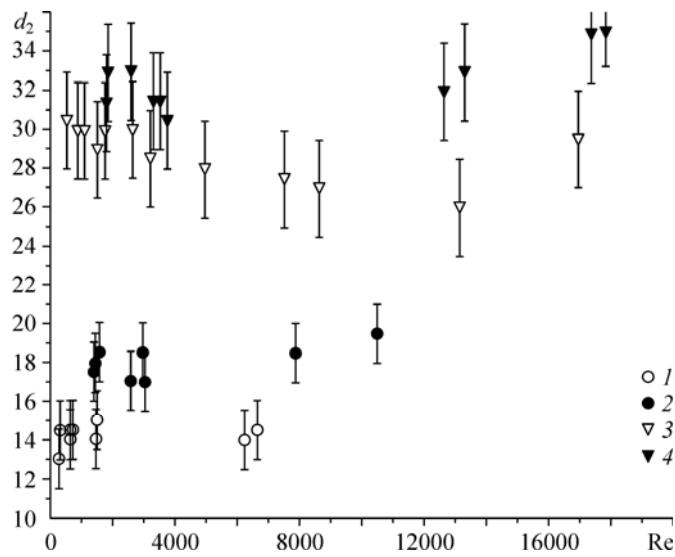


Рис. 3. График зависимости диаметра вихря в момент его отхода от поверхности (d_2) в мм от числа Re. Данные для вихрей, полученных из камеры диаметром 7 мм при длине струи 7 (1) и 20 (2) мм и полученных из камеры диаметром 15 мм при длине струи 15 (3) и 20 (4) мм.

при $d_2 = 30$ мм. Следовательно, погрешность определения отношения d_2/d_1 , равная сумме погрешностей вычисления диаметров, составляет 15 % для вихрей 1 и 2 и 12 % — для вихрей 3 и 4. Погрешности определения скорости и числа Рейнольдса не существенны, поскольку, как следует из графиков, значения диаметров и их отношения от этих параметров практически не зависят.

2. Анализ результатов

Диаметр вихря до взаимодействия с поверхностью зависит от диаметра камеры, длины струи и практически не зависит от числа Рейнольдса, что согласуется с данными работы [7]. Диаметр вихря в момент отхода от поверхности (d_2) также практически не зависит от числа Рейнольдса, но зависит от диаметра вихря до взаимодействия (рис. 3). Средние значения d_2 с учетом погрешности для вихрей 1, 2, 3 и 4 составляют $14,2 \pm 1,5$, $18,1 \pm 1,5$, $28,8 \pm 2,5$ и $32,3 \pm 2,5$ мм соответственно. Отношение d_2/d_1 оказалось практически не зависящим и от числа Рейнольдса и от d_1 , его отклонения от среднего значения укладываются в рамки погрешности измерений. По всем экспериментам с учетом максимальной погрешности получаем $d_2/d_1 = 1,75 \pm 0,25$.

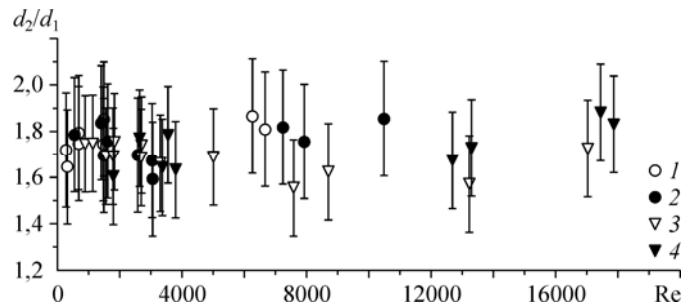


Рис. 4. График зависимости d_2/d_1 от числа Re.

Данные для вихрей, полученных из камеры диаметром 7 мм при длине струи 7 (1) и 20 (2) мм и полученных из камеры диаметром 15 мм при длине струи 15 (3) и 20 (4) мм.

В работе [6] для вихрей, получаемых в тех же условиях, что и в данных экспериментах (символы 3 на рис. 2, 3), найдено, что размер следа, остающегося на поверхности после налета на нее вихревого кольца, равен 28 ± 3 мм. Контрольные эксперименты по определению размера следа на поверхности для вихрей 1, 2 и 4 показали, что размеры следа с 10-процентным разбросом составляют 14, 18 и 30 мм соответственно. Сравнивая эти значения с представленными выше результатами, можно сделать вывод, что размер следа примерно равен диаметру кольца в момент его отхода от поверхности.

Отметим, что в качестве диаметра вихря до его взаимодействия с поверхностью в работе [6] принимался внешний диаметр атмосферы вихря, а не диаметр осевой окружности тора, как в настоящей работе. Поэтому отношение диаметра следа к диаметру внешней атмосферы вихря в [6] было меньше и примерно составляло 1,4.

Заключение

Исследования взаимодействия вихревого кольца, образованного в воде, с твердой поверхностью при его движении по нормали к ней показали, что отношение диаметра кольца (в качестве которого принят диаметр осевой окружности тороидального ядра) в момент отхода вихря от поверхности к его диаметру до взаимодействия с ней практически не зависит от числа Рейнольдса и примерно равно 1,75. Эксперименты выполнены при больших вариациях числа Рейнольдса, более чем в 60 раз, для ламинарных и турбулентных вихрей, что свидетельствует об универсальности данного отношения. Размер следа, остающегося на поверхности после налета на нее вихря, ожидаемо коррелирует с объемом вихрезадающей камеры и в пределах погрешности выполненных экспериментов равен диаметру вихревого кольца в момент его отхода от поверхности.

Список литературы

1. Walker D.A., Smith C.R., Cerra A.W., Doliganski T.L. The impact of a vortex ring on a wall // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 181. P. 99–140.
2. Fabris D., Liepmann D. Quantitative experimental and numerical investigation of a vortex ring impinging on a wall // Phys. Fluids. 1996. Vol. 8, No. 10. P. 2640–2649.
3. Naguib A.M., Koochesfahani M.M. On wall-pressure sources associated with the unsteady separation in a vortex-ring/wall interaction // Phys. Fluids. 2004. Vol. 16, No. 7. P. 2613–2622.
4. Алексеев С.В., Маркович Д.М., Семенов В.И. Турбулентная структура газонасыщенной импактной струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 5. С. 22–33.
5. Балханов В.К., Башкуев Ю.Б., Халганов В.Б. Феномен образования круговых колец на заснеженном ледовом поле озера Байкал // ЖТФ. 2010. Т. 80, вып. 9. С. 34–37.
6. Никулин В.В. Налетание вихревого кольца, несущего примесь, на твердую поверхность // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 3. С. 359–362.
7. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. Новосибирск, 2007. 152 с.

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2014 г.