

УДК 532.5+532.527

## **Налетание вихревого кольца, несущего примесь, на твердую поверхность\***

**В.В. Никулин**

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

E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

Экспериментально исследовано налетание вихревого кольца, образованного в воде и несущего окрашивающую примесь, на твердую поверхность по нормали к ней. Определены размер и форма следа, остающегося на поверхности после налетания вихря. Установлено, что размер следа практически не зависит от скорости движения кольца, а его форма определяется количеством примеси, содержащейся в вихре. Обсуждается связь полученных результатов с возможным механизмом образования кольцевых структур на льду озера Байкал.

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

### **Введение**

Исследования взаимодействия вихревого кольца с твердой поверхностью в основном инициированы фундаментальными проблемами гидродинамики, связанными с выяснением роли концентрированных вихрей в динамике пограничного слоя, в частности, их ролью в явлении выброса завихренной жидкости из пограничного слоя во внешнее течение [1–3]. В то же время данное явление представляет и самостоятельный интерес, поскольку может появляться в различных практических течениях. Например, когерентные структуры в виде кольцевых вихрей возникают 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 озера на его льду были обнаружены темные кольцевые образования диаметром в несколько километров [5]. Данный феномен к настоящему времени не имеет общепринятого объяснения. Одной из гипотез является та, 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 загрязненной жидкости или газожидкостной смеси [6]. Для того чтобы понять, возможен ли подобный механизм образования кольцевых структур на льду озера, необходимы дальнейшие изучения движения и взаимодействия вихревых колец с поверхностью. В частности, важно установить, каков размер области взаимодействия и как зависит он

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 23.2 «Фундаментальные проблемы океанологии: физика, геология, биология, экология».

от параметров вихря. В настоящей работе в качестве индикатора взаимодействия вихревого кольца с поверхностью используется след, остающийся на поверхности после налетания вихря. Его исследование позволяет определить размер области взаимодействия.

### 1. Экспериментальная установка и результаты экспериментов

Экспериментальная установка представляет собой вертикальный сосуд высотой 300 мм, сечением 150×150 мм. На дне сосуда установлена цилиндрическая камера, внутренний диаметр которой 15 мм, с ориентированным вертикально вверх выходным отверстием. Сосуд заполнен водой, поверхность которой закрыта плоской горизонтальной крышкой. Расстояние от среза выходного отверстия до крышки составляет 210 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, ход копира 30 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. Ход поршня во всех экспериментах фиксирован и равен 15 мм, скорость варьируется от 0,4 до 2,8 м/с. Длина струи и ее скорость считаются равными ходу поршня и его скорости соответственно, поскольку в условиях эксперимента воду можно считать несжимаемой, а камера имеет постоянный радиус вплоть до выходного отверстия. Жидкость внутри камеры окрашивается с помощью чернил, содержание которых в камере изменяется от нескольких процентов до половины общего количества смеси. Вытекающая окрашенная жидкость далее переносится вместе с кольцом, поскольку одним из свойств вихревых колец является их способность к переносу примесей [7]. Движение вихревого кольца регистрируется с помощью видеосъемки со скоростью 100 кадров в секунду. В качестве характерной скорости принята средняя скорость движения вихря на конечном отрезке пути длиной 100 мм, которая определяется на основе видеозаписи. Отметим, что, согласно работе [8], данная средняя скорость отличается от скорости вблизи поверхности не более чем на 10 %. В экспериментах характерная скорость изменяется от 0,1 до 0,8 м/с. Температура воды в экспериментах составляет 20 °С. С целью проверки влияния температуры воды на результаты наблюдений были выполнены несколько экспериментов при температуре 3 °С. Для захвата краски на нижнюю поверхность крышки нанесено тонкое покрытие толщиной  $\approx 0,5$  мм.

После импульсного истечения струи происходит формирование вихревого кольца. Диаметр образующегося кольца примерно в 1,4 раза больше диаметра выходного отверстия. Расширение кольца по мере движения незначительно и не превышает нескольких процентов. Перед ударом о поверхность его диаметр примерно равен 20 мм. Наблюдаемая на крышке картина зависит от того, какую часть краски теряет вихревое кольцо по мере движения к поверхности. Известно, что в вихревом кольце можно выделить две области [8]: ядро вихря, примерно тороидальной формы, где завихренность велика, и атмосферу вихря, имеющую форму близкую к эллипсоиду вращения, где завихренность намного меньше, чем в ядре. По мере движения вихревого кольца краска сначала теряется из его атмосферы, значительно дольше сохраняясь в его ядре. На рис. 1, *a* приведена фотография кольца, сохранившего вплоть до соударения с поверхностью краску в атмосфере, на рис. 1, *b* — только в ядре. В представленных экспериментах количество сохраненной краски определялось ее начальным количеством.

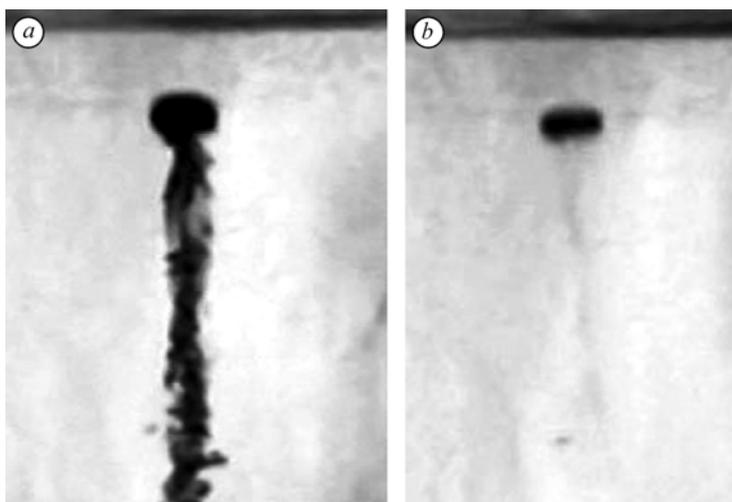


Рис. 1. Фотографии вихревого кольца, сохранившего краску в атмосфере (а), только в ядре (b).

Фотографии следов, оставленных вихрем на крышке в этих двух случаях, даны на рис. 2. В одном из них (рис. 2, а) окрасившееся пятно имеет форму, близкую к кругу, в другом (рис. 2, b) — форму кольца. Внешние радиусы круга и кольца  $\approx 29$  мм. Из рис. 2, а следует, что взаимодействие вихря с поверхностью осуществляется как в области его атмосферы, так и ядра. Во втором случае взаимодействие с атмосферой не визуализировано из-за отсутствия в ней краски.

Далее была исследована зависимость внешнего диаметра пятна от характерной скорости кольца, изменявшейся от 9 до 80 см/с. Число Рейнольдса, рассчитываемое по диаметру кольца и характерной скорости, находилось в диапазоне  $1,8 \cdot 10^3 \div 1,6 \cdot 10^4$ . Диаметр пятна определялся по фотографиям следа. Из-за размытия пятна и не строго круговой формы точность измерения составляла  $\pm 3$  мм. Зависимость внешнего диаметра пятна на поверхности от скорости движения кольца изображена на рис. 3. Температура воды составляла  $20^\circ\text{C}$ . Из рисунка следует, что диаметр пятна практически не зависит от скорости и равен  $(28 \pm 3)$  мм, что примерно в 2 раза больше диаметра сопла и в 1,4 раза

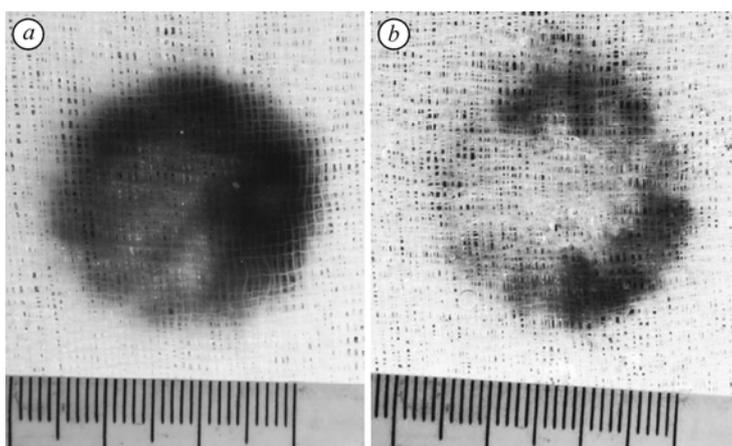


Рис. 2. Фотографии следов, оставленных вихрем на крышке, в случаях, когда краска сохраняется во всей атмосфере вихря (а) и остается только в его ядре (b).

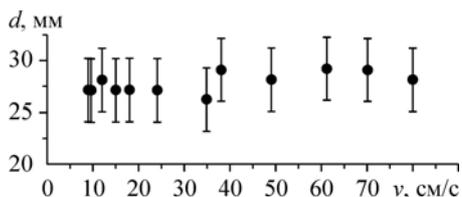


Рис. 3. Зависимость внешнего диаметра следа на поверхности от скорости вихревого кольца ( $d$  — диаметр пятна в мм,  $v$  — скорость кольца в см/с).

больше диаметра вихревого кольца. Сравнительные эксперименты при температуре воды равной 3 °С не выявили различий, выходящих за пределы указанной погрешности.

На рис. 4 представлена фотография кольцевой структуры на льду озера Байкал, сделанная с космической станции. Фотография взята из работы [5]. Видно внешнее сходство рисунков 2, b и 4.

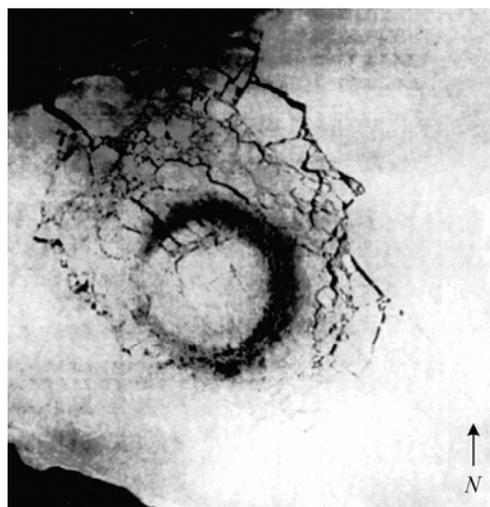


Рис. 4. Фотография кольцевой структуры на льду озера Байкал, взятая из работы [5].

### Заключение

Внешний диаметр следа, остающегося на поверхности после налетания по нормали к ней вихревого кольца, содержащего загрязняющую поверхность примесь, практически не зависит от скорости движения кольца и примерно в 1,4 раза больше его диаметра. След, остающийся на поверхности, в случае потери загрязняющей примеси из атмосферы вихря внешне похож на кольцевую структуру, наблюдаемую на льду озера Байкал.

### 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., Халтанов 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 на твердую поверхность как механизм образования кольцевых структур на ледовом поле озера Байкал. Новосибирск, 2011, № 1-11. 6 с. (Препринт / РАН. Сиб. отделение. Ин-т гидродинамики).
7. Тарасов В.Ф., Якушев В.И. Экспериментальные исследования переноса примеси турбулентным вихревым кольцом // ПМТФ. 1974. № 1. С. 130–136.
8. Ахметов Д.Г. Вихревые кольца. Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2007. 152 с.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2012 г.,  
после доработки — 25 января 2013 г.