

УДК 532.527

© 1997 г. В.И. БОЯРИНЦЕВ, Т.Е. БОЯРИНЦЕВА, Д.Г. КОРОТАЕВ,
А.К. ЛЕДНЕВ, А.С. САВИН**ДВИЖЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ ВИХРЕЙ В ОДНОРОДНЫХ ПО ПЛОТНОСТИ
СРЕДАХ ПО НОРМАЛИ К СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Исследовано распространение кольцевых вихрей в однородной среде по нормали к свободной поверхности и при выходе вихрей на границу раздела вода – воздух. Полученные результаты позволяют оценить способность кольцевого вихря выйти на свободную поверхность жидкости или отразиться от нее, а также определить время жизни вихря и проходимое им расстояние до момента разрушения.

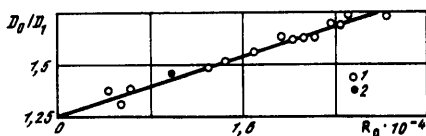
В решении проблемы идентификации гидродинамических возмущений поверхности океана, вызванных погруженными источниками (как подвижными, так и неподвижными), первостепенное значение имеет исследование физических механизмов их образования и выявление их устойчивых признаков.

Крупномасштабные (сравнимые по размерам с источником возмущений) вихревые образования могут нести большой запас энергии и поэтому обладать большой автономностью и временем жизни. Подтверждением этого положения являются протяженные грибообразные вихревые структуры, наблюдаемые в приповерхностном слое океана. Отдельные вихри, порождаемые погруженным источником, могут выходить на поверхность воды, отражаться от слоев с резким изменением плотности (скачка плотности) или разрушаться в слое скачка с образованием внутренней волны [1, 2].

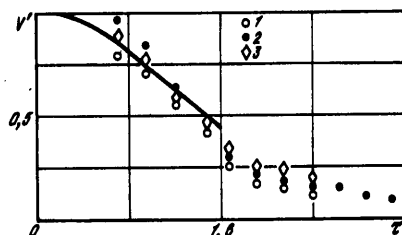
Проблема выхода вихревых возмущений (от погруженного источника) на свободную поверхность океана тем более важна, что позволяет использовать аэрокосмические методы диагностики поверхности, а разработка методов моделирования дает возможность изучения механизма развития крупномасштабных вихрей в условиях лабораторного эксперимента [3].

Эксперименты выполнялись на установке ИПМ РАН, подробно описанной в [3]. Установка состоит из кюветы (из органического стекла) размерами 400×400×450 мм, в дно которой вмонтирован генератор вихрей. Насадок генератора имел форму усеченного конуса с диаметром выходного отверстия $D_1 = 18$ мм. Конструктивные особенности установки позволяли получать кольцевые вихри в диапазоне начальных значений чисел Рейнольдса $Re_0 = (0,4-3,5) \cdot 10^4$, что соответствовало как вихрям, турбулентным уже на стадии образования, так и вихрям с нестабильной спиральной структурой. Кювета заполнялась водой, из пробирки с красителем в генератор поступала подкрашенная жидкость, что позволяло наблюдать процесс образования и поведение вихревого кольца вблизи свободной поверхности. Эти процессы фиксировались фотокамерой с частотой съемки 8 кадров в секунду. Положение вихря и его размеры определялись по координатной сетке на задней стенке кюветы.

На фиг. 1 дана зависимость (точки 1) начального диаметра вихря, отнесенного к диаметру выходного отверстия генератора, от Re_0 (определяемого по скорости и диаметру вихря на выходе из генератора). Точка 2 соответствует данным [3]. Видно, что диаметр "атмосферы" формирующегося вихря практически линейно растет с увеличением числа Re_0 . На качественную связь этих параметров ранее указывалось в [4].



Фиг. 1. Зависимость начального диаметра кольцевого вихря от числа Рейнольдса на выходе из генератора вихрей: 1 – данные настоящей работы; 2 – данные [3]



Фиг. 2. Зависимость скорости движения кольцевого вихря от времени для $Re_0 = 2,5 \cdot 10^4$. Точки 1–3 соответствуют различным сериям экспериментов, сплошная кривая – осредненная зависимость

Принимая известную [5, 6] модель сворачивания вихревой дорожки в спираль при малой скорости выталкивания жидкости из отверстия, можно написать

$$D = \frac{D_0 + D_1}{2} \quad (1)$$

где D_0 – наблюдаемый диаметр; D – реальный диаметр вихря, определяемый как расстояние между центрами спиралей; D_1 – диаметр выходного отверстия генератора вихрей.

При малых скоростях выбрасывания жидкости через выходное отверстие генератора $D_0/D_1 = 1,25$, т.е. $D/D_1 = 1,12$. Из постулата сохранения формы вихря следует, что соотношение $D/D_0 = 0,9$, следующее из (1), должно сохраняться. Таким образом, можно с достаточной степенью точности получить реальный диаметр кольцевого вихря $2R$. Кроме того, можно оценить отношение радиуса кольца R к радиусу поперечного сечения тора a . В настоящем эксперименте $R/a = 9$.

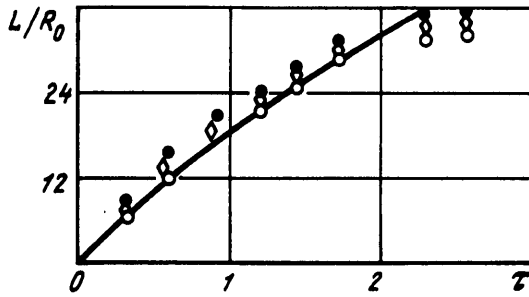
Интерес представляет изучение зависимости коэффициента расширения кольцевого вихря (определяемого как отношение приращения внешнего радиуса вихря к проходному расстоянию) от величины Re_0 . На этот счет существуют различные данные: так, в [7] $\alpha = \text{const}$, в [8] $\alpha \cdot 10^3 \approx 3 + (5 \cdot 10^4)/(Re_0 - 10^3)$. Для обработки результатов эксперимента в изучаемом диапазоне Re_0 было принято $\alpha = 0,01$.

На фиг. 2 представлена зависимость текущей скорости движения кольцевого вихря, отнесенной начальному значению, от безразмерного времени [9]

$$\tau = \frac{4\alpha V_0}{R_0} t \quad (2)$$

Обрыв кривой при значении $\tau \approx 1,6$ соответствует выходу вихрей на поверхность воды и последующему разрушению на ней. Точки при $\tau > 1,6$ соответствуют вихрям, отраженным свободной поверхностью и продолжившим свое движение в обратном направлении.

Из сопоставления экспериментальных данных с зависимостью, выведенной для установившегося автомодельного распределения завихренности [9], видно, что такое распределение устанавливается начиная с момента $\tau_0 \approx 0,6$. Для проверки этого факта был проведен пересчет, при котором в качестве начального момента выбиралась точка τ_0 , а скорость относилась к значению $V(\tau_0)$. В логарифмических координатах эта зависимость близка к линейной. Исследования в широком диапазоне чисел Re_0 показали, что стабильное распределение завихренности устанавливается на расстоянии от генератора, пропорциональном числу Re_0 . Этот результат подтверждают данные [3].



Фиг. 3. Влияние процесса отражения от свободной поверхности на закон движения кольцевого вихря (обозначения соответствуют фиг. 2)

В работе исследовалось также взаимодействие турбулентного вихревого кольца со свободной поверхностью жидкости. Условие отражения вихря от границы раздела сред с различными плотностями получено в [3] в виде

$$V < V_* = \sqrt{gL}$$

где g – ускорение силы тяжести; L – характерный размер вихря.

Выполненные эксперименты показали, что при малых скоростях движения вихря свободная поверхность воды ведет себя как твердая стенка, при подходе к которой вихрь расплющивается, порождая маломощные вторичные и третичные структуры, и затухает.

Изучалось поведение кольцевых вихрей для диапазона чисел Рейнольдса (по скорости подхода к свободной поверхности воды) $Re > (0,3-3,0) \cdot 10^4$.

Для визуализации возмущений свободной поверхности использовался метод отраженной сетки [10].

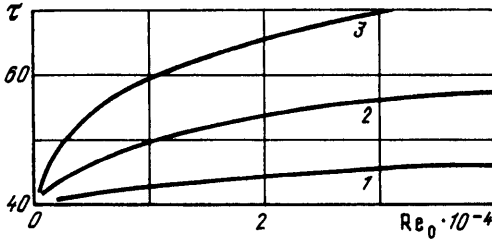
При $Re < 0,5 \cdot 10^4$ вихри останавливались у поверхности и разрушались. В диапазоне $Re = (0,5 - 1,0) \cdot 10^4$ при отсутствии остаточного поля скоростей вихри претерпевали отражение и продолжали движение в обратном направлении (вниз). При этом вначале над поверхностью жидкости образовывался купол, содержащий вихрь, хорошо различимый на фотографиях. При $Re > 1,3 \cdot 10^4$ вихри при ударе о свободную поверхность разрушались. При больших скоростях подхода вихря к свободной поверхности его разрушение носило взрывной характер и в результате часть жидкости вылетала вертикально вверх.

Характер движения отраженного вихря может быть проиллюстрирован следующим примером. На фиг. 3 экспериментальные точки соответствуют номерам вихрей 1, 2, 3 на фиг. 2. Все данные пересчитаны для автомодельного участка движения, точки 2 соответствуют движению отраженных вихрей, для которых отсчет проходимого расстояния и времени движения был продолжен после отражения от свободной поверхности. Кривая представляет закон движения кольцевого вихря в автомодельном режиме. Как следует из фиг. 3, процесс отражения не вносит существенного возмущения в движение кольцевого вихря, что позволяет говорить о своего рода "зеркальном" отражении вихря поверхностью воды.

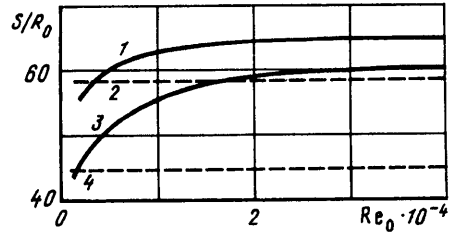
Практический интерес представляет получение явной временной зависимости $V(t)$, позволяющей делать долгосрочные прогнозы поведения кольцевого вихря, в том числе предсказывать время жизни и максимальное расстояние, которое проходит вихрь в реальной среде. Для ламинарных кольцевых вихрей получены приближенные зависимости, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом [4]

$$V \sim t^{-1}, R \sim t^{1/3}, L \sim \lg t, I = MV \approx \text{const}$$

где I – количество движения вихря; t – время движения кольцевого вихря, отсчитываемое от некоторого виртуального момента старта.



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Время жизни кольцевого вихря в зависимости от начального значения числа Рейнольдса: 1 - $C_2 = 1,0$, 2 - $C_2 = 0,1$, 3 - $C_2 = 0,02$

Фиг. 5. Максимальное расстояние, проходимое кольцевым вихрем: 1 - $C_1 = 0,1$ см/с, 2 - $C_1 = 1,0$ см/с, 3 - $C_2 = 100$, 4 - $C_2 = 10$

Для турбулентных вихрей диффузия завихренности в "следе" вихря и связанные с этим потери энергии на массообмен и ухудшение гидродинамического качества вихря не могут не сказаться на характере его движения. Вместе с тем анализ соотношений, полученных в [9], приводит к следующим оценкам:

$$L \sim t^{1/4}, \quad V \sim t^{-3/4}$$

что не соответствует результатам экспериментов. Неучет автомодельной теорией реальных процессов, сопровождающих движение кольцевого вихря, делает ее неприемлемой для прогнозирования движения вихря при больших значениях t .

В случае движения турбулентных кольцевых вихрей при больших значениях t можно предположить

$$V \sim t^{-N}, \quad N > 1$$

Такой подход сводится к представлению безразмерной скорости движения кольцевого вихря ($V' = V/V_0$) в виде

$$V' = (1 + \tau/T)^{-N} \quad (3)$$

где τ - реальное время движения вихря в эксперименте, обезразмеренное по (2); T - время с момента виртуального старта кольцевого вихря до момента выхода вихря из генератора вихрей.

Величины N и T могут быть определены из эксперимента. Так, в рассматриваемом случае (при $R_0 = 15$ мм и $Re_0 = 3 \cdot 10^4$) $T \approx 2,7$, $N \approx 2$.

Полученные результаты значительно отличаются от теоретических, но дают хорошее согласование с экспериментальными данными при больших значениях t .

Из соотношения (3) можно определить время жизни кольцевого вихря. Для этого выберем в качестве определяющего параметра прекращения существования вихря одно из условий

$$V < V_{\min} = C_1 \quad (4)$$

$$V/V_0 = C_2 \quad (5)$$

т.е. вихрь движется до тех пор, пока его скорость не станет меньше некоторой критической величины C_1 (4) либо пока его безразмерная скорость не станет меньше некоторой величины C_2 (5).

В первом случае время жизни вихря τ может быть определено непосредственно из соотношения (3). Расчеты показывают, что скорость уменьшится, например, в 100 раз за время $\tau \approx 24$.

Результаты расчета времени жизни вихря по условию (5) представлены на фиг. 4.

Как видно, выбор значения определяющего параметра C_1 или C_2 в (4), (5) сильно влияет на время жизни кольцевого вихря. Тем не менее с учетом быстрого падения скорости по соотношению (3) выбор значения C_1 или C_2 существенно не изменит расстояния, проходимого кольцевым вихрем до момента его остановки и разрушения.

На фиг. 5 показано влияние выбора величин C_1 и C_2 на проходимое кольцевым вихрем расстояние до момента его остановки и разрушения.

Отсюда следует, что изменение величин C_1 или C_2 на порядок приводит к незначительному изменению проходимого кольцевым вихрем расстояния.

Заключение. Независимо от выбора определяющего параметра "остановки" вихря при значениях $T = 2,7$ и $N = 2$ кольцевой вихрь проходит в реальной среде расстояние, в 30–35 раз превышающее его начальный диаметр.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-01-01080).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояринцев В.И., Леонтьев А.И., Секерж-Зенькович С.Я., Сысоев В.И. Распространение вихревых колец в неоднородной по плотности жидкости // ПМТФ. 1982. № 2. С. 22–26.
2. Ambartsoumian E.N., Boyarintsev V.I., Korotaev D.G. et al. Hydrodynamics effects at the interface of media with distinct densities: Preprint № 541. Moscow: Inst. for Prob. in Mech., 1994. 38 p.
3. Бояринцев В.И., Савин А.С. Исследование движения вихревых колец в однородных и стратифицированных средах: Препринт № 299. М.: Ин-т пробл. механики АН СССР, 1987. 63 с.
4. Maxworthy T. The structure and stability of vortex rings // J. Fluid Mech. 1972. V. 51. Pt 1. P. 15–32.
5. Петров П.А. Механизм образования вихревых колец // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 2. С. 19–26.
6. Didden N. On the formation of vortex rings: rolling-up and production of circulation // ZAMP. 1979. V. 30. N 1. P. 101–116.
7. Maxworthy T., Hopfinger E.J., Redekopp L.G. Wave motions of vortex cores // J. Fluid Mech. 1985. V. 151. P. 141–165.
8. Тарасов В.Ф. Оценка некоторых параметров турбулентного вихревого кольца // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1973. Вып. 14. С. 120–127.
9. Луговцов А.А., Луговцов Б.А., Тарасов В.Ф. О движении турбулентного вихревого кольца // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1969. Вып. 3. С. 50–60.
10. Boyarintsev V.I., Burago N.G., Lednev A.K., Frost V.A. Application of reflected grid method for examination of small deformation of moving fluid // J. Flow Visualization and Image Proces. 1993. V. 1. N 3. P. 235–238.

Москва

Поступила в редакцию
26.II.1996