УДК 532.528

ГЕНЕРАЦИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ В ВОДЕ

Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 13-08-00838, № 14-08-00226.

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по генерации кавитационных вихревых колец (КВК) в воде с помощью затопленного цилиндрического ствола с диаметрами 20 – 40 mm и длиной 30 – 100 mm. Исследована динамика образования и распространения КВК в воде в зависимости от скорости метания воды. Установлено, что КВК в виде полого тора образуются при скоростях струи более 2 m/s. При скоростях струи более 6 m/s оптическими методами впервые зарегистрированы радиальные пульсации КВК.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика образования и распространения вихревых колец в атмосфере изучены достаточно глубоко [1]. Детальные исследования распространения вихревых колец в воде проведены только для значений числа Рейнольдса $Re \leq 2 \cdot 10^3$, при скоростях струи до 0,3 m/s. При таких параметрах кавитационные процессы не развиваются, поэтому вопросы образования и пульсаций кавитационных вихревых колец пока остаются открытыми из-за недостатка экспериментальных исследований [2-4]. В работе [2] подробно изучались «особенности образования и движения кольцевых вихрей в воде» для генератора вихрей с диаметром d_0 = 35 mm при скоростях потока воды из ствола от 0,04 до 0,28 m/s. Регистрация вихрей осуществлялась с помощью красителей. В этих экспериментах КВК не регистрировались, однако автор отмечает, что при увеличении скорости метаемого столба воды ядро кольцевого вихря с красителем распространялось на расстояния до 30 - 40 калибров отверстия. В работе [3] изучались «свободные кольцевые вихри в жидкости» для генераторов вихрей с диаметрами отверстий d_0 = 70 - 130 mm, с регистрацией акустического излучения от движущегося вихря с помощью гидрофона. Регистрируемые пульсации акустических сигналов интерпретировались как пульсации кавитационной полости вихря.

В работе [5] был осуществлен теоретический расчет пульсаций поперечного сечения вихревой полости. Исследования проводились с целью изучения эрозионных свойств КВК в сравнении со сферической полостью. Выполненные оценки показывают, что в случае кольцевой полости они должны быть выше.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов, происходящих при образовании кавитационных вихревых колец (КВК), которые генерировались взрывом горючих газов в цилиндрических стволах, располагаемых в воде. Для регистрации гидродинамических параметров потока жидкости применялись методы высокоскоростной киносъемки. С помощью разработанных методов генерации КВК и регистрации поля скоростей потока жидкости в пространственно-временном масштабе непосредственно зарегистрированы радиальные пульсации КВК и обнаружена корреляция измеряемых параметров.

Результаты данных исследований могут найти применение в установках подводного бурения и очистки поверхностей в целях увеличения их эффективности [6].

© Тесленко В.С., Дрожжин А.П., Медведев Р.Н.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Генерация вихревых колец в воде осуществлялась метанием жидкости из затопленных вертикально в воде прозрачных цилиндрических стволов с диаметрами 20 – 40 mm, и длиной 30 – 100 mm (рис. 1).

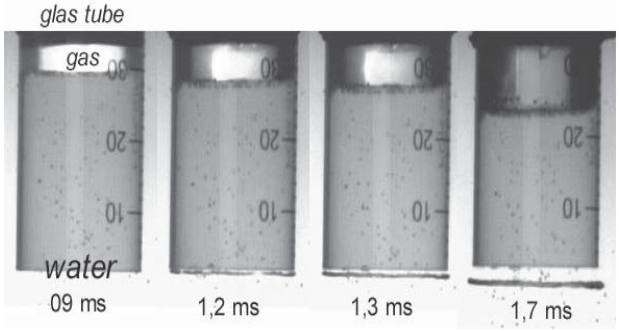

Рис.1 Схема постановки экспериментов и кинограмма начальной стадии процесса расширения продуктов сгорания и истечения жидкости из цилиндрического ствола.

Ствол, расположенный в воде, частично заполнялся горючей пропан-кислородной смесью, которая поджигалась высоковольтной искрой. Сжиганием заданных порций газовой смеси обеспечивалось выталкивание столба воды из ствола вниз до необходимой скорости. При этом на срезе ствола генерировался кольцевой вихрь, который распространялся в направлении потока жидкости.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении, при температуре водопроводной воды $t^0 = 24 – 25\ ^0C$. Динамика гидродинамических процессов изучалась с помощью теневой скоростной киносъемки. Киносъемка осуществлялась камерой «MotionXtra HG-LE» при частоте съёмки до 10000 кадров/с. Скорость жидкости в стволе и в «атмосфере» вихря измерялась по трекам частиц из полистирола ($\rho = 1{,}05\ g/sm^3$, $d = 100$ mkm).

Данная постановка экспериментов позволяет вести исследования истечения жидкости из ствола в широком диапазоне геометрических и гидродинамических параметров. Устройство позволяло осуществлять разгон столба воды до 16 m/s.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

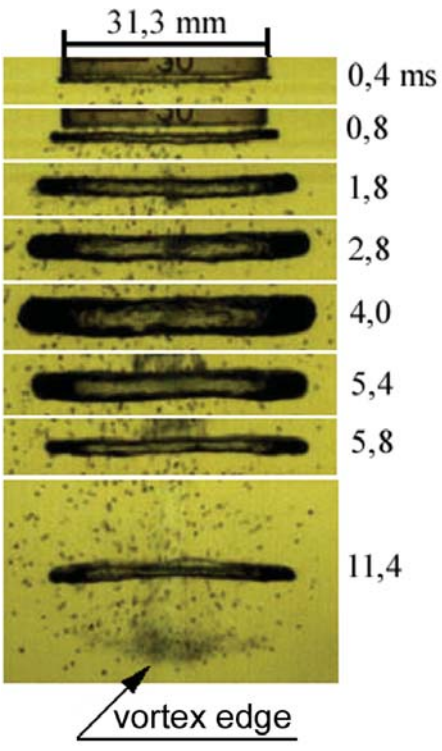

Рис.2 Выборочные кадры теневой съемки КВК ($V_0 = 11$ m/s ± 10%).

На Рис. 2 представлены кадры теневой киносъемки образования и динамики кавитационного вихревого кольца при метании столба воды высотой $h_0 = 40$ mm из ствола длиной 47 mm, с внутренним диаметром $d_0 = 29$ mm и внешним диаметром $D_0 = 31{,}3$ mm. Для данной кинограммы скорость столба воды (струи) на оси ствола в интервале 0-3 ms возрастала линейно до 13 m/s. Скорость струи на оси среза ствола в момент образования и отрыва КВК была в окрестности $V_0 = 11$ m/s ± 10%.

На Рис. 3 представлены результаты обработки всех кадров кинограммы Рис. 2. ($V_0 = 11$ m/s, ± 10%). D(t) – расстояние между внешними границами КВК, d(t) - диаметр поперечного сечения кольцевой полости, V(t) – значения скорости движения КВК вдоль оси ствола. Осредненные значения скорости КВК (на графике показаны сплошной линией) в промежутке времени 4-16 ms находились в интервале 3,5 -4,5 m/s.

На Рис. 4 представлены зависимости D (t), d (t) и V(t) для $V_0 = 9$ m/s (± 10%). Осредненные значения скорости движения КВК в промежутке времени 4-16 ms находились в интервале 3-4 m/s.

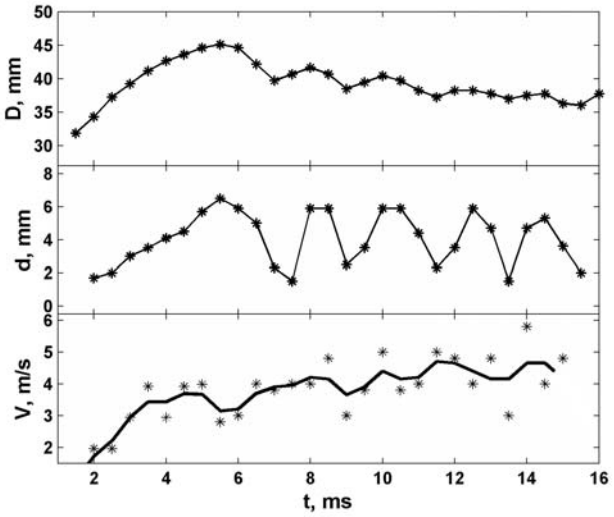

Рис.3 Зависимости D (t), d (t) и V(t) для V_0=11 m/s (± 10%).

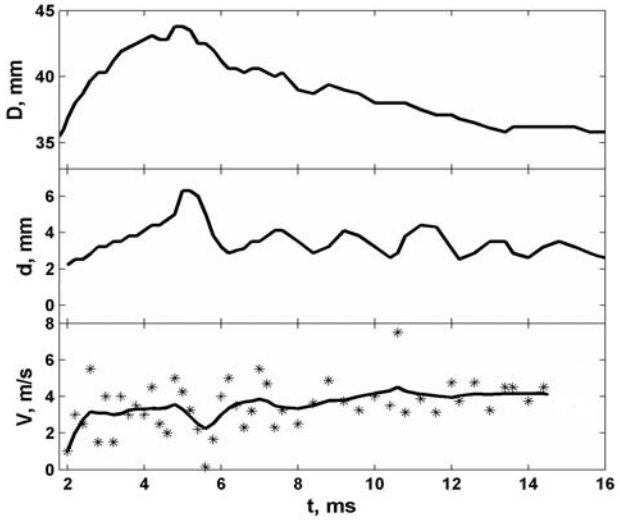

Рис.4 Зависимости D (t), d (t) и V(t) для V_0=9 m/s (± 10%).

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из данных Рис. 2-3 наглядно следует, что образованный КВК расширяется относительно диаметра ствола до значения $D = 1{,}5 \cdot D_0$. Далее КВК пульсирует с периодом T ~ 1,5 ms. На последнем кадре кинограммы Рис. 2 показана атмосфера вихря с передним фронтом вращающейся жидкости вокруг КВК. В данном случае КВК, в терминологии [1-3] является ядром вихревого кольца.

Представленные на Рис. 3 и Рис. 4 зависимости наглядно демонстрируют процессы параметрической корреляции измеряемых параметров. Наблюдается фазовая корреляция пульсаций максимального диаметра КВК (D) и диаметра поперечного сечения кольцевой полости (d). При этом отслеживается увеличение усредненной скорости V с уменьшением размеров КВК.

Из данных Рис. 3 и Рис. 4 наглядно следует, что с уменьшением V_0 уменьшаются значения D(t), d(t) и период пульсаций КВК. Дальнейшее уменьшение V_0 приводит к исчезновению реально наблюдаемых пульсаций КВК, т.е. КВК наблюдается, но пульсации не различимы. При скоростях струи 2 – 3 m/s наблюдаются только тонкие нити в виде «ожерелья» из пузырьков, с разрывами между пузырьками. Заметные радиальные пульсации КВК наблюдаются при скоростях струи $V_0 > 6$ m/s.

Скорость потока воды из ствола, при которой начинают наблюдаться кавитационные процессы на срезе ствола, была в интервале V_0 = 2-3 m/s. Этот порог соответствовал числам Рейнольдса $Re = V_0 \cdot d_0/\nu > 2 \cdot 10^4$, где ν – вязкость воды при $t^0 = 25\ ^0C$. При дальнейшем увеличении скорости метания водяного поршня обеспечивается формирование устойчивых КВК в виде кавитационного тора.

Порог возникновения кавитации можно оценивать по параметру кавитационного числа (ε) на основании закона Бернулли как $\varepsilon = P_0/(\rho \cdot V^2)$ (здесь P_0 – гидростатическое давление, ρ – плотность жидкости, V – скорость потока жидкости). В нашем случае значение кавитационного числа находится в интервале ε = 21-22, что на порядок отличается от ранее полученных значений для «кавитационного вихря» в работе [7]. Возможно, что результаты этой работы оказались сдерживающим фактором в исследованиях КВК, так как в этой работе «кавитационные вихри» были получены в масле при скоростях струи ~ 100 m/s и длине столба жидкости 10 mm из ствола диаметром 15 mm, что являлось относительно сложным техническим решением. При этом следует учитывать, что в работе [7] был получен и изучался «кавитационный вихрь» типа сфероида, а в данном случае рассматривается кавитационное кольцо, как ядро кольцевого вихря. По параметрам скорости струи из ствола выявлены пороговые параметры кавитационных процессов и образования устойчиво пульсирующих КВК.

ВЫВОДЫ

- Разработан относительно простой метод генерации КВК в воде с помощью метания столба воды до скоростей 16 m/s с помощью взрыва газовых смесей в цилиндрических стволах.
- Экспериментально показано, что КВК в воде возникают при скоростях истечения жидкости из цилиндрического ствола более 2-3 m/s, с кавитационным числом ε = 21-22 и числом Рейнольдса $Re > 2 \cdot 10^4$.
- Впервые, при скоростях струи более 6 m/s, оптическими методами зарегистрированы радиальные пульсации КВК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.А. Ахметов. Вихревые кольца. Из-во «ГЕО»-2007г., 152 с.
   Akhmetov D.G. Vortex rings. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”, 2007.- 152 p.
2. А.А. Бузуков. Особенности образования и движения вихревых колец в воде // Журнал ПМТФ 1971, № 2, с. 158-160.
   Buzukov A.A. The peculiarities of formation and motion of vortex rings in water. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 1971, No. 2, pp. 158-160.
3. О.П. Шорыгин. Свободные кольцевые вихри в жидкости // Ученые записки ЦАГИ, 1973, т. 4, №4, с. 48-56.
   Shorigin O.P. Free ring vortices in a liquid. Ucheniye zapiski TsAGI, 1973, V. 4, No. 4, pp. 48-56.
4. В.А. Владимиров, Л.Я. Рыбак. Некоторые вопросы движения полых вихревых колец в идеальной несжимаемой жидкости // Динамика сплошных сред, в. 26, Новосибирск, 1976, с.17-29.
   Vladimirov V.A., Ribak L.Ya. Some problems of motion of hollow vortex rings in an ideal non-compressible liquid. Dynamics of continuous media. 1976, No. 26, pp. 17-29.
5. G.L. Chahine, Ph.F. Genoux. Collapse of a cavitating vortex ring // Journal of fluids engineering, 1983, Vol. 105, pp. 400-405.
6. V.E. Johnson, G.L. Chahine, W.T. Lindenmuth, A.F. Conn, G.S. Frederick and G.J. Giacchino. Cavitating and structured jets for mechanical bits to increase drilling rate // Journal of Energy Resources Technology, 1984, Vol. 106, Is. 2, pp. 282-288.
7. М.А. Садовский, В.Н. Родионов, Г.В. Беляков. О механизме возникновения кавитационного вихря // ДАН 1992, т. 325, № 1, с. 42-45.
   Sadovsky M.A., Rodionov V.N., Belyakov G.V. On the mechanism beginning of a cavitational vortex. Doklady Akademii Nauk, 1992, V. 325, No. 1, pp. 42-45.