

03.1

Пульсации кавитационных вихревых колец в воде

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

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск
E-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2014 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований кавитационных вихревых колец (КВК) при метании водного столба (струи) в воду из затопленного цилиндрического ствола с диаметрами 20–40 мм и длиной 30–100 мм. Исследована динамика образования и распространения КВК в воде в виде торообразных кавитационных пузырьков, в зависимости от скорости метания воды. Установлено, что КВК в виде полого тора образуются при скоростях струи более 2 м/с. При скоростях струи более 6 м/с оптическими методами впервые зарегистрированы радиальные пульсации КВК.

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 м/с. При таких параметрах кавитационные процессы не развиваются, поэтому вопросы образования и пульсаций кавитационных вихревых колец (КВК) 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 $d_0 = 35$ мм при скоростях потока воды из ствола от 0.04 до 0.28 м/с. Регистрация вихрей осуществлялась с помощью красителей. В этих экспериментах КВК не регистрировалось, 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 $d_0 = 70–130$ мм, с регистрацией акустического излучения от движущегося вихря с помощью гидрофона. Регистрируемые пульсации акустических сигналов интерпретировались как пульсации кавитационной полости вихря.

Динамика пульсаций сферических кавитационных пузырьков изучается уже второе столетие, вплоть до попыток получения термоядерных реакций [5], а исследования торообразных кавитационных пузырьков, включая КВК, претерпели торможение из-за технической сложности их получения и математического моделирования. В этой связи данная экспериментальная работа может стать толчком в направлении расширенного изучения торообразных пульсирующих кавитационных пузырьков как потенциально устойчивой системы для разработки приложений в ряде областей.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамических процессов, происходящих при образовании кавитационных вихревых колец, 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.

Генерация вихревых колец в воде осуществлялась метанием жидкости из затопленных вертикально в воде прозрачных цилиндрических стволов с диаметрами 20–40 мм и длиной 30–100 мм. 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 $t^0 = 24–25^\circ\text{C}$. Динамика гидродинамических процессов изучалась с помощью теневой скоростной киносъемки. Киносъемка осуществлялась камерой „MotionXtra HG-LE“ при частоте съемки до 10 000 fps. Скорость жидкости в стволе и в „атмосфере“ вихря измерялась по трекам частиц из полистирола ($\rho = 1.05 \text{ g/cm}^3$, $d = 100 \mu\text{m}$).

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 м/с.

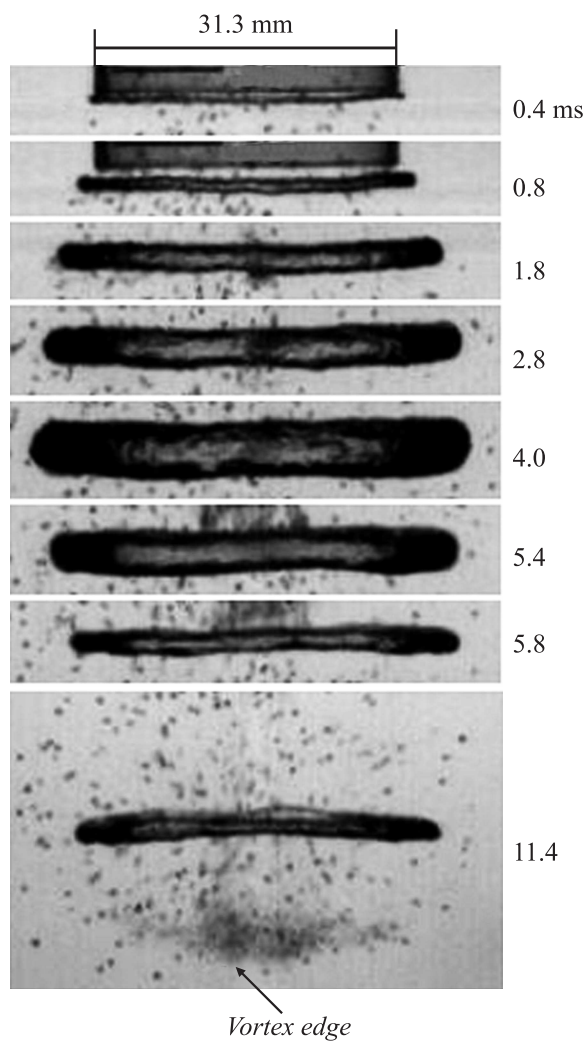


Рис. 1. Выборочные кадры теневой съемки КВК ($V_0 = 11 \text{ m/s} \pm 10\%$).

На рис. 1 представлены кадры теневой киносъемки образования и динамики кавитационного вихревого кольца при метании столба воды

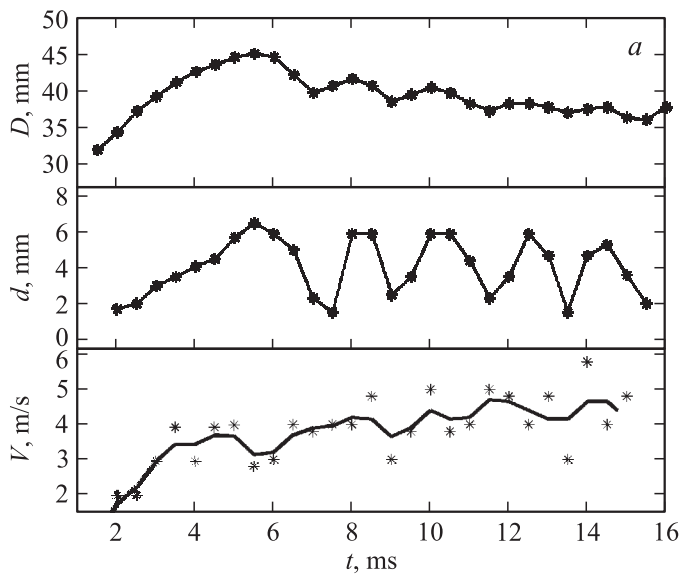


Рис. 2. Зависимости $D(t)$, $d(t)$ и $V(t)$ КВК для $V_0 = 11$ м/с ($\pm 10\%$) (а) и для $V_0 = 9$ м/с ($\pm 10\%$) (б).

высотой $h_0 = 40$ мм из ствола длиной 47 мм, с внутренним диаметром $d_0 = 29$ мм и внешним диаметром $D_0 = 31.3$ мм. Для данной кинограммы скорость столба воды (струи) на оси ствола в интервале 0–3 мс возрастала линейно до 13 м/с. Скорость струи на оси среза ствола в момент образования и отрыва КВК была в окрестности $V_0 = 11$ м/с $\pm 10\%$.

На рис. 2, а представлены результаты обработки всех кадров кинограммы рис. 1. ($V_0 = 11$ м/с, $\pm 10\%$), $D(t)$ — 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 мс находились в интервале 3.5–4.5 м/с.

На Рис. 2, б представлены зависимости $D(t)$, $d(t)$ и $V(t)$ для $V_0 = 9$ м/с ($\pm 10\%$). Соответственно осредненные значения скорости

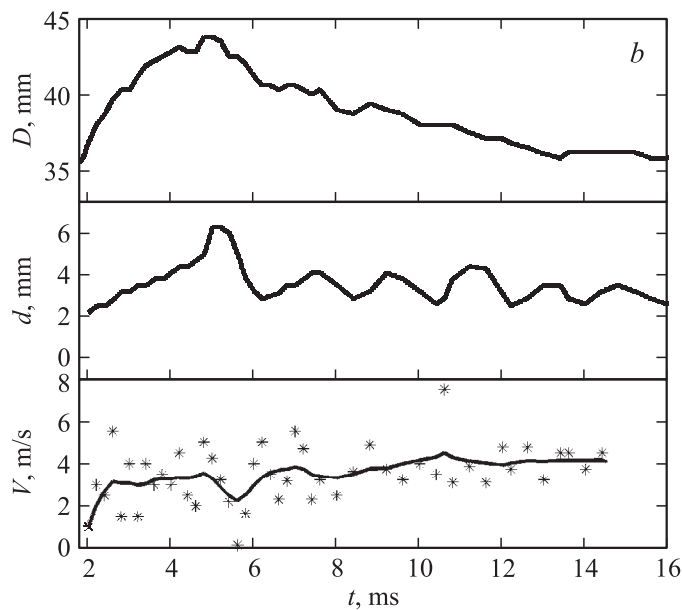


Рис. 2 (продолжение).

движения КВК в промежутке времени 4–16 ms находились в интервале 3–4 m/s.

Из кинограммы рис. 1 наглядно следует, что образованный КВК расширяется относительно диаметра ствола до значения $D = 1.5D_0$. Далее КВК пульсирует с периодом $T \sim 1.5$ ms. На последнем кадре кинограммы рис. 1 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. 2 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 уменьшение усредненной скорости V при увеличении размеров КВК. Наиболее четко это видно для первой пульсации, в интервале 5–6 ms.

Из данных рис. 2 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 неразличимы. При скоростях струи 2–3 м/с наблюдаются только тонкие нити в виде „ожерелья“ из пузырьков, с разрывами между пузырьками. С увеличением скорости струи пузырьки коалесцируют вдоль оси тороидального кольца, происходит формирование кавитационного кольца с увеличением d , но без заметного наблюдения радиальных пульсаций. Заметные радиальные пульсации КВК наблюдаются при скоростях струи $V_0 > 6$ м/с.

Скорость потока воды из ствола, при которой начинают наблюдаться кавитационные процессы на срезе ствола, была в интервале $V_0 = 2–3$ м/с. Этот порог соответствовал числам Рейнольдса $Re_0 = V_0 d_0 / \nu > 2 \cdot 10^4$, где ν — вязкость воды при $t^0 = 25^\circ\text{C}$. 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 $\varepsilon = P_0 / \rho V^2$ (здесь P_0 — гидростатическое давление, ρ — плотность жидкости, V — скорость потока жидкости). В нашем случае значение кавитационного числа находится в интервале $\varepsilon = 21–22$, что на порядок больше полученных ранее значений для „кавитационного вихря“ в работе [6]. Возможно, что результаты работы [6] оказались сдерживающим фактором в исследованиях КВК, так как в этой работе „кавитационные вихри“ были получены в масле при скоростях струи ~ 100 м/с и длине столба жидкости 10 мм из ствола диаметром 15 мм, что являлось относительно сложным техническим решением. При этом следует учитывать, что в работе [6] был получен и изучался „кавитационный вихрь“ типа сфероида, а в данном случае рассматривается кавитационное кольцо, как ядро кольцевого вихря [1]. По параметрам скорости струи из ствола выявлены пороговые параметры кавитационных процессов и образования устойчиво пульсирующих КВК. Кавитационные вихревые кольца образовывались как с добавками частиц полистирола, так и в чистой воде. Существенного различия в динамике образования КВК в чистой воде и с частицами полистирола не обнаружено.

Таким образом, разработан относительно простой метод генерации КВК в воде с помощью метания столба воды до скоростей 16 м/с 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 м/с, с кавитационным числом $\varepsilon = 21\text{--}22$ и числом Рейнольдса $Re_0 > 2 \cdot 10^4$.

Впервые, при скоростях струи более 6 м/с, оптическими методами зарегистрированы радиальные пульсации КВК.

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

Список литературы

- [1] *Ахметов Д.А.* // Вихревые кольца. Новосибирск: Изд-во „Гео“, 2007. 152 с.
- [2] *Бузуков А.А.* // ПМТФ. 1971. № 2. С. 158–160.
- [3] *Шорыгин О.П.* // Ученые записки ЦАГИ. 1973. Т. 4. № 4. С. 48–56.
- [4] *Владимиров В.А., Рыбак Л.Я.* // Динамика сплошных сред. В. 26. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 1976. С. 17–29.
- [5] *Taleyarkhan R.P., Block R.C., Lahey R.C., jr., Nigmatulin R.I., Xu Y.* // Physics Review Letters. 2006. V. 96. P. 034 301.
- [6] *Садовский М.А., Родионов В.Н., Беляков Г.В.* // ДАН. 1992. Т. 325. № 1. С. 42–45.