

Об особенностях кавитационного обтекания тел большого удлинения в вертикальном потоке жидкости

С. А. Горбатенко, В.П. Махров, А.И. Юрьев

Аннотация

Статья посвящена исследованию условий формирования кавитационного обтекания тел большого удлинения при их вертикальном движении в воде. Показано, что такое обтекание можно реализовать лишь при использовании практической гидродинамической особенности – каверноформирующего кольцевого крыла с соответствующим профилем, устанавливаемого в зоне носового насадка-кавитатора. Формируемое обтекание соответствует течению по типу течения Лайтхилла-Шушпанова. Полученные результаты исследования позволяют считать предложенную методику как новый способ реализации кавитационного обтекания тел большого удлинения в вертикальном нисходящем потоке жидкости.

Ключевые слова: кавитационное обтекание; кольцевое крыло; вертикальный поток жидкости.

Введение

Известно, что при общепринятой схеме формирования каверны за телесными кавитаторами (диском, конусом и проч.) осуществить на практике режим устойчивого кавитационного обтекания тела на подводном участке вертикального движения невозможно из-за нестационарности состояния газовой полости каверны при непрерывном изменении внешнего гидростатического давления [1,2]. В опубликованных теоретических работах и модельных экспериментах [3,4,5] исследования вертикальных кавитационных течений проводились, как правило, в стационарной постановке.

В настоящей статье представлены некоторые результаты исследований развитых вертикальных каверн, формируемых на цилиндрических телах большого удлинения с помощью кольцевых крыльев с соответствующим профилем. Такие каверны соответствуют многопараметрическим течениям Лайтхилла-Шушпанова [6]. Описанный в указанных

работах метод формирования кавитационного обтекания осесимметричных тел с помощью кольцевого крыла позволяет обеспечить существенное снижение гидродинамического сопротивления таких тел при минимальных расходах энергии и сохранить дополнительную силу плавучести на подводном участке вертикального движения в каверне.

Теоретические зависимости для исследования

Будем использовать методику формирования управляемых кавитационных течений за насадком - кавитатором с помощью вихревых гидродинамических особенностей [6] для условий вертикальных потоков жидкости. В качестве практической гидродинамической особенности рассматривается кольцевое крыло с геометрическими параметрами, необходимыми для каверны, замыкающей в заданном сечении тела. Поскольку в данном случае рассматриваемое многопараметрическое течение дополнительно «усложняется» непрерывным изменением условий внешнего вертикального обтекания, будем представлять решение задачи на данном этапе в квазистационарной постановке. Для определения параметров рассматриваемого вертикального кавитационного течения, формируемого с использованием кольцевого крыла (крыло обтекается сплошным потоком), система определяющих уравнений будет иметь следующий вид

$$\gamma_a(h_{a0}) = \xi'_a(h_{a0}) - \frac{1}{2\pi} \left[\iint_{S_a} \gamma_a(h) \cos \varphi \frac{\partial}{\partial n_a} \left(\frac{1}{R(h_a, h_{a0})} \right) \Big|_{h_{a0}} dS - \gamma_\sigma \iint_{S_\sigma} \cos \varphi \frac{\partial}{\partial n_\sigma} \left(\frac{1}{R(h_\sigma, h_{a0})} \right) \Big|_{h_{a0}} dS - \iint_{S_\kappa} \gamma_\kappa(h) \cos \varphi \frac{\partial}{\partial n_\kappa} \left(\frac{1}{R(h_\kappa, h_{a0})} \right) \Big|_{h_{a0}} dS \right]; (1a)$$

$$\begin{aligned} \gamma_\kappa(h_{\kappa0}) = & -\frac{1}{2\pi} \left\{ \iint_{S_a} \gamma_a(h) \cos \varphi \left[\frac{\xi'_\kappa(h_0)}{\eta_{\kappa0} R(h_{\kappa0}, h_a)} - \frac{\partial}{\partial n_\kappa} \left(\frac{1}{R(h_{a0}, h_a)} \right) \Big|_{h_{\kappa0}} \right] dS + \right. \\ & + \gamma_\sigma \iint_{S_\sigma} \cos \varphi \left[\frac{\xi'_\kappa(h_{\kappa0})}{\eta_{\kappa0} R(h_{\kappa0}, h_\sigma)} - \frac{\partial}{\partial n_\sigma} \left(\frac{1}{R(h_{\kappa0}, h_\sigma)} \right) \Big|_{h_{\kappa0}} \right] dS + \iint_{S_\kappa} \gamma_\kappa(h) \cos \varphi \left[\frac{\xi'_\kappa(h_{\kappa0})}{\eta_{\kappa0} R(h_{\kappa0}, h_\sigma)} - \right. \\ & \left. \left. - \frac{\partial}{\partial n_\kappa} \left(\frac{1}{R(h_{\kappa0}, h_\kappa)} \right) \right] dS \right\} - 2\xi'_\kappa(h_{\kappa0}); (1б) \end{aligned}$$

$$r_\sigma(h_{\sigma0}) = \frac{1}{2\pi} \left[\iint_{S_a} \gamma_a(h) \cos \varphi \frac{1}{R(h_{\sigma0}, h_a)} dS + \gamma_x^e \iint_{S_\sigma} \cos \varphi \frac{1}{R(h_{\sigma0}, h_\sigma)} dS + \iint_{S_\kappa} \gamma_\kappa(h) \cos \varphi \frac{1}{R(h_\kappa, h_{\sigma0})} dS \right]; (1в)$$

где уравнение (1a) определяет характер изменения скорости на кавернообразующим теле (кавитаторе); уравнение (1б) – соответствующий характер изменения скорости по профилю кольцевого крыла, а уравнение (1в) позволяет определить форму каверны в

квазистационарном состоянии, вытекающем из граничных условий решения, т.е. при условии постоянства скорости на границе каверны или давления внутри каверны.

В указанных уравнениях введены следующие обозначения:

$\gamma_x^e, S_\sigma, \xi_\sigma(L)$ – скорость, поверхность и абсцисса точки смыкания каверны соответственно; h_a, h_k, h_σ – координаты на поверхности тела-кавитатора, крыла и каверны соответственно.

Для получения однозначного решения данную систему уравнений необходимо дополнить условием замыкания границ формируемой каверны. Здесь принято условие –

$\xi_\sigma(L_\sigma) = D$. т.е. условие замыкания границ каверны на полубесконечный цилиндр с диаметром D_a как аналога известной схемы Рошко – Жуковского.

В представленной системе уравнений определяющим является третье – (1в), в котором выражение для γ_x^e может быть представлено дополнительной зависимостью [3]

$$\gamma_x^e = \sqrt{1 + \sigma_0 + \frac{\bar{x}}{Fr^2}} \neq const, \quad (2)$$

где $\bar{x} = \frac{\xi_x - \xi_c}{\eta_c}$; и $Fr^2 = \frac{V_\infty^2}{2q\eta_c}$; ξ_c, η_c – координаты точки образования каверны.

Число кавитации σ_0 в уравнении (2) определяется на уровне срывной кромки кавитатора.

С помощью представленных уравнений системы (1) определяются условия формирования вертикального кавитационного обтекания лишь в квазистационарной постановке. Но они позволяют определять и возможные законы регулирования параметров обтекания, добиваясь необходимой стабилизации обтекания и его замыкания в заданном сечении при изменении величины давления (глубины движения) путём изменения положения кольцевого крыла относительно кавитатора.

Уравнения системы (1) представляют собой интегро-дифференциальные уравнения типа Фредгольма, в которых содержатся особенности в особых точках на теле-кавитаторе и крыле. Численное решение уравнений этой системы осуществляется путём преобразований и упрощений содержащихся в них интегралов с особенностями. После чего эта система сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с последующим итерационным определением необходимых характеристик обтекания и соответствующих параметров каверноформирующей системы: кавитатора – кольцевого крыла. Подробное изложение методики решений подобных уравнений представлено в работе [6].

Результаты исследований

На рисунке 1 показаны в качестве примера обобщённые расчётные геометрические параметры вертикальных «всплывающих» каверн при постоянном значении циркуляции крыла и варьировании соотношений между диаметрами крыла d_k и кавитатора d_n .

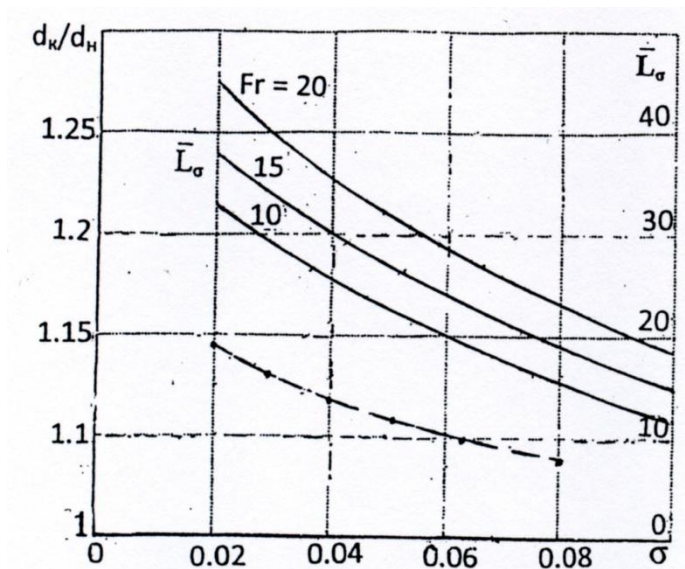


Рис. 1. Расчётные характеристики удлинений каверн, формируемых кольцевым крылом.

Из сравнения полученных результатов с известными данными [4] видно, что крыло вносит существенные изменения в характеристики реализуемых течений. В частности, удлинения каверн, формируемых с использованием крыла при сопоставимых расчётных условиях, превосходят результаты, представленные в указанной работе при числе Фруда $Fr > 20$, в несколько раз.

Теоретические исследования можно дополнить экспериментальными данными, проведенными нами на вертикальном гидростенде и оборудовании Московского комплекса ЦАГИ на моделях с удлинениями 8...15, частично представленными в [6]. Исследования проводились по методике ЦАГИ [3] при различных числах Фруда и искусственном поддуве газа (воздуха) в формируемую каверну. В частности, определялись следующие параметры, характеризующие кавитационное обтекание моделей: величина сопротивления моделей и расхода газа на вентиляцию (поддув) каверны при соответствующих числах Фруда, числа кавитации. Эти параметры определялись по формулам:

$C_Q = Q \cdot RTV_\sigma / 2p_\sigma d_n$ - коэффициент расхода газа на формирование (поддув) каверны;

$Fr = V_\sigma^2 / g d_n$ - число Фруда;

X – величина сопротивления (усилие на тензовесах с учётом тарировки).

В представленных соотношениях принято: Q^* – секундный весовой расход газа на поддув каверны; R и T – удельная газовая постоянная воздуха и его температура соответственно; V_o – скорость потока в рабочей части стенда на уровне кавитатора; d_n – диаметр кавитатора (диска); Измерение числа кавитации в формируемой каверне определялось путём замеров давлений: p_o – в сечении по задней кромке крыла; p_σ – щупом по всей длине каверны и вычислялось по формуле

$$\sigma_o = 2(p_o - p_\sigma) / \rho V_o^2.$$

Заметим, что измерение сопротивления моделей, в силу их малого масштаба, носило исключительно сравнительный характер по отношению к эталону и данным из работы [3].

На рисунках 2...5 показаны в качестве примеров характер обтекания некоторых моделей тел в нисходящем потоке реальной жидкости.

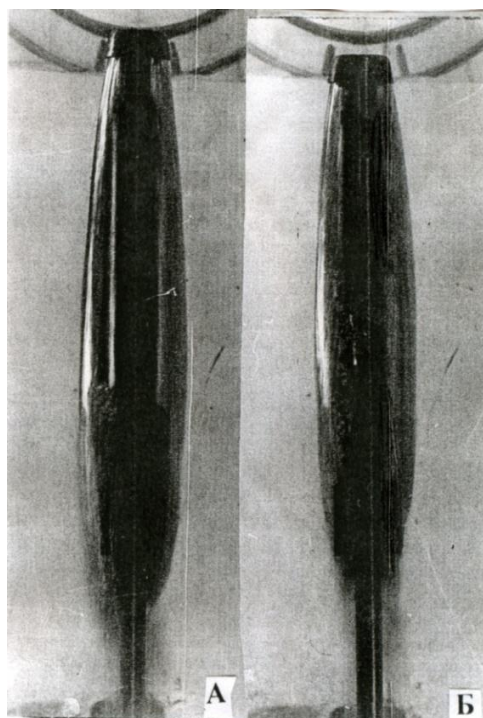


Рис.2. Каверны, формируемые на модели с удлинением $\bar{L} = 10$ при различной относительной величине поддуваемого в каверну газа: А – при $C_Q = 0,08$; Б - при $C_Q = 0,13$.

В процессе проведенных экспериментов были получены удлинения вертикальных каверн более $\bar{L}_c > 20$, в том числе в заданных сечениях корпуса моделей (см. рисунок 3 и 4).

На рисунке 5 показана картина кавитационного обтекания модели при углах атаки, Величина поддува везде сохранялась постоянной при $C_Q = 0,045$. Здесь хорошо виден образующийся

замыв на корпусе и характерная кормовая область каверны без её разрушения. Полученные данные позволяют наметить условия управления каверной без возможных замывов корпуса.

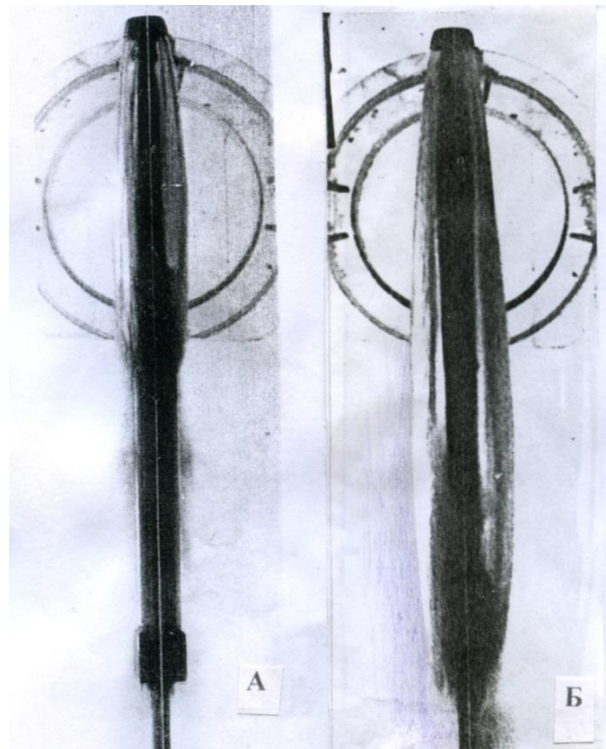


Рис.3. Вертикальные каверны, формируемые на модели большого удлинения ($\bar{L} = 18$):
А – при $C_D = 0,03$; Б – при $C_D = 0,13$.

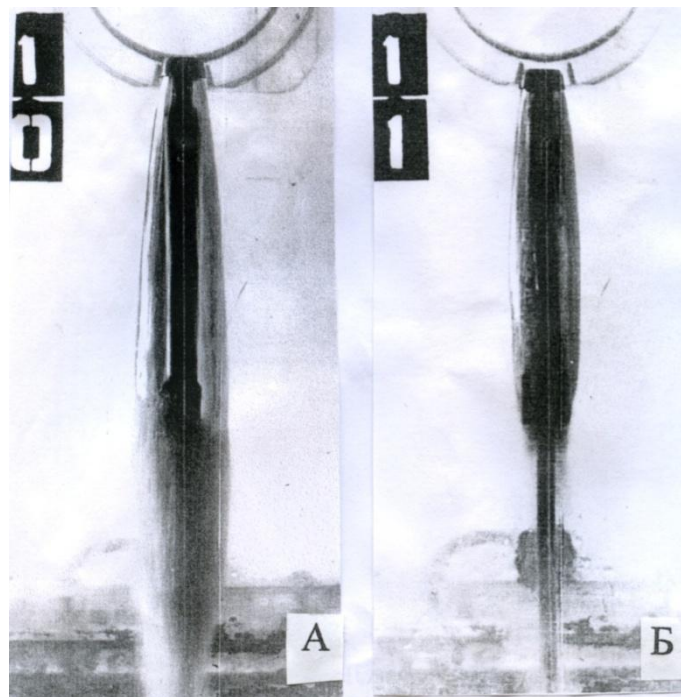


Рис.4. Схемы каверн с различным удлинением: А – удлинение $\bar{L}_\sigma > 20$; Б – $\bar{L}_\sigma = 10$.

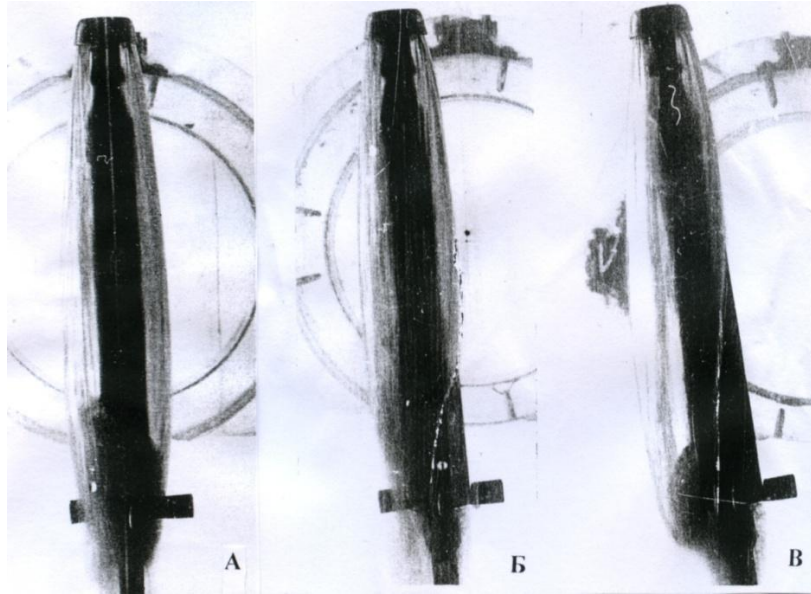


Рис.5. Характер кавитационного обтекания модели с удлинением $\bar{L} = 10$ при углах атаки:

А – при $\alpha = 0.5^\circ$; Б – при $\alpha = 2.5^\circ$; В – при $\alpha = 6^\circ$.

На рисунке 6 приведена обобщённая зависимость параметров удлинений каверн, формируемых кольцевым крылом по методу [6], полученные экспериментально при различных числах кавитации в вертикальном потоке реальной жидкости. Для сравнения на графике нанесена штрих-линией аналогичная известная зависимость, полученная при сопоставимых условиях проведения экспериментов [5,7].

Из приведенных материалов следует, что использование кольцевого крыла с соответствующими параметрами позволяет обеспечить кавитационное обтекание «всплывающих» тел большого удлинения в вертикальном потоке жидкости.

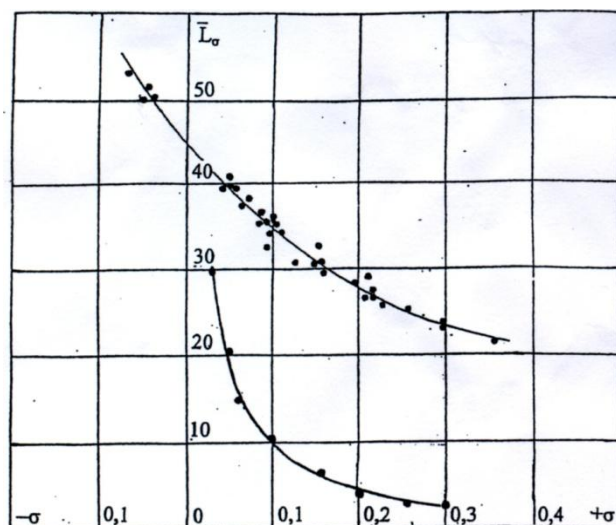


Рис.6. Экспериментальные зависимости ($\bar{L}_\sigma = f(\sigma)$)

В работе [8] рассмотрена теоретическая задача о кормовой расширяющейся каверне, возникающей при работе ракетного двигателя стартующей из-под воды баллистической ракеты. Подобная задача для осесимметричного течения рассматривалась авторами в работе [6], где также было показано, что использование кольцевого крыла, размещаемого в области кормового среза тела, позволяет сформировать кормовую каверну с отрицательным числом кавитации, т.е. с давлением в каверне превышающим давление в окружающей среде. При этом каверна имеет обратную кривизну её сходящихся к оси границ, и они не выступают за пределы миделя тела. А это приводит, в свою очередь, к снижению сопротивления тела при сохранении силы плавучести комбинации «тело – каверна».

Выводы.

Использование кольцевого крыла как эффективного конструктивного элемента в составе каверноформирующей системы позволяет формировать кавитационное обтекание «всплывающих» тел большого удлинения и, следовательно, существенно уменьшить величину его сопротивления при движении. Использование кольцевого крыла, размещаемого в области кормового среза, может существенно упорядочить форму донной каверны при струйном истечении газа.

Библиографический список.

1. Дегтярь В.Г., Пегов В.И. Гидродинамика подводного старта ракет. – М.: Машиностроение, 2009.
2. Burgdorf O. Hydrodynamics of Unsteady Underwater – Launcher Missiles with Trailing Cavities and Cross Flow Drag. // AIAA № 87-1319.
3. Гульнев С.И., Капанкин Е.Н., Об особенностях кавитационного обтекания тел вертикальным потоком.// Учёные записки ЦАГИ, т. VI, №2, 1975, с.56-62.
4. Гузевский Л.Г., Зуйкова В.И. Кавитационные течения в продольном поле сил тяжести.// Пристенные течения со свободными поверхностями.- Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1980, с.18-30.
5. Парышев Э.В. Пульсации вертикальных каверн в тяжёлой жидкости.// Учёные записки ЦАГИ, т. XII, №3, 1981, с.1-9.
6. Махров В.П. Гидродинамика кавитационных течений, формируемых внешними гидродинамическими особенностями.- М.: Изд-во МАИ, 2011.-160с.
7. Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация – М.: Мир, 1974.
8. Chou Y.S. Axisymmetric cavity flows past slender bodies of revolution //J. of Hydronaut. v.8, №1, 1974, pp 13-18.

Сведения об авторах

Горбатенко Станислав Алексеевич, профессор кафедры «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.; тел.: +7(499)158-48-53, e-mail: k604@mai.ru

Махров Владислав Петрович, профессор кафедры «Проектирование аэрогидрокосмических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.; тел.: +7(499)158-46-76; e-mail: k608@mai.ru

Юрьев Александр Иванович, начальник СКБ «Океан» при кафедре «Проектирование аэрогидрокосмических систем» Московского авиационного института (национального исследовательского университета); тел.: +7(499)158-46-76; e-mail: k608@mai.ru