

УДК 531.3, 532.1

DOI 10.17223/19988621/71/7

А.Н. Ищенко, В.В. Буркин, А.С. Дьячковский, А.В. Чупашев**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ИНЕРТНЫХ КОНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ВОДЕ¹**

Рассматривается высокоскоростное подводное движение осесимметричной инертной конической модели в суперкавитационном режиме обтекания. Получены экспериментальные данные изменения скорости моделей в зависимости от пути в воде, на основе этих данных апробирована расчетная методика определения скорости модели. Проведено сравнение экспериментальных контуров суперкаверн с расчетными, полученными с использованием известной методики расчета, и определены условия реализации движения в режиме суперкавитации. С использованием этих условий проведен расчет дальности суперкавитирующего движения при заданных начальной скорости, глубине залегания траектории и параметрах модели.

Ключевые слова: суперкавитация, высокоскоростное движение в воде, кавитатор, глубина, гидробаллистическая трасса

Сила сопротивления, возникающая при сплошном обтекании тела водой, является основным сдерживающим фактором при применении средств подводного метания. Однако возможно создать условия, при которых сплошность водной среды нарушается и за носовой частью модели формируется сильно разреженная газопаровая полость – каверна [1], существенно уменьшающая поверхность взаимодействия с водой, что позволяет повысить дальность движения модели. Если образовавшаяся полость превышает размеры модели, то ее называют суперкаверной, а само явление – суперкавитацией. Носовая часть модели (может иметь плоскую, круглую, коническую и пр. формы) называется кавитатором, от кромки которого происходит формирование свободных границ вокруг модели.

Как показывают экспериментальные фотографии, при устойчивом движении модели в режиме суперкавитации модель может кормовой частью кратковременно касаться внутренней поверхности суперкаверны, незначительно погружаясь в воду, т.е. наблюдается глиссирование [2]. При целенаправленном проектировании корпуса модели с учетом формы образуемой суперкаверны возможен отказ от других известных способов стабилизации (вращение, хвостовое оперение), так как помимо снижения тормозящего воздействия, внутренняя поверхность суперкаверны, по которой глиссирует корпус модели, ограничивает ее пространственный угол атаки, что является важным стабилизирующим фактором [3].

Движение высокоскоростных инертных тел в воде является важным направлением исследований научных коллективов различных стран [4–7] вследствие широкого круга возможных применений в промышленной и исследовательской деятельности.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00233).

В данной работе рассматривается движение моделей в воде на высокой скорости (порядка сотен метров в секунду), которую они получают после разгона в стволе баллистической установки. Модели имеют большую собственную массу и должны обладать исключительной прочностью. Модели из стали относительно просты в изготовлении и имеют низкую себестоимость исходного материала, что делает их предпочтительными с точки зрения экономической целесообразности применения. Модели из сплава ВНЖ сложнее в изготовлении и имеют на порядки большую стоимость материала. Однако масса и кинетическая энергия такой модели аналогичной формы будет в два с лишним раза больше стальной при одинаковой начальной скорости. Следовательно, модели из ВНЖ должны проходить в воде более длинные дистанции.

Цель работы заключается в определении перспективной дальности суперкавитирующего движения инертных осесимметричных конических моделей разных масс в воде при различных глубинах залегания траектории.

Движение конической модели в суперкавитационном режиме обтекания

В зависимости от параметров среды и условий движения, форма образуемой суперкаверны может меняться, что осложняет проектирование универсальных моделей, способных двигаться под водой в режиме суперкавитации. Основным критерием подобия кавитационных течений является число кавитации

$$\sigma = \frac{2\Delta p}{\rho V^2}, \quad (1)$$

где V – скорость модели; ρ – плотность воды; Δp – разница между давлением в невозмущенной среде (p_∞) и давлением внутри каверны (p_c). Число кавитации можно рассматривать как отношение между энергией, способствующей сжатию каверны, и энергией, идущей на ее расширение. Среда внутри каверны сильно разрежена и давление в ней обычно близко к давлению насыщенного водяного пара [1, 8] (при н.у. $p_c = 2336.8$ Па). В невозмущенной толще воды давление p_∞ принимается равным гидростатическому давлению на глубине залегания траектории:

$$p_\infty = p_{\text{атм}} + \rho gh,$$

где $p_{\text{атм}}$ – давление на поверхности воды; g – ускорение свободного падения; h – высота столба жидкости. Чем меньше величина числа кавитации, тем кавитация считается более развитой.

Для того чтобы суперкавитационный режим движения модели в воде реализовался и сохранялся, требуется поддерживать условия, при которых число кавитации σ не превышает некоторой величины σ_{max} , при достижении которой контур каверны уменьшится и станет меньше размеров модели. На рис. 1 приведены примеры, соотносящие картину течения вокруг модели с различным числом кавитации: a – сплошное обтекание модели водой при $\sigma \geq 1$; b – пограничное состояние: контур каверны касается кормы модели при $\sigma = \sigma_{\text{max}}$ ($\sigma_{\text{max}} < 1$); c – суперкавитационный режим обтекания модели при $\sigma \ll 1$.

Таким образом, для определения дальности движения модели в воде в режиме суперкавитации необходимо определить длину пути, на протяжении которого условие $\sigma < \sigma_{\text{max}}$ будет сохраняться на заданной глубине залегания траектории.

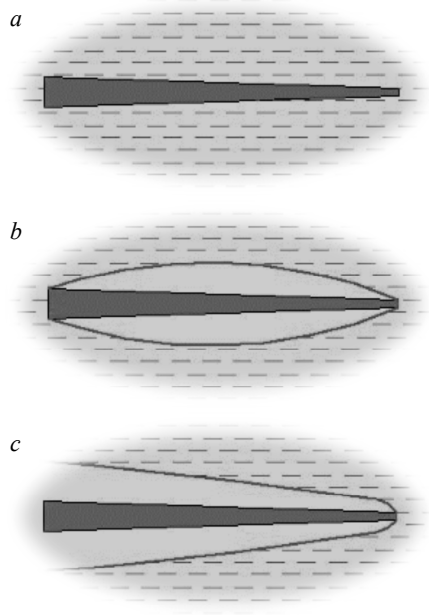


Рис. 1. Иллюстрации, поясняющие соответствие характера течения вокруг модели с числом кавитации: $a - \sigma \geq 1$; $b - \sigma = \sigma_{\max}$; $c - \sigma \ll 1$

Fig. 1. Visual representation of a correspondence between flow regime around a model and cavitation number: (a) $\sigma \geq 1$; (b) $\sigma = \sigma_{\max}$; and (c) $\sigma \ll 1$

Описание экспериментальной части работы

В ходе экспериментальных работ, проводимых на гидробаллистической трассе НИИ ПММ ТГУ [9], исследовалось движение в воде различных типов инертных суперкавитирующих моделей. Протяженность водной части траектории гидробаллистической трассы составляла 12 м. Метание модели производилось из гладкоствольной лабораторной баллистической установки в составе сборки, компоненты которой успевают отделиться на воздушном участке траектории перед входом модели в воду [10]. С применением математической модели и численной методики расчета внутрикамерных процессов [11] производился подбор состава и количества пороха метательного заряда. Расчет условий заряжания позволил провести метание моделей разных масс с начальными скоростями в диапазоне 300–1600 м/с.

В каждом опыте производилось измерение внутрибаллистических и внешне-траекторных параметров выстрела, включая дульную (начальную) скорость модели и ее пространственное положение на определенных участках траектории. Производилась высокоскоростная видеорегистрация быстропротекающих процессов и явлений, сопровождающих движение моделей в воде, по видеоматериалам определялась скорость движения моделей в воде и форма образуемых суперкаверн. Перед метанием производилось фотографирование, взвешивание модели, измерение ее геометрических размеров (длина, диаметр основания (кормы) и кавитатора) и нанесение масштабных маркеров.

На рис. 2 приведена фотография характерной модели, подготовленной к выстрелу, с частью пластикового ведущего устройства (а), а также последовательность фотографий (b), иллюстрирующая характерную картину движения этой модели в воде при суперкавитационном режиме обтекания ($\sigma = 5.38 \cdot 10^{-4}$).

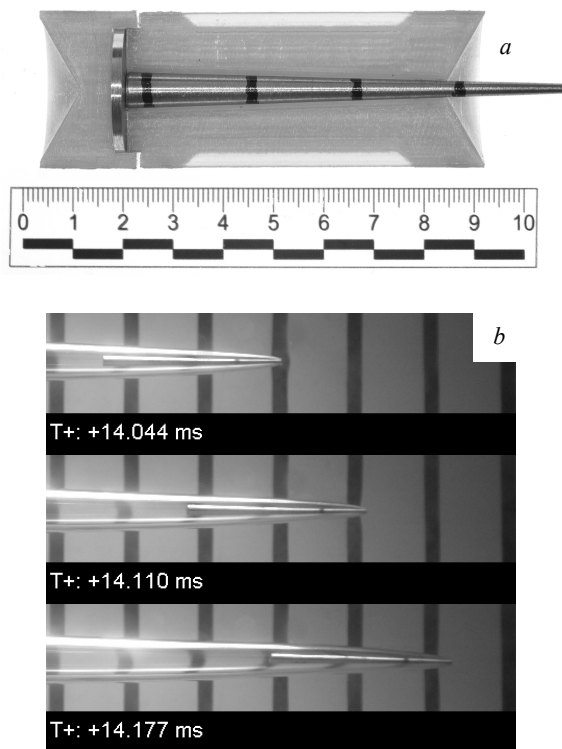


Рис. 2. Фотографии модели до выстрела в составе метаемой сборки (а) и движущейся в режиме суперкавитационного обтекания в воде при $\sigma = 5.38 \cdot 10^{-4}$ (b)

Fig. 2. Pictures of the model (а) as a part of the projectile assembly before firing and (b) when moving in a supercavitating flow regime in water at $\sigma = 5.38 \cdot 10^{-4}$

Определение условий реализации движения модели в режиме суперкавитации

При рассмотрении движения модели в режиме суперкавитационного обтекания, наибольший интерес представляет начальная часть каверны, ограниченная длиной корпуса самой модели. В общедоступной литературе существуют различные по сложности реализации и особенностям применения методики [1, 12–14], позволяющие построить профиль суперкаверны в зависимости от условий среды, параметров движения модели и радиуса ее кавитатора.

В данной работе полагается, что водная среда неподвижна, а движение модели осуществляется прямолинейно и параллельно горизонтальной оси, т.е. $\Delta p = \text{const}$.

В таком случае суперкаверну вокруг модели можно считать стационарной и осесимметричной относительно продольной оси и для построения ее приближенного контура можно воспользоваться полуэмпирической аппроксимацией [15]:

$$\bar{R}^2 = 3.659 + 0.847(\bar{x} - 2) - 0.236\sigma(\bar{x} - 2)^2, \quad \bar{x} \geq 2, \tag{2}$$

где $\bar{R} = R_c / R_n$; $\bar{x} = x / R_n$; R_c – радиус каверны в точке x ; R_n – радиус кавитатора; x – координата сечения каверны ($x = 0$ – положение кавитатора, $x = l$ – координата положения основания модели).

Так как самая широкая часть конической модели находится в ее основании, рассмотрим приведенные на рис. 3, а зависимости величины $\bar{R}$ в точке $x = l$ от числа кавитации σ для случаев: 1 – $R_n = 0.5$ мм; 2 – $R_n = 1.0$ мм; 3 – $R_n = 1.5$ мм. Символами на рисунке обозначены экспериментальные данные.

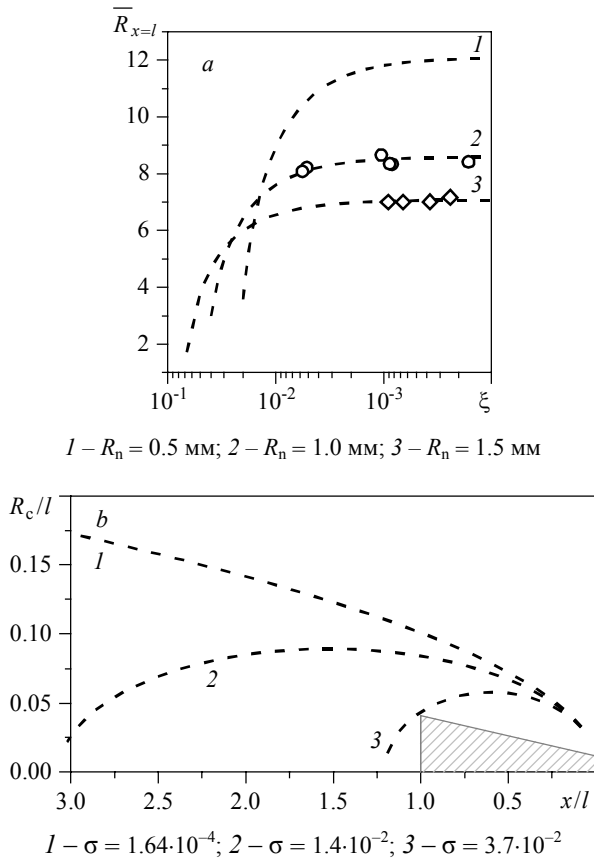


Рис. 3. Графики, иллюстрирующие: а – зависимость размера профиля суперкаверны в хвостовой части модели от числа кавитации при различных радиусах кавитатора R_n ; б – профиль суперкаверны для $R_n = 1.0$ мм при различных числах кавитации

Fig. 3. Graphs illustrating: (a) a profile size of a supercavern in the tail part of the model as a function of the cavitation number at different cavitator radius R_n ; (b) a profile of the supercavern for $R_n = 1.0$ mm at different cavitation numbers

Характер приведенных зависимостей показывает, что при $\sigma \leq 1 \cdot 10^{-3}$ на размер профиля суперкаверны в основании модели основное воздействие оказывает радиус кавитатора R_n .

На рис. 3, б приведен профиль суперкаверны (согласно формуле (2)) для $R_n = 1.0$ мм при различных числах кавитации: $1 - \sigma = 1.64 \cdot 10^{-4}$; $2 - \sigma = 1.4 \cdot 10^{-2}$; $3 - \sigma = 3.7 \cdot 10^{-2}$.

Чтобы рассчитать дальность движения модели в режиме суперкавитации, требуется определить условия, при достижении которых движение в режиме суперкавитации прекратится. Максимальный радиус конусообразной модели достигается в ее хвостовой части. Обозначим минимально необходимый зазор между внутренней поверхностью суперкаверны и хвостовой частью модели (в точке $x = l$) как Δ , а радиус основания модели R_p . Тогда минимальный радиус суперкаверны в плоскости хвостовой части модели составит $R_p + \Delta$. Полагая в выражении (2) $R_c = R_p + \Delta$ и $x = l$, получим соотношение для $\sigma_{\max}$, при котором зазор между основанием конуса модели и внутренней поверхностью каверны будет равен Δ :

$$\sigma_{\max} = \frac{3.659 + 0.847(\bar{x} - 2) - \bar{R}^2}{0.236(\bar{x} - 2)^2}, \quad (3)$$

где $\bar{R} = (R_p + \Delta) / R_n$, $\bar{x} = l / R_n$.

Полагая в выражении (1) $\sigma = \sigma_{\max}$, а глубину $h = \text{const}$, получим выражение для минимального значения скорости модели ($V_{\min}$), при котором на данной глубине вокруг рассматриваемой модели реализуется суперкавитирующий режим обтекания:

$$V_{\min} = \sqrt{\frac{2(p_{\text{atm}} + \rho gh - p_c)}{\rho \sigma_{\max}}}. \quad (4)$$

Таким образом, определение горизонтальной дальности движения модели в воде в режиме суперкавитирующего обтекания сводится к определению расстояния, преодолев которое в воде скорость модели снизится от V_0 до $V_{\min}$.

Движение модели в условиях суперкавитационного обтекания

Предполагается, что при стабилизированном движении в режиме суперкавитации величина силы тормозящего воздействия на модель в результате трения, возникающего вследствие кратковременных касаний осесимметричным корпусом модели внутренней поверхности каверны, много меньше величины силы сопротивления, действующей на кавитатор модели. Тогда, с учетом малости пространственных углов атаки модели (они ограничены внутренней поверхностью суперкаверны), процесс ее движения в режиме суперкавитации будем рассматривать как движение плоского диска с радиусом R_n и массой m , обтекаемого с развитой кавитацией вдоль оси симметрии. В таком случае, выражение для силы сопротивления со стороны идеальной несжимаемой жидкости имеет вид

$$F_c = C_x \frac{\pi \rho R_n^2 V^2}{2},$$

где C_x – коэффициент сопротивления диска (при обтекании в нормаль к невозмущенному потоку и $\sigma \ll 1 - C_x \approx 0.82$ [1]). Подразумевается, что траектория движения модели прямолинейна и параллельна поверхности воды. В таком случае, уравнение ее движения можно привести к виду

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\pi \rho C_x R_n^2}{2m} V^2.$$

Решение данного уравнения относительно пути можно записать как

$$L = m \frac{2}{\pi \rho C_x R_n^2} \ln \frac{V_0}{V}, \quad (5)$$

где L – путь, за который скорость модели снизится от V_0 до V .

На рис. 4 приведен ряд экспериментальных (символы) и рассчитанных (линии) по формуле (5) графиков изменения скорости от перемещения в воде для моделей различных масс и конфигураций, движущихся в режиме суперкавитации.

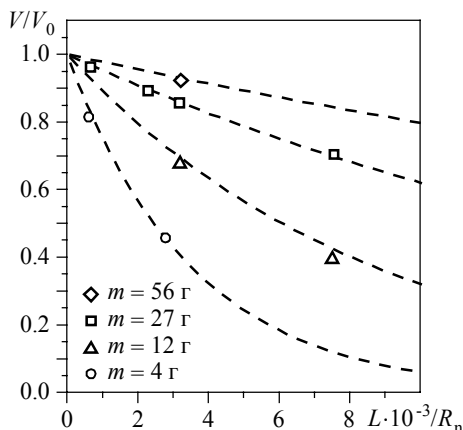


Рис. 4. Зависимость изменения скорости от пути в воде для различных моделей, движущихся в суперкавитационном режиме обтекания

Fig. 4. Velocity variation with distance in water for different models moving in a supercavitation flow regime

Сравнение, приведенное на рис. 4, демонстрирует хорошее согласование экспериментальных данных с расчетными значениями, что говорит о корректности принятых допущений и применимости методики в целом к данным типам моделей и условиям, реализованным в рамках гидробаллистической трассы. Учитывая малый размер исследуемых моделей, можно предполагать, что движение в лабораторных условиях гидробаллистического стенда не должно принципиально отличаться от движения во внешней среде. Тогда, полагая в (5) $V = V_{\min}$, можно определить время или путь, который преодолит модель в режиме суперкавитирующего обтекания.

Расчет перспективной дальности движения модели в условиях суперкавитационного обтекания

Исходя из условий применения, рассматриваемая коническая модель (рис. 1, а) имеет фиксированный максимальный радиус в основании $R_p = 3.5$ мм и длину $l = 85$ мм. Усекаемая носовая часть модели может иметь различный радиус R_n . Рассматривается горизонтальное движение данных моделей в воде в диапазоне глубин $h = 0.25\text{--}200$ м и начальных скоростей $V_0 \leq 1000$ м/с. Возможность движе-

ния таких моделей из стали ($m = 12$ г) и из сплава ВНЖ ($m = 27$ г) в рассматриваемом диапазоне скоростей ранее была показана экспериментально [16, 17].

На рис. 5 приведены графики, показывающие зависимость минимальной скорости $V_{\min}$, необходимой для обеспечения движения данной модели в режиме суперкавитации, от глубины залегания траектории h для случаев: 1 – $R_n = 1.0$ мм; 2 – $R_n = 0.75$ мм; 3 – $R_n = 0.5$ мм. Минимальный зазор между основанием модели и внутренней поверхностью каверны полагался $\Delta = 1$ мм.

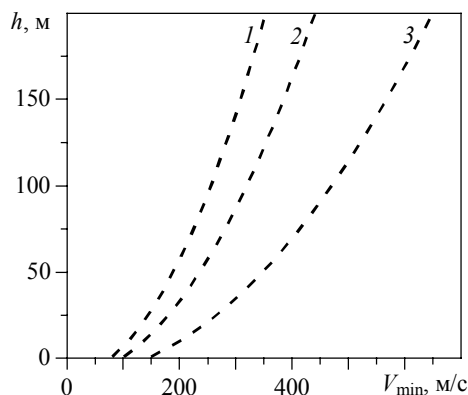


Рис. 5. Зависимость минимальной скорости, при которой сохраняется суперкавитационный режим обтекания, от глубины залегания траектории для модели с радиусом кавитатора: 1 – $R_n = 1.0$ мм; 2 – $R_n = 0.75$ мм; 3 – $R_n = 0.5$ мм

Fig. 5. Dependence of the minimum velocity, which provides a supercavitation flow regime, on the depth of a trajectory location for a model with a cavitator radius: $R_n = (1)$ 1.0; (2) 0.75; and (3) 0.5 mm

Из графика видно, что при суперкавитирующем режиме движения в воде, модель обладает значительным запасом скорости, следовательно, и кинетической энергии вплоть до самого конца движения в этом режиме. Например, для модели с радиусом кавитатора $R_n = 0.5$ мм на глубине $h = 0.25$ м минимальная скорость движения, необходимая для поддержания движения в режиме суперкавитации $V_{\min} = 150$ м/с, а на глубине $h = 200$ м – $V_{\min} = 650$ м/с.

Согласно выражению (5), путь (L), преодолеваемый моделью, пропорционален собственной массе (m). Поэтому, чтобы рассмотреть влияние глубины залегания траектории на дальность движения модели, на рис. 6 показаны расчетные зависимости дальности движения модели в режиме суперкавитации, отнесенной к массе модели (L/m) от начальной скорости (V_0) для различных глубин (h) залегания траектории: 1 – $h = 0.25$ м, 2 – $h = 10$ м, 3 – $h = 50$ м, 4 – $h = 200$ м. Расчеты производились для моделей с радиусами кавитаторов: а – $R_n = 1.0$ мм; б – $R_n = 0.75$ мм; с – $R_n = 0.5$ мм.

Из графиков следует, что при движении у поверхности воды ($h = 0.25$ м), уменьшение радиуса кавитатора в 2 раза (от $R_n = 1.0$ мм до $R_n = 0.5$ мм) приводит к приросту дальности движения модели во всем рассматриваемом диапазоне скоростей (в частности, при $V_0 = 1000$ м/с прирост дальности составит 3 раза). Однако при погружении на глубину $h = 200$ м прирост дальности движения, вызванный таким же уменьшением радиуса кавитатора, будет наблюдаться только при начальных скоростях (V_0) более 800 м/с (при $V_0 = 1000$ м/с прирост дальности составит 1.65 раза).

Расчет, приведенный на рис. 6, с показывает, что у поверхности воды ($h = 0.25$ м) при скорости старта $V_0 = 1000$ м/с модель с $R_n = 0.5$ мм из сплава ВНЖ ($m = 27$ г) в режиме суперкавитации преодолеет 162 м, из стали ($m = 12$ г) – 72 м. На глубине $h = 200$ м дальность движения моделей сократится и составит 36 и 16 м соответственно.

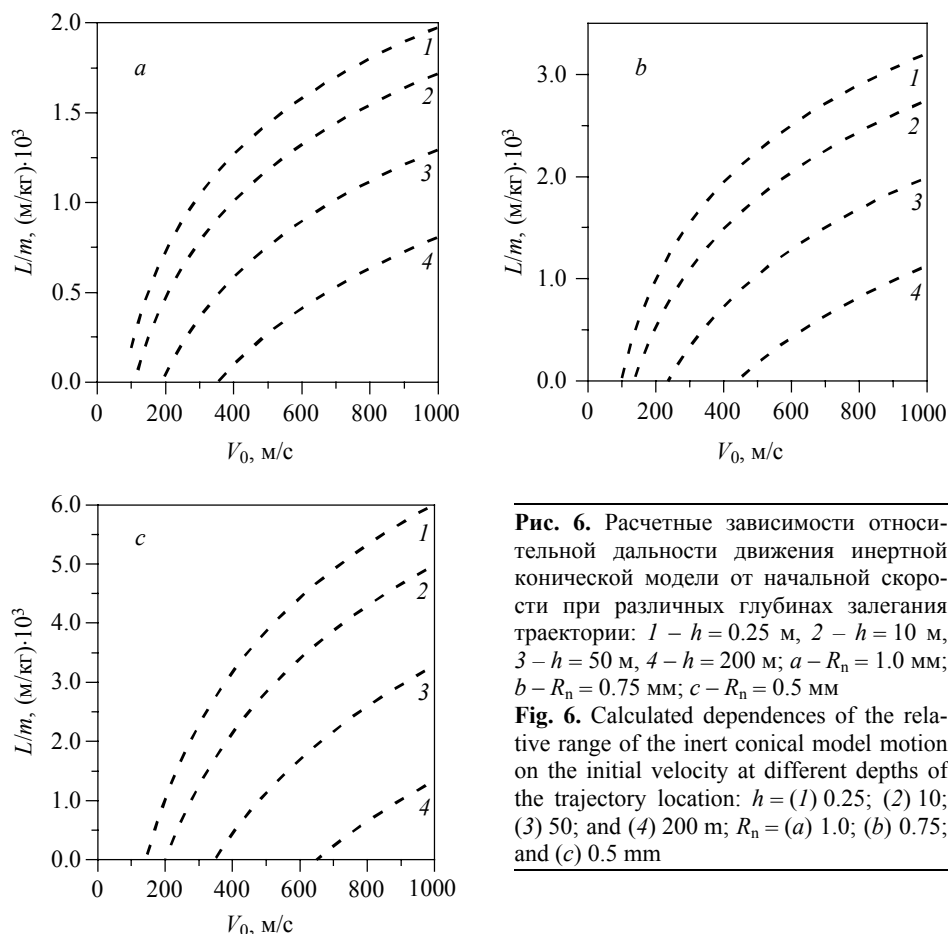


Рис. 6. Расчетные зависимости относительной дальности движения инертной конической модели от начальной скорости при различных глубинах залегания траектории: 1 – $h = 0.25$ м, 2 – $h = 10$ м, 3 – $h = 50$ м, 4 – $h = 200$ м; а – $R_n = 1.0$ мм; б – $R_n = 0.75$ мм; в – $R_n = 0.5$ мм

Fig. 6. Calculated dependences of the relative range of the inert conical model motion on the initial velocity at different depths of the trajectory location: $h = (1) 0.25$; (2) 10; (3) 50; and (4) 200 m; $R_n = (a) 1.0$; (b) 0.75; and (c) 0.5 mm

Для более точного определения параметров модели и условий старта, среди прочего следует учитывать прочность конструкции модели и механику ее глиссирования внутри суперкаверны, что выходит за рамки данной работы. Кроме того, более детальный расчет необходимо производить исходя из возможности конкретной метательной установки, потому что, как видно из расчетов (рис. 5, 6), для сохранения дальности движения модели при увеличении глубины залегания траектории требуется повышать массу и начальную скорость модели.

Заключение

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов, полученных в условиях гидробаллистического стенда, показывает, что движение модели в режиме суперкавитационного обтекания в первом приближении можно рассматривать как движение плоского диска, обладающего массой модели, обтекаемого с развитой кавитацией в нормаль к поверхности. Получены условия реализации суперкавитирующего движения конических инертных моделей в воде. Исходя из этого, был произведен расчет перспективной дальности горизонтального движения конических инертных моделей разных масс и радиусов кавитаторов в режиме суперкави-

тации под водой на глубинах до 200 м включительно. Установлено, что уменьшение радиуса кавитатора не всегда положительно сказывается на дальности движения инертной модели. При движении у поверхности воды ($h = 0.25$ м), уменьшение радиуса кавитатора в 2 раза (от $R_n = 1.0$ мм до $R_n = 0.5$ мм) приводит к приросту дальности движения модели во всем рассматриваемом диапазоне скоростей. Однако при увеличении глубины до $h = 200$ м прирост дальности движения, вызванный таким же уменьшением радиуса кавитатора рассматриваемой модели, будет наблюдаться только при начальных скоростях от 800 м/с и выше.

Получено, что у поверхности воды ($h = 0.25$ м) при скорости старта $V_0 = 1000$ м/с рассматриваемая модель с $R_n = 0.5$ мм из сплава ВНЖ ($m = 27$ г) в режиме суперкавитации преодолет 162 м, из стали ($m = 12$ г) – 72 м, а при $h = 200$ м дальность движения моделей сократится до 36 и 16 м соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логвинович Г.В. Некоторые вопросы глиссирования и кавитации // Труды ЦАГИ. 1980. № 2052. С. 250–270.
2. Ищенко А.Н., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А. и др. Исследование высокоскоростного движения суперкавитирующих тел в воде и их взаимодействия с подводными преградами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 4. С. 8–14.
3. Савченко Г.Ю., Савченко Ю.Н. Глиссирование цилиндра в суперкаверне // Прикладная гидромеханика. 2013. Т. 15. № 3. С. 79–84.
4. Yang D., Xiong Y. and Guo X. Drag reduction of a rapid vehicle in supercavitating flow International // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2017. V. 9. No. 1. P. 5–44.
5. Guo Z., Zhang W., Xiao X., Wei G. and Ren P. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes // International Journal of Impact Engineering. 2012. V. 49. P. 43–60.
6. Ahn S.S. An integrated approach to the design of supercavitating underwater vehicles: Ph.D Thesis. Georgia Institute of Technology, 2007.
7. Vlasenko Y. Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds // Proc. In Fifth Int. Symp. on Cavitation (Osaka, Japan) 2003. Cav03-GS-6-006.
8. Пирсол И. Кавитация: пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. М.: Мир, 1975. 95 с.
9. Буркин В.В., Акиншин Р.Н., Афанасьева С.А., Борисенков И.Л., Ищенко А.Н., Хабибуллин М.В., Чунашев А.В., Югов Н.Т. Особенности высокоскоростного проникания и движения суперкавитирующих кинетических ударников в воде // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 3. С. 701–708.
10. Буркин В.В., Ищенко А.Н., Майстренко И.В. и др. Гидробаллистический стенд. Патент на изобретение № 2683148 РФ, G01M 10/00 (2006.01), F41F 3/07 (2006.01). Опубл. 26.03.2019.
11. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 1999. 255 с.
12. Савченко Ю.Н., Власенко Ю.Д., Семененко В.Н. Экспериментальные исследования высокоскоростных кавитационных течений // Гидромеханика. 1998. № 72. С. 103–111.
13. Васин А.Д. Задачи гидродинамики и гидроупругости высокоскоростного движения в воде: диссертация. Государственный научно-исследовательский центр ЦАГИ, 1999. 282 с.
14. Шахтин А.А. Численный метод расчета суперкаверн // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. Т. 2. № 22. С. 105–109.
15. Савченко Ю.Н. Моделирование суперкавитационных процессов // Прикладная гидромеханика. 2000. Т. 2. № 3. С. 75–86.

16. Ischenko A.N., Burkin V.V., Diachkovskiy A.S., Chupashev A.V. Researching acceleration and deceleration processes of supercavitating strikers under the conditions of hydroballistic track // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1709. P. 012014-1–012014-9. DOI: 10.1088/1742-6596/1709/1/012014.
17. Ищенко А.Н., Буркин В.В., Дьячковский А.С., Майстренко И.В., Рogaев К.С., Саммель А.Ю., Чупашев А.В. Одиночное и совместное движение суперкавитирующих ударников в сверхзвуковом режиме в воде // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 23. С. 22–24.

Статья поступила 25.03.2021

Ishchenko A.N., Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Chupashev A.V. (2021) INVESTIGATION OF UNDERWATER MOTION PARAMETERS FOR INERT CONICAL MODELS. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 71. pp. 78–89

DOI 10.17223/19988621/71/7

Keywords: supercavitation, high-speed underwater motion, cavitator, depth, hydroballistic track.

This paper considers high-speed underwater motion of an axisymmetric inert conical model in a supercavitation flow regime. Experimental data on the model velocity variation with distance in water are obtained. Based on these data, a computational method, which is developed to determine the model velocity, is validated. A comparison of the calculated and experimental results obtained in a hydroballistic track shows that, in the first approximation, the motion of the model in a supercavitating flow regime can be considered as the motion of a flat disk having a mass and being streamed around at the developed cavitation directed normally to the surface. Experimental contours of supercaverns are compared with those calculated using the known computational methodology. The conditions ensuring supercavitation motion of the inert conical models in water are determined. As a result, the extended range of the horizontal motion is calculated for the inert conical models moving in a supercavitation regime under water at a depth up to 200 m at given initial velocity, depth of the trajectory location, and model parameters. It is found that reducing of a cavitator radius does not always have a positive effect on the range of the inert model motion.

Financial support. The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-19-00233).

Aleksandr N. ISHCENKO (Doctor of Physics and Mathematics, Director, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Viktor V. BURKIN (Candidate of Physics and Mathematics, Head of 71 Department, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: v.v.burkin@mail.ru

Aleksey S. D'YACHKOVSKIY (Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lex_okha@mail.ru

Andrey V. CHUPASHEV (Junior Researcher, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: chupashevav@gmail.com

REFERENCES

1. Logvinovich G.V. (1980) Nekotorye voprosy glissirovaniya i kavitatsii [Some issues of planing and cavitation]. *Trudy TSAGI*. 2052. pp. 250–270.
2. Ishchenko A.N., Akinshin R.N., Afanas'eva S.A., Borisenkov I.L., Burkin V.V., D'yachkovskiy A.S., Monakhov R.Yu., Rodionov A.A., Khabibullin M.V. (2015) Issledovanie vysokoskorostnogo dvizheniya superkavitiruyushchikh tel v vode i ikh vzaimodeystviya s podvodnymi pregradami [Research on high-speed motion of supercavitating bodies in water and their interaction with underwater barriers]. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika – Fundamental and Applied Hydrophysics*. 8(4). pp. 8–14.
3. Savchenko G.Yu., Savchenko Yu.N. (2013) Glissirovanie tsilindra v superkaverne [Planing of a cylinder in a supercavern]. *Prikladna gidromekhanika – Applied Hydromechanics*. 15(3). pp. 79–84.
4. Yang D., Xiong Y., Guo X. (2017) Drag reduction of a rapid vehicle in supercavitating flow. *International Journal Naval Architecture Ocean Engineering*. 9(1). pp. 35–44. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2016.07.003.
5. Guo Z., Zhang W., Xiao X., Wei G., Ren P. (2012) An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes. *International Journal Impact Engineering*. 49. pp. 43–60. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.04.004.
6. Ahn S.S. (2007) *An Integrated Approach to the Design of Supercavitating Underwater Vehicles*. Dissertation. Georgia: Institute of Technology.
7. Vlasenko V. (2003) Experimental investigation of supercavitation flow regimes at subsonic and transonic speeds. *Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation. Osaka, Japan*.
8. Piersol I. (1975) *Kavitatsiya* [Cavitation]. Moscow: Mir.
9. Burkin V.V., Akinshin R.N., Afanas'eva S.A., Borisenkov I.L., Ishchenko A.N., Khabibullin M.V., Chupashev A.V., Yugov N.T. (2018) Features of high-velocity penetration and motion of supercavitating kinetic strikers in water. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 91(3). pp. 655–662. DOI: 10.1007/s10891-018-1787-y.
10. Burkin V.V., Ishchenko A.N., Maystrenko I.V., Fufachev V.M., D'yachkovskiy A.S., Burakov V.A., Korol'kov L.V., Stepanov E.Yu., Chupashev A.V., Rogaev K.S., Sammel' A.Yu., Sidorov. A.D. (2019) *Gidrobballisticheskiy stend* [A hydroballistic stand]. RF Patent № 2683148.
11. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematical simulation of intraballistic processes in barrel systems]. Novosibirsk: SB RAS Publishing House.
12. Savchenko Yu.N., Vlasenko Yu.D., Semenenko V.N. (1998) Eksperimental'nye issledovaniya vysokoskorostnykh kavitatsionnykh techeniy [Experimental studies of high-speed cavitation flows]. *Gidromekhanika*. 72. pp. 103–111.
13. Vasin A.D. (1999) *Zadachi gidrodinamiki i gidrouprugosti vysokoskorostnogo dvizheniya v vode* [Problems of hydrodynamics and hydroelasticity of high-speed motion in water]. Dissertation. Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy tsentr TSAGI.
14. Shakhtin A.A. (2013) Chislennyy metod rascheta superkavern [Numerical analysis of supercavitation]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2(22). pp. 105–109.
15. Savchenko Yu.N. (2000) Modelirovanie superkavitatsionnykh protsessov [Modeling of supercavitation processes]. *Prikladnaya gidromekhanika – Applied Hydromechanics*. 2(3). pp. 75–86.
16. Ischenko A.N., Burkin V.V., Diachkovskiy A.S., Chupashev A.V. (2020) Researching acceleration and deceleration processes of supercavitating strikers under the conditions of hydroballistic track. *Journal of Physics: Conference Series*. 1709. Article 012014. pp. 1–9. DOI: 10.1088/1742-6596/1709/1/012014.
17. Ishchenko A.N., Burkin V.V., Diachkovskii A.S., Maystrenko I.V., Rogaev K.S., Sammel A.Yu., Chupashev A.V. (2020) Single and joint movement of supercavitating strikers in the supersonic mode in water. *Technical Physics Letters*. 46. pp. 1177–1179. DOI: 10.1134/S1063785020120081.

Received: March 25, 2021