

Владимир Семененко
Татьяна Семененко
Татьяна Клецкая

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

Разработан численный метод анализа произвольного пространственного движения подводного суперкавитирующего аппарата, управляемого с помощью гидродинамических рулей. Исследуется маневренность суперкавитирующих аппаратов по глубине и по курсу, а также проблемы оптимального расположения рулей и взаимного влияния рулей и каверны.

Розроблено чисельний метод аналізу довільного просторового руху підводного суперкавітуючого апарата, керованого за допомогою гідродинамічних рулів. Досліджується маневреність суперкавітуючих апаратів по глибині і за курсом, а також проблеми оптимального розміщення рулів і взаємного впливу рулів і каверни.

A numerical method of analysis of arbitrary 3D motion of a underwater supercavitating vehicle guided by the hydrodynamic cavity-piercing rudders (fins) has been developed. Both course and depth maneuvering the supercavitating vehicles and also problems on the optimal position of rudders and the mutual influence of rudders and cavity has been investigated.

Ключевые слова: суперкавитирующий аппарат, управляющие рули, пространственное маневрирование, компьютерное моделирование.

Введение. Суперкавитирующие аппараты (СКА), движущиеся под водой со скоростями порядка ста и более метров в секунду, являются перспективным средством морского транспорта. В настоящее время является актуальной проблема управления и маневренности СКА. В наших работах [1–4] дано описание аппроксимационной математической модели движения суперкавитирующих тел, основанной на принципе независимости расширения сечений нестационарной суперкаверны Г.В.Логвиновича [5, 6]. На основе этой математической модели нами разработана методика численного расчета и компьютерного моделирования произвольного трехмерного движения самодвижущихся управляемых СКА. В работах [1, 2] исследованы частные случаи движения СКА – продольное и боковое движения, рассмотрены задачи об устойчивости и стабилизации продольного движения и о маневренности СКА по курсу. При этом рассматривалось управление движением СКА путем наклона кавитатора (δ -управление) и путем отклонения вектора тяги движителя (η -управление).

© Семененко В. Н., Семененко Т. Н., Клецкая Т. С., 2013

В данной статье приводятся результаты дальнейшего анализа маневренности самодвижущихся СКА (см. рис. 1), управляемых с помощью гидродинамических рулей, выступающих из каверны в воду (f -управление).

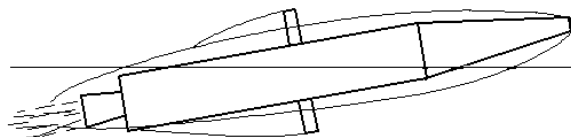


Рис. 1. Схема самодвижущегося управляемого СКА

1. Расчетная модель. Основные параметры расчетной модели СКА и начальные параметры движения представлены в таблицах 1 и 2. В таблицах обозначено: L – длина аппарата; D_b – наибольший диаметр корпуса; D_n – диаметр кавитатора; m – масса аппарата; $\bar{x}_c = x_c/L$ – расстояние от кавитатора до центра масс аппарата; $I_z = I_v$ и I_x – моменты инерции соответственно относительно осей связанной системы координат Oz_1 , Oy_1 и Ox_1 ; V_0 – начальная скорость; H_0 – начальная глубина; σ – число кавитации; $Fr = V_0/\sqrt{gD_n}$ – число Фруда; F_x – гидродинамическое сопротивление; L_c – длина каверны. Эскиз расчетной модели показан на рис. 2.

Таблица 1. Основные параметры расчетной модели

L , м	D_b , мм	D_n , мм	m , кг	\bar{x}_c	I_z , кг · м ²	I_x , кг · м ²
5,00	340,0	70,0	600,0	0,600	900	8,0

Таблица 2. Начальные параметры движения расчетной модели

V_0 , м/с	H_0 , м	σ	Fr	F_x , кН	L_c , м
120	5	0,02	144,8	23,05	6,55

При расчете динамики модели СКА предполагается, что при $t < 0$ она движется горизонтально на глубине H_0 с постоянной скоростью V_0 под действием постоянной силы тяги движителя F_{pr} в режиме естественной или искусственной суперкавитации. При $t \geq 0$ осуществляется управление движением СКА путем δ -управления, η -управления и/или f -управления.

Большую часть времени СКА должен двигаться, глиссируя своей хвостовой частью по нижней стенке каверны для компенсации веса аппарата. При этом СКА должен быть сбалансирован, т.е. сумма всех действующих сил, а также сумма их моментов относительно центра масс должны равняться нулю. Отсюда находятся равновесные значения угла тангажа ψ^* , угла наклона кавитатора δ_z^* и угла отклонения вектора тяги η_z^* (см. [3]). В табл. 3 приведены равновесные значения углов ψ и δ_z , рассчитанные при $\eta_z = 0$ для ряда положений центра масс \bar{x}_c .

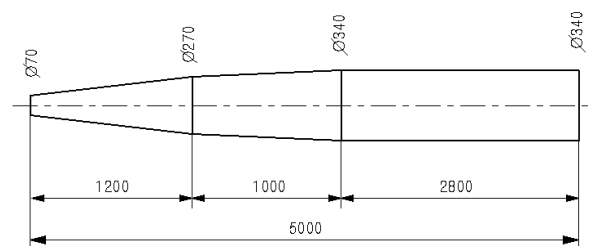


Рис.2. Расчетная модель СКА

Таблица 3. Равновесные значения углов ψ и δ_z в градусах

\bar{x}_c	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
ψ^*	0,3956	0,3807	0,3659	0,3515	0,3371
δ_z^*	-10,290	-8,765	-7,264	-5,782	-4,289

Прямолинейное движение сбалансированного СКА является неустойчивым. Как показано в [1], СКА обладают собственными частотами угловых колебаний, которые нелинейным образом зависят от положения центра масс \bar{x}_c . В этом случае δ -управление и/или η -управление могут обеспечить автоматическую стабилизацию движения СКА “в среднем” и его маневрирование по глубине.

Эффективность маневрирования СКА по глубине и по курсу характеризуется углами траектории $\vartheta = \psi - \alpha$, $\chi = \varphi - \beta$ (где φ – угол рыскания; α – угол атаки; β – угол скольжения) и скоростями их изменения:

$$\dot{\vartheta} = V(s) \frac{d\vartheta}{ds}, \quad \dot{\chi} = V(s) \frac{d\chi}{ds}, \quad (1)$$

где s – дуговая координата вдоль траектории центра масс СКА, а также величиной радиусов циркуляции $R_{tz} = ds / d\vartheta$, $R_{ty} = ds / d\chi$.

2. Модельный подход. Рассмотрим сначала в упрощенной постановке эффект действия гидродинамических рулей при маневрировании СКА отдельно по глубине и по курсу, используя математические модели продольного и бокового движения [1, 2]. Для маневрирования по глубине в продольном движении служит пара симметричных горизонтальных рулей, создающая подъемную силу F_{fy} (см. рис. 3, а). Для маневрирования по курсу в боковом движении служит пара симметричных вертикальных рулей, создающая боковую силу F_{fz} (см. рис. 3, б).

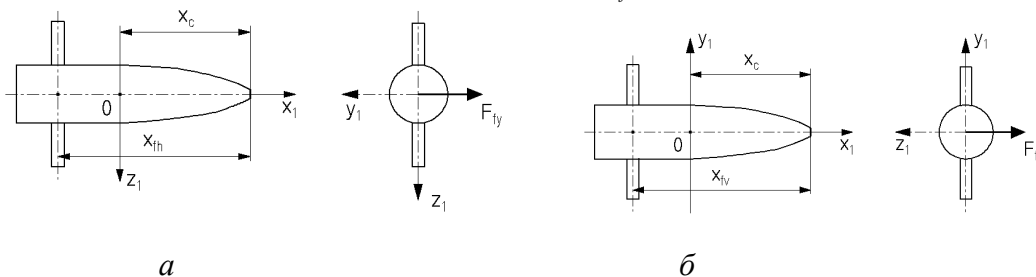


Рис. 3. Схема расположения горизонтальных (а) и вертикальных (б) рулей на корпусе СКА

Используем понятие эффективности рулей e_f [7], с помощью которого определяется величина боковых сил, создаваемых рулями, относительно сил, возникающих при отклонении на тот же угол дискового кавитатора:

$$F_{fy} = \frac{\rho V^2}{2} S_n e_f c_n \alpha_{fh}, \quad F_{fz} = \frac{\rho V^2}{2} S_n e_f c_n \alpha_{fv}, \quad (2)$$

где $S_n = \pi D_n^2 / 4$ – площадь кавитатора; $c_n = 0,82(1 + \sigma)$ – коэффициент сопротивления дискового кавитатора; α_{fh} и α_{fv} – эффективные углы атаки горизонтальных и вертикальных рулей. Тогда работу каждой пары рулей можно задать тремя параметрами: e_f , δ_{fh} или δ_{fv} – угол поворота рулей относительно продольной плоскости аппарата, x_{fh} или x_{fv} – расстояние от кавитатора до точки приложения боковой силы, создаваемой рулями. Эффективные углы атаки горизонтальных и вертикальных рулей вычисляются по формулам:

$$\alpha_{fh} = \alpha + \delta_{fh} - \frac{V_y}{V} + \frac{\omega_z(x_{fh} - x_c)}{V}, \quad (3)$$

$$\alpha_{fv} = -\beta - \delta_{fv} - \frac{V_z}{V} - \frac{\omega_y(x_{fv} - x_c)}{V}, \quad (4)$$

где ω_z , ω_y – угловые скорости аппарата относительно осей Oz_1 , Oy_1 связанной системы координат. Соответствующие моменты относительно центра масс:

$$M_{fz} = -F_{fy}(x_{fh} - x_c), \quad M_{fy} = F_{fz}(x_{fv} - x_c). \quad (5)$$

Сила сопротивления рулей F_{fx} при данном подходе не учитывается. В расчетах ниже принято $e_f = 0,5$.

Расчеты показали, что для бокового движения зависимость $\chi_m(s)$ практически линейна, т.е. $\dot{\chi}_m = const$. На рис. 4, а показана зависимость угловой скорости поворота по курсу $\dot{\chi}_m$ от угла поворота вертикальных рулей δ_{fv} , рассчитанная для ряда положений рулей $\bar{x}_{fv} = x_{fv} / L$. Как видно, наиболее эффективным является расположение рулей в носовой части аппарата, где они работают подобно δ -управлению. Наименее эффективным является расположение рулей в корме, где они работают подобно η -управлению (см. [2]).

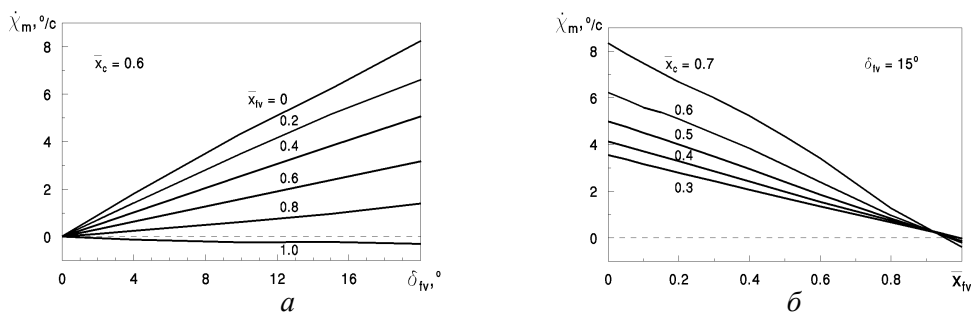


Рис. 4. Влияние угла поворота (а) и положения (б) вертикальных рулей на угловую скорость поворота СКА по курсу

На рис. 4, б приведены графики зависимости угловой скорости поворота по курсу $\dot{\chi}_m$ от положений вертикальных рулей \bar{x}_{fv} , рассчитанной при $\delta_{fv} = 15^\circ$ для ряда положений центра масс \bar{x}_c . Отсюда видно, что смещение центра масс в корму выгодно с точки зрения управляемости аппарата по курсу.

Интересно, что при любых значениях \bar{x}_c вблизи кормы существует «нейтральное» положение вертикальных рулей x_{fv}^* , для которого поворот рулей на любой угол δ_{fv} не приводит к повороту СКА. При переходе через значение x_{fv}^* изменяется направление поворота СКА. Это значит, что традиционное кормовое расположение рулей для СКА является неприемлемым.

В отличие от маневрирования по курсу, возможность маневрирования СКА по глубине ограничена из-за наличия свободной поверхности и из-за повышения с глубиной гидростатического давления, что является причиной уменьшения размеров каверны. В данной работе для простоты считается, что при изменении глубины движения $\sigma = const$.

Расчеты показали, что для продольного движения зависимость $\mathcal{G}_m(s)$ после короткого переходного участка также становится линейной, т.е. $\dot{\mathcal{G}}_m = const$. На рис. 5 показаны такие же зависимости, что на рис. 4, для случая маневрирования СКА по глубине. Как видно, графики для маневрирования по курсу и по глубине идентичны. Отличие этих случаев состоит в том, что при маневрировании по глубине в f -управление СКА определенный вклад вносит сила на наклоненном кавитаторе.

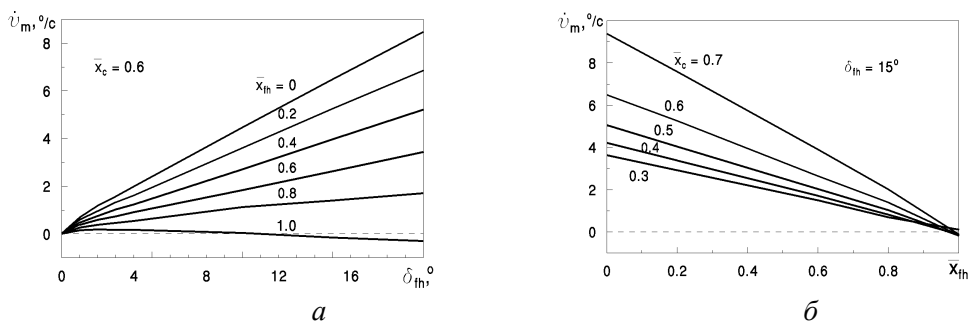


Рис. 5. Влияние угла поворота (а) и положения (б) горизонтальных рулей на угловую скорость поворота СКА по глубине

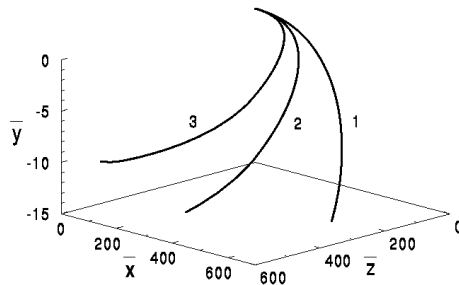


Рис. 6. Формы траекторий при пространственном маневрировании СКА

Описанный модельный подход позволяет моделировать произвольное пространственное маневрирование СКА при одновременном действии вертикальных и горизонтальных рулей. На рис. 6 показаны примеры расчета формы пространственных траекторий СКА в неподвижной системе координат $Oxyz$. Параметры расчета: дистанция $S = 4$ км; $\bar{x}_c = 0,6$; $\bar{x}_{fh} = \bar{x}_{fv} = 0,4$; $\delta_{fh} = -1^\circ$; кривая 1 – $\delta_{fv} = -5^\circ$; кривая 2 – $\delta_{fv} = -10^\circ$; кривая 3 – $\delta_{fv} = -15^\circ$. В таблице 4 приведены соответствующие значения угловой скорости поворота $\dot{\chi}_m$, радиуса циркуляции по курсу R_{ty} и достигнутой аппаратом глубины H в конце дистанции.

Таблица 4. Значения параметров движения СКА в конце дистанции для траекторий рис. 6

δ_{fv}	0°	-5°	-10°	-15°
$\dot{\chi}_m, ^\circ/c$	0	-1,634	-3,271	-7,030
$R_{ty}, \text{ км}$	∞	4,216	2,101	0,940
$H, \text{ м}$	86,03	72,29	69,30	56,23

Как видно, с увеличением угла δ_{fv} при неизменном δ_{fh} не только возрастает угловая скорость поворота СКА по курсу, но и уменьшается отклонение траектории по глубине. В этом взаимодействии продольной и боковой составляющих движения проявляются пространственные эффекты при маневрировании СКА с помощью гидродинамических рулей.

3. Расчет кавитирующих рулей СКА. На практике обычно задается форма и конфигурация рулей, а создаваемые рулями боковые силы F_{fv} и F_{fz} следует определять. Необходимо рассчитывать также гидродинамическое сопротивление рулей F_{fx} , которое при постоянной тяге движителя приводит к падению скорости СКА и, следовательно, к уменьшению размеров каверны.

В случае высокоскоростных СКА стабилизаторы и рули, проникающие из каверны в воду, будут обтекаться в режиме суперкавитации. При этом эффективность таких органов управления резко уменьшается по сравнению со случаем их сплошного обтекания. Кроме того, при изменении эффективного угла атаки рулей α_f может происходить скачкообразное изменение боковой силы, сопровождающееся гистерезисным эффектом (см. [8]).

Как показано выше, наиболее эффективным является носовое расположение рулей на корпусе СКА. Однако при этом скос потока, вызываемый рулями, будет приводить к дополнительному искривлению оси каверны, вследствие чего может измениться сила глиссирования \vec{F}_f , а также унос газа из каверны \dot{Q}_{out} в случае вентилируемой каверны. Ниже описан метод расчета гидродинамических характеристик кавитирующих рулей СКА с учетом их взаимодействия с основной суперкаверной.

Как и выше, будем рассматривать пару симметричных горизонтальных рулей, создающих суммарную подъемную силу F_{fv} и момент M_{zy} , и пару симметричных вертикальных рулей, создающих суммарную боковую силу F_{fz} и момент M_{fy} (см.

рис. 3). Будем считать, что рули СКА имеют прямоугольную форму в плане и клиновидную форму в сечении. На рис. 7 показана схема вертикального гидродинамического руля, проникающего из каверны в воду. На схеме обозначено: S_f , c_f , h_f – соответственно площадь, хорда и размах замытой части руля; β_{fv} – полуугол клина в сечении руля; δ_{fv} – угол поворота руля относительно оси Oy_1 ; α_{fv} – эффективный угол атаки руля. На схеме показаны оси поточной системы координат $Ox_0y_0z_0$ и связанной системы координат $Ox_1y_1z_1$.

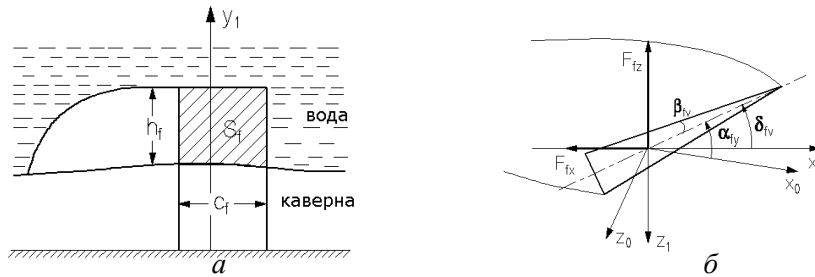


Рис. 7. Схема кавитирующего вертикального руля СКА
a – вид сбоку; *б* – поперечное сечение

Заметим, что если рули имеют отличную от прямоугольной форму в плане, то при расчете сил их можно заменить эквивалентными прямоугольными рулями равной площади S_f и равного удлинения $\lambda_f = h_f / c_f$.

В случае нестационарной каверны площадь замытой поверхности рулей S_f и, следовательно, компоненты силы \vec{F}_f и соответствующих моментов будут функциями времени. Более того, значения боковой силы на рулях одной пары могут быть в каждый момент времени различными, что приведет к возникновению осевого момента M_{fx} .

4. Расчет длины каверн за рулями. Будем считать, что для каверн за рулями СКА число кавитации σ имеет то же значение, что для основной каверны. Как показано в [8] теоретически и экспериментально, тип кавитационного обтекания руля с клиновидным сечением зависит от угла атаки. Когда угол атаки мал $\alpha_f < \beta_f$, в сечении руля имеем кавитационное обтекание клина (см. рис. 8, *a*). Если $\alpha_f > \beta_f$, то руль обтекается в суперкавитационном режиме со срывом каверны с передней кромки (суперкавитационное обтекание пластинки, см. рис. 8, *б*). При переходе через критическое значение угла атаки $\alpha_f \approx \beta_f$ происходит резкое изменение как боковой силы, так и сопротивления руля. На рис. 8 обозначено: c – длина хорды руля; l – длина каверны.

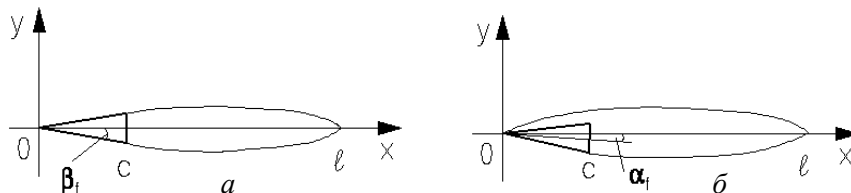


Рис. 8. Схемы кавитационного обтекания тонкого клина (*a*) и пластинки (*б*)

Из известных точных решений линейных задач для кавитирующего клина [9] и для суперкавитирующей пластинки [10] получаем соответственно:

$$\frac{l}{c} = 1 + 7 \left(\frac{\beta_f}{\sigma} \right)^2, \quad \frac{l}{c} = 1 + 4 \left(\frac{\alpha_f}{\sigma} \right)^2. \quad (6)$$

При компьютерном моделировании динамики СКА формулы (6) используются для расчета максимальной длины каверн за рулями при пересечении их границ с границей основной суперкаверны. При построении на экране компьютера форма каверн за рулями в плане аппроксимируется соответствующим квадрантом эллипса.

5. Вычисление сил, создаваемых рулями. Гидродинамические рули СКА представляют собой суперкавитирующие крылья малого удлинения, имеющие в сечении форму тонкого клина (см. рис. 8). На практике для определения силы сопротивления и боковых сил на рулях используются данные испытаний или базы данных, полученных путем расчета методами CFD. Однако для приближенного расчета сил на рулях СКА, учитывая высокие скорости обтекания и небольшие углы атаки, можно использовать известные методы линейной теории суперкавитирующих подводных крыльев [9–11]. Для рулей СКА, проникающих из каверны в воду, отсутствует интерференция с корпусом. Поэтому их можно приближенно считать изолированными прямоугольными крыльями малого удлинения. Коэффициенты компонент силы, действующей на рули со стороны жидкости, определяются соотношениями:

$$F_{fx} = \frac{\rho V^2}{2} S_f c_{fx}, \quad F_{fy} = \frac{\rho V^2}{2} S_f c_{fy}, \quad F_{fz} = \frac{\rho V^2}{2} S_f c_{fz}.$$

Коэффициент кавитационного сопротивления тонкого симметричного кавитирующего клина [9]

$$c_{fx} = \frac{2F_{fx}}{\rho V^2} = \frac{8\beta_f^2 l}{\pi(l-c)}. \quad (7)$$

Коэффициент боковой силы руля клиновидного сечения, обтекаемого под малым углом атаки α_f , близок к коэффициенту подъемной силы некавитирующей пластинки малого удлинения [11]

$$c_{fy} = \frac{\pi}{2} \alpha_f \lambda_f. \quad (8)$$

Суммарное сопротивление, испытываемое рулем, равно сумме кавитационного сопротивления и сопротивления трения:

$$F_{fx} = \frac{\rho V^2}{2} S_f [c_{fx} + 2c_f(\text{Re}_w)], \quad \text{Re}_w = \frac{c_f V}{\nu}, \quad (9)$$

где c_f – коэффициент вязкостного сопротивления пластинки для турбулентного пограничного слоя [12]; Re_w – число Рейнольдса.

Коэффициент подъемной силы и коэффициент сопротивления руля, обтекаемого под малым углом атаки α_f по схеме рис. 8, б, приближенно вычисляются по формулам для суперкавитирующей пластинки малого удлинения [11]:

$$c_{fy} = \frac{\pi}{5} \alpha_f \lambda_f, \quad c_{fx} = \frac{\pi}{5} \alpha_f^2 \lambda_f. \quad (10)$$

Эффективные углы атаки горизонтальных и вертикальных рулей вычисляются соответственно по формулам (3), (4). Коэффициенты моментов боковых сил относительно центра масс аппарата, создаваемых соответственно горизонтальными и вертикальными рулями, определяются соотношениями:

$$M_{fx} = \frac{\rho V^2}{2} S_f L c_{mfx}, \quad M_{fy} = \frac{\rho V^2}{2} S_f L c_{mfy}, \quad M_{fz} = \frac{\rho V^2}{2} S_f L c_{mfz},$$

$$c_{mfz} = -c_{fy}(x_{fh} - x_c), \quad c_{mfy} = -c_{fz}(x_{fv} - x_c). \quad (11)$$

В случае, если боковые силы на рулях каждой пары различны, возникает осевой момент M_{fx} , коэффициент которого равен

$$c_{mfx} = c_{fz2}z_{fv2} - c_{fz1}z_{fv1} + c_{fy2}z_{fh2} - c_{fy1}z_{fh1}, \quad (12)$$

где z_{fh1} , z_{fh2} , z_{fv1} , z_{fv2} – расстояния от точек приложения сил соответственно F_{fy1} , F_{fy2} , F_{fz1} , F_{fz2} до оси аппарата. Здесь индексы 1 и 2 относятся соответственно к нижнему и верхнему вертикальным рулям, а также к левому и правому горизонтальным рулям.

6. Расчет искривления оси каверны, вызванного рулями. Поперечные силы F_{fy} и F_{fz} на горизонтальных и вертикальных рулях приводят к деформации оси каверны. Согласно теореме импульсов [1], импульс поперечной силы на рулях должен соответствовать импульсу в следе, который имеет ту же величину, но противоположное направление. Это значит, что если сила на горизонтальном руле F_{fy} направлена вверх, то ось каверны должна отклоняться вниз и наоборот. Аналогично этому, если сила на вертикальном руле F_{fz} направлена вправо, то ось каверны должна отклониться влево и наоборот.

Применение теоремы импульсов позволяет оценить искривление оси каверны, вызванное силой, создаваемой горизонтальными и вертикальными рулями:

$$h_{fy}(x) = -\frac{F_{fy}(x - x_{fh})}{\pi \rho V^2 R_c^2}, \quad x > x_{fh}, \quad (13)$$

$$h_{fz}(x) = -\frac{F_{fz}(x - x_{fv})}{\pi \rho V^2 R_c^2}, \quad x > x_{fv}, \quad (14)$$

где x_{fh} и x_{fv} – расстояния от кавитатора до точки приложения боковой силы, создаваемой горизонтальными и вертикальными рулями.

7. Примеры компьютерного моделирования. Таким образом, на каждом шаге расчета действия гидродинамических рулей СКА вычисления производятся в следующем порядке:

- 1) рассчитывается удлинения λ_f и смоченные площади S_f каждого из рулей;
- 2) рассчитывается эффективные углы атаки каждого из рулей α_f по формулам (3) или (4);
- 3) определяется тип кавитационного обтекания каждого из рулей (СК-клин или СК-пластинка);
- 4) вычисляются коэффициенты сил для каждого из рулей по формулам (7), (8) или (10);

4) вычисляются коэффициенты моментов относительно центра масс аппарата для каждого из рулей по формулам (11) и (12);

5) рассчитывается искривление оси каверны, вызванное рулями, по формулам (13) и (14).

Описанный алгоритм использован нами при компьютерном моделировании пространственной динамики СКА. При расчетах использовалась та же модель СКА и те же начальные параметры движения, что и выше. Все рули имеют одинаковые размеры 100x150 мм. Вертикальные и горизонтальные рули установлены на расстоянии соответственно 2.3 м и 3.3 м от кавитатора.

На рис. 9, а показано, как изменяются со временем смоченная площадь S_{fv} и эффективный угол атаки α_{fv} одного из вертикальных рулей, а также длина каверны за рулем l_{fv} при пространственном движении СКА. Параметры расчета: $\bar{x}_c = 0.6$; $\beta_{fv} = 3^\circ$; $\delta_y = 0^\circ$; $\delta_z = -4.389^\circ$; $\delta_{fv} = 2^\circ$; $\delta_{fh} = -1^\circ$. Вертикальные участки на графике $l_{fv}(t)$ соответствуют смене режима обтекания руля. На рис. 9, б для сравнения показано, как на том же временном отрезке изменяются угол тангажа ψ и угол рыскания φ . Все параметры на графиках безразмерны, углы даны в радианах.

Расчеты показали, что полученные выше выводы относительно маневрирования СКА путем f -управления остаются в силе. Наиболее существенное отличие состоит в учете сопротивления рулей, которое при большой скорости движения СКА может быть существенным. Если тяга движителя F_{pr} постоянна и рассчитана для сбалансированного СКА без рулей, то активизация (выдвижение) рулей приводит к уменьшению скорости аппарата и, следовательно, к уменьшению размеров каверны вплоть до кольцевого замыва хвостовой части корпуса аппарата водой. После этого аппарат будет обтекаться в режиме частичной кавитации, при этом его гидродинамическое сопротивление недопустимо возрастает.

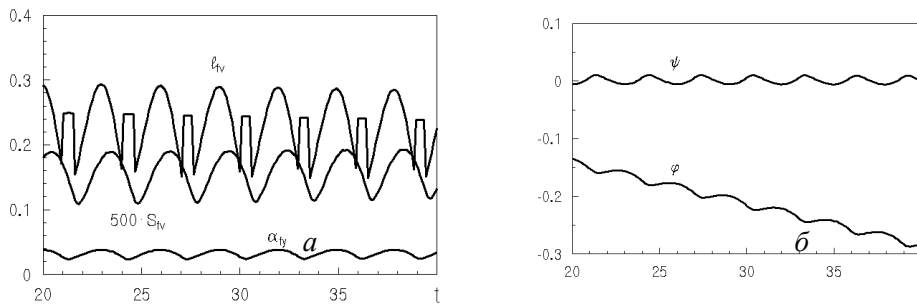


Рис.9. Изменение параметров вертикального руля (а) и параметров движения СКА (б)

Например, для расчета рис. 9 постоянная тяга движителя, равная сопротивлению сбалансированного аппарата без рулей, составляет 21,65 КН, а суммарное сопротивление четырех рулей составляет в среднем 1,14 КН, т.е. 5% от общего сопротивления. При этом кольцевой замыв хвостовой части корпуса аппарата происходит через 41 с после активизации рулей. В таблице 5 приведены промежутки времени T и пройденные аппаратом дистанции S до момента кольцевого замыва для ряда значений угла поворота вертикальных рулей δ_{fv} .

Таблица 5. Промежутки времени и пройденные дистанции до момента кольцевого замыва аппарата

δ_{fv}	2°	3°	4°	5°	6°
T, c	41,48	28,87	22,95	17,56	2,64
$S, км$	4,838	3,362	2,667	2,044	0,308

Столь резкое уменьшение параметров T и S при возрастании δ_{fv} объясняется тем, что при этом возрастают угловая скорость поворота аппарата, погружение транца и площадь смоченного участка корпуса аппарата. Это приводит к увеличению сопротивления трения и, как следствие, к падению скорости движения и уменьшению размеров каверны. Таким образом, для того, чтобы СКА продолжал двигаться в режиме суперкавитации, необходимо компенсировать дополнительное сопротивление рулей.

На рис. 10 показаны формы траекторий при маневрировании СКА по курсу, рассчитанные для ряда значений угла поворота вертикальных рулей δ_{fv} . Остальные параметры расчета те же, что на рис. 9, дистанция $S = 2$ км. При этом движение СКА было стабилизировано по глубине путем автоматического δ -управления (см. [1]). В таблице 6 приведены соответствующие значения угловой скорости поворота $\dot{\chi}_m$ и радиуса циркуляции по курсу R_{ty} в конце дистанции.

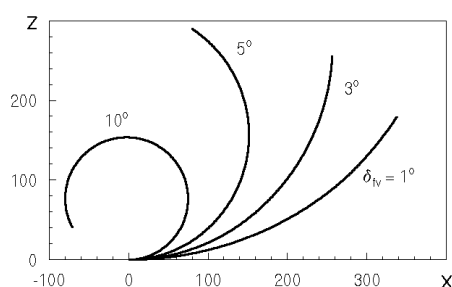


Рис. 10. Формы траекторий СКА при маневрировании по курсу и стабилизации движения по глубине

Таблица 6. Значения параметров движения СКА в конце дистанции для траекторий рис. 10

δ_{fv}	1°	3°	5°	10°
$\dot{\chi}_m, °/c$	-4,644	-5,480	-9,080	-17,847
$R_{ty}, км$	1,481	1,255	0,757	0,385

Компьютерное моделирование продемонстрировало кардинальное отличие механизма управляемости традиционных водоизмещающих судов и СКА. В первом случае для маневрирования по курсу оптимальным является кормовое расположение руля. Его отклонение вызывает момент, разворачивающий корпус судна, а воз-

никающая при этом на корпусе поперечная сила в свою очередь вызывает отклонение траектории движения, т.е. поворот судна. При этом угол отклонения кормового руля и угол поворота судна имеют противоположные знаки. В случае СКА, напротив, кормовое положение рулей является неэффективным. Отклонение траектории движения СКА вызывается поперечными силами, возникающими непосредственно на рулях. При этом знаки углов отклонения руля и поворота СКА совпадают независимо от того, располагаются рули впереди или позади центра масс аппарата.

Заключение. Проведенные численные исследования динамики СКА, управляемых с помощью гидродинамических рулей (f -управление), позволяют сделать следующие выводы.

1. Наиболее эффективным при маневрировании СКА как по курсу, так и по глубине является носовое расположение гидродинамических рулей («схема утка»). При смещении рулей в корму их эффективность падает. Традиционное кормовое расположение рулей является неприемлемым для целей маневрирования СКА.

2. Смещение центра масс СКА в корму приводит к улучшению его управляемости с помощью гидродинамических рулей как по курсу, так и по глубине.

3. Маневрирование СКА путем f -управления сопряжено с существенным возрастанием сопротивления движению и, следовательно, с потерей скорости движения при постоянной тяге движителя. Поэтому для уменьшения энергетических потерь рули целесообразно выдвигать только на короткое время, необходимое для маневра.

4. Из-за сложного колебательного поведения нестационарной каверны при движении СКА характер обтекания рулей может быть неопределенным. Это значит, что зависимости $F_{fy}(\delta_{fh})$ и $F_{fz}(\delta_{fv})$ могут быть неоднозначными и немонотонными. Ввиду неопределенного характера обтекания рулей при маневрировании СКА на практике следует применять систему управления рулями (актуатор) с обратной связью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семененко В.Н., Семененко Т.Н. Устойчивость и стабилизация продольного движения суперкавитирующих аппаратов // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія «Транспортні системи і технології». – 2009, Вип. 15. – С.134-143.
 2. Савченко Ю.Н., Семененко В.Н. О маневренности по курсу подводных суперкавитирующих аппаратов // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – Т. 13 – № 1. – С.43-50.
 3. Semenenko V.N., Naumova Ye.I. Study of the supercavitating body dynamics. In book: Supercavitation: Advances and Perspectives. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 2012, pp. 147-176.
 4. Семененко В.Н. Расчет пространственного движения суперкавитирующих аппаратов // Прикладна гідромеханіка. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С.59-64.
 5. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. – К.: Наукова думка, 1969. – 208 с.
 6. Логвинович Г.В., Серебряков В.В. О методах расчета формы тонких осесимметричных каверн // Гидромеханика – 1975. – Вып. 32. – С. 47-54.
 7. Dzielski J., and Kurdila A. A benchmark control problem for supercavitating vehicles and an initial investigation of solution. Journal of Vibration and Control, 2003, 19(7), pp. 791-804.
 8. Савченко Ю.Н., Семененко В.Н. Розривні гідродинамічні характеристики органів керування, що обтікаються з відривом струменів // Наукові вісті НТТУ «КП». – 2002. – № 2. – С. 82-87.
 9. Tulin M.P. Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies, David Taylor Model Basin Report 834, 1953.
 10. Сфремов І.І. Лінеаризована теорія кавітаційного обтікання. – К.: Наукова думка, 1974. – 156 с.
 11. Hsu C.C. Some remarks on the progress of cavity flow studies. ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 97, 1975, pp. 439-452.
 12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
-