

УДК 532.528:681.513

В.Н. СЕМЕНЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Т.В. КРИЖАНОВСКАЯ, Т.Н. СЕМЕНЕНКО

Государственный университет инфраструктуры и технологий

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОДВОДНЫХ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

Разработан новый метод активной стабилизации движения высокоскоростных подводных суперкавитирующих аппаратов по крену и метод управления их движением путем регулирования угла крена. Приведены результаты компьютерного моделирования маневрирования суперкавитирующего аппарата по курсу при управлении с помощью вертикальных гидродинамических рулей, проникающих из каверны в воду, и путем регулирования угла крена. Показано, что метод управления креном суперкавитирующего аппарата с целью его маневрирования по курсу является достаточно эффективным.

Ключевые слова: суперкавитирующий аппарат, управление, маневрирование, рули, крен, компьютерное моделирование.

В.М. СЕМЕНЕНКО

Институт гідромеханіки НАН України

А.Ю. АНДРЕЙЦЕВ, Т.В. КРИЖАНОВСЬКА, Т.М. СЕМЕНЕНКО

Державний університет інфраструктури та технологій

ПРО ОДИН МЕТОД КЕРУВАННЯ РУХОМ ПІДВОДНИХ СУПЕРКАВІТУЮЧИХ АПАРАТІВ

Розроблено новий метод активної стабілізації руху високошвидкісних підводних суперкавітуючих апаратів по крену і метод управління їх рухом шляхом регулювання кута крену. Наведено результати комп'ютерного моделювання маневрування суперкавітуючого апарату за курсом при управлінні за допомогою вертикальних гідродинамічних рулів, що проникають з каверни у воду, і шляхом регулювання кута крену. Показано, що метод управління креном суперкавітуючого апарату з метою його маневрування за курсом є досить ефективним.

Ключові слова: суперкавітуючий апарат, управління, маневрування, рулі, крен, комп'ютерне моделювання.

V.N. SEMENENKO

Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine

A.Yu. ANDREYTSSEV, T.V. KRYZHANOVSKA, T.N. SEMENENKO

State University of Infrastructure and Technologies

ON A METHOD OF CONTROL OF THE UNDERWATER SUPERCAVITATING VEHICLE MOTION

A new method of the active roll stabilization of a high-speed underwater supercavitating vehicle (briefly SC-vehicle), and a method of its motion control by the roll angle regulation have been developed. For computer simulation of dynamics of the self-propelled SC-vehicles with ventilated supercavities we use the approximation mathematical model of a SC-body 3D motion based on the principle of independence of the unsteady cavity section expansion by G.V. Logvinovich [1]. In our previous works [5–7], the comparative analysis of three methods of the SC-vehicle motion control was given: 1) inclination of the cavitator (δ -control), 2) deflection of the propulsor thrust vector (η -control), 3) using the vertical and/or horizontal hydrodynamic cavity-piercing fins (f -control). The zero roll angle stabilization has to be ensured when the f -controlled SC-vehicle course maneuvering. We propose a method of active hydrodynamic stabilization of the SC-vehicle specified roll angle θ with the help of both the special roll fin and the automatic error-closing control system. The small roll fin is located on the vehicle bottom tail part in the zone of the vehicle planing along the cavity wall (see Fig. 1). The same method can be used for the course control of the SC-vehicle motion (θ -control). Results of computer simulation of the SC-vehicle course maneuvering with using both the vertical hydrodynamic cavity-piercing fins with the roll stabilization and the vehicle θ -control are given. It has been shown that the method of the SC-vehicle θ -control is sufficient effective for the course maneuvering.

Key words: supercavitating vehicle, control, maneuvering, rudders, roll, computer simulation.

Постановка проблеми

Єдинственным реальним путем достижения очень больших скоростей в воде является организация движения в режиме суперкавитации, когда вокруг тела с помощью специального носового кавитатора образуется полость, заполненная водяным паром или газом [1]. При этом сопротивление движению резко падает. Для разгрузки веса аппарата он должен глиссировать своей хвостовой частью по нижней поверхности суперкаверны. Основным параметром подобия суперкавитационных течений является число кавитации:

$$\sigma = \frac{2(p_{\infty} - p_c)}{\rho V^2}, \quad (1)$$

где p_{∞} – давление в невозмущенном потоке; p_c – давление в каверне; ρ – плотность воды; V – скорость аппарата. Суперкавитационному режиму обтекания соответствуют малые значения числа кавитации $\sigma < 0.1$. При скоростях $V > 100$ м/с число кавитации может достигать значений $\sigma = 0.02$ и меньше.

В настоящее время актуальной и до конца не решенной является проблема управляемости и маневренности высокоскоростных подводных суперкавитирующих аппаратов (сокращенно СК-аппаратов) по глубине и по курсу.

Анализ последних достижений и публикаций

Динамика СК-аппаратов весьма сложна, причиной чего является нестационарное поведение образуемой телом каверны и сложный разрывный характер взаимодействия тела со стенками каверны. При этом основной практической проблемой оказалась неустойчивость продольного движения самодвижущихся СК-аппаратов по глубине и, как следствие, необходимость активной стабилизации их движения [2]. Практически стабилизация движения СК-аппаратов по глубине осуществляется путем автоматического регулирования угла наклона кавитатора (т.н. δ -стабилизация). Второй практической проблемой является выбор оптимального метода управления движением СК-аппарата, обеспечивающего заданные параметры его маневренности по курсу [3, 4].

В наших предыдущих работах [5–7] дан сравнительный анализ трех методов управления движением СК-аппаратов: 1) наклон кавитатора с двумя степенями свободы (δ -управление), 2) отклонение вектора тяги движителя с двумя степенями свободы (η -управление), и 3) использование вертикальных и горизонтальных гидродинамических рулей, проникающих из каверны в воду (f -управление).

В нашей работе [8] показано, что возможности маневрирования СК-аппаратов по курсу при любом методе управления ограничены вследствие возникающей деформации каверны и, как следствие, замыва корпуса аппарата. В [8] дан простой метод оценки минимального допустимого радиуса циркуляции для конкретного СК-аппарата.

Цель исследования

В данной статье исследуется новый метод управления движением СК-аппарата путем регулирования угла крена аппарата θ (т.н. θ -управление, аналогичное известному в авиации типу управления “bank-to-turn”). Приводятся примеры компьютерного моделирования маневрирования по курсу самодвижущихся СК-аппаратов с использованием f -управления и θ -управления.

Изложение основного материала исследования

1. Расчетный метод и расчетная модель. Для компьютерного моделирования динамики самодвижущихся подводных СК-аппаратов мы используем аппроксимационную математическую модель нестационарной суперкаверны, основанную на принципе независимости расширения сечений суперкаверны Г.В. Логвиновича [1]. Она включает следующие уравнения и соотношения:

- уравнения динамики твердого тела с шестью степенями свободы в связанной системе координат;
- уравнения для расчета формы нестационарной каверны и ее положения в поточной системе координат с учетом искажений, вызванных наклоном кавитатора и влиянием весомости (см. [9]);
- уравнения для давления в нестационарной вентилируемой каверне $p_c(t)$, которое определяется разностью между расходом газа на поддув каверны и уносом газа из каверны (см. [9]);
- соотношения, связывающие действующие гидродинамические силы и моменты с текущими параметрами тела и каверны. Компоненты силы при глиссировании модели в каверне вычисляются по формулам Э.В. Парышева (см. [6]). Для расчета сил на рулях и размеров каверн, образующихся за рулями, используются известные соотношения линейной теории суперкавитирующих крыльев малого удлинения (см. [7]).

Все вычисления, результаты которых приводятся ниже, проводились для расчетной модели подводного СК-аппарата, эскиз которой показан на рис. 1. Ее основные параметры: длина $L = 5.0$ м;

диаметр цилиндрической части $D_b = 340$ мм; диаметр кавитатора $D_n = 70$ мм; масса $m = 600$ кг; моменты инерции относительно осей аппарата $I_x = 8$ кгм², $I_y = I_z = 900$ кгм². Начальные параметры движения модели на маршевом режиме: скорость $V_{cr} = 120$ м/с; глубина $H = 5.0$ м. При этом число кавитации $\sigma = 0.02$; длина каверны $L_{cr} = 6.555$ м; объемный расход газа на поддув каверны $\dot{Q}_{in} = 72.125$ л/с. Равновесные значения параметров при установившемся продольном движении модели без рулей в режиме глиссирования в каверне: угол наклона кавитатора $\delta_z = -5.774^\circ$; угол тангажа $\psi = 0.371^\circ$; тяга движителя $F_{cr} = 23.213$ кН.

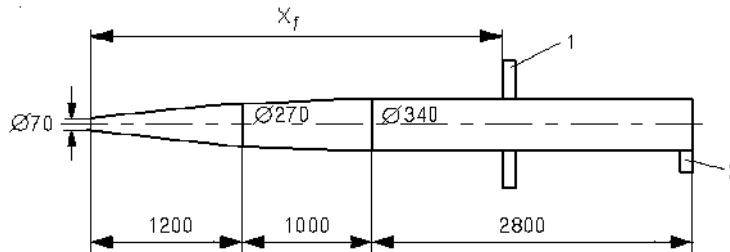


Рис. 1. Эскиз расчетной модели СК-аппарата:
1 – вертикальный руль; 2 – руль крена

Модель может иметь пару одинаковых вертикальных рулей 1 и донный руль крена 2. Все рули имеют прямоугольную форму в плане и клиновидную форму в поперечном сечении. Положение и размеры вертикальных рулей: $x_f = 2.3$ м, хорда 100 мм, высота 130 мм, угол клиновидности 6° ; размеры руля крена 2: хорда 50 мм, высота 80 мм, угол клиновидности 6° .

Любой способ управление движением СК-аппарата с целью его маневрирования по курсу должен создавать боковую центростремительную силу, приложенную к центру масс аппарата. Эффективность маневрирования по курсу характеризуется двумя параметрами: скорость изменения траекторного угла $\chi = \varphi - \beta$ и радиус циркуляции r :

$$\dot{\chi} = V(s) \frac{d\chi}{ds}, \quad r = \frac{ds}{d\chi} = \frac{V}{\dot{\chi}}, \quad (2)$$

где V – скорость движения; φ – угол рыскания; β – угол скольжения; s – дуговая координата центра масс аппарата вдоль траектории.

2. Особенности управления движением СК-аппаратов. Маневренностью подводного аппарата по курсу называется его способность совершать циркуляцию заданного радиуса в горизонтальной плоскости. Простой анализ показывает, что из-за малости поверхностей контакта с водой высокоскоростные СК-аппараты способны совершать циркуляции с минимальным радиусом, на 2–3 порядка большим, чем при сплошном обтекании [5]. Как показано в работе [8], возможности маневрирования СК-аппаратов по курсу дополнительно ограничены из-за деформации каверны и, как следствие, замыва корпуса аппарата. В [8] дан простой метод оценки минимального радиуса циркуляции для конкретного СК-аппарата с дисковым кавитатором.

Анализ показал, что наиболее эффективным элементом управления движением СК-аппарата является кавитатор (δ -управление). Оказалось однако, что для достижения допустимых по [8] радиусов циркуляции δ -управление часто является недостаточным, поскольку угол наклона кавитатора ограничен некоторым максимальным значением δ_{max} . К тому же кавитатор обычно используется для стабилизации движения по глубине [2, 6]. Поэтому на практике приходится использовать дополнительные органы управления, такие как проникающие из каверны в воду гидродинамические рули (f -управление).

Маневрирование СК-аппарата путем f -управления сопряжено с существенным возрастанием сопротивления движению и, следовательно, с потерей скорости движения при постоянной тяге движителя. В случае высокоскоростных СК-аппаратов 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.

Поскольку вследствие несимметрии каверны боковые силы на вертикальных рулях обычно различны, возникает суммарный осевой момент:

$$M_{fx} = F_{fz2}y_{fv2} - F_{fz1}y_{fv1}, \quad (3)$$

где y_{fv1} , y_{fv2} – расстояния от точек приложения сил на вертикальных рулях соответственно F_{fz1} , F_{fz2} до продольной оси аппарата. Здесь индексы 1 и 2 относятся соответственно к нижнему и верхнему вертикальным рулям. Этот момент приводит к увеличению угла крена аппарата θ и, следовательно, к неблагоприятному изменению направления действия управляющих сил. Действительно, при увеличении угла крена уменьшаются проекции сил, действующих на вертикальные рули, на горизонтальную плоскость. Таким образом, при f -управлении движением СК-аппарата необходимо стабилизировать движение не только по глубине, но и по крену.

Ранее нами было показано, что наиболее эффективным при маневрировании СК-аппарата по курсу является носовое расположение гидродинамических рулей (схема "утка") [7]. При смещении рулей в корму их эффективность уменьшается приблизительно по линейному закону. Традиционное кормовое расположение рулей является неприемлемым для целей маневрирования СК-аппарата.

Метод управления посредством отклонения вектора тяги движителя, широко применяемый в авиации и ракетостроении (η -управление), применительно к движению СК-аппаратов с гидродинамической точки зрения эквивалентен управлению с помощью кормовых рулей, т.е. является неэффективным.

3. Стабилизация СК-аппарата по крену. Как было сказано выше, при маневрировании СК-аппаратов по курсу с помощью f -управления необходимо обеспечивать стабилизацию СК-аппарата по крену. Стабилизация СК-аппарата по крену может осуществляться пассивным и активным способами. Пассивная стабилизация нулевого угла крена осуществляется при наличии у аппарата метацентрической высоты (как у надводных судов и подводных лодок).

Метацентрическая высота аппарата h_M представляет собой расстояние между центром поперечного сечения аппарата и его центром масс. Если центр масс аппарата лежит ниже центра сечения на величину h_M , то при крене аппарата на угол θ возникает восстанавливающий момент относительно продольной оси:

$$M_{gx} = -h_M mg \cos\psi \sin\theta, \quad (4)$$

где ψ – угол тангажа. В результате во время движения аппарат будет испытывать низкочастотные колебания по крену около значения $\theta = 0$. Иными словами, при $h_M > 0$ аппарат является статически устойчивым относительно возмущений нулевого угла крена.

На практике применительно к высокоскоростным СК-аппаратам, в отличие от надводных водоизмещающих судов, эффективность пассивной стабилизации по крену ограничена из-за малости реально достижимых величин h_M . Известен также метод пассивной гидродинамической стабилизации по крену с помощью V-образной системы крыльев, проникающих из каверны в воду [10]. Их параметры подбираются таким образом, чтобы при крене аппарата крылья создавали суммарный восстанавливающий осевой момент M_{fx} .

Для активной стабилизации нулевого угла крена мы предлагаем использовать специальный вертикальный руль крена (см. рис. 1). Руль крена 2 расположен в донной хвостовой части СК-аппарата в области глиссирования аппарата по нижней границе каверны, вследствие чего его применение лишено недостатков, присущих гидродинамическим рулям, проникающим из каверны в воду. Его размеры могут быть значительно меньше, чем размеры вертикальных рулей, так как он служит не для создания боковой силы, а только для создания осевого момента.

Закон обратной связи для автоматической системы регулирования угла отклонения руля крена δ_{fb} для поддержания заданного угла крена $\theta = \theta_2$ задается в виде известного в авиации и судостроении "простого автопилота" [11, 12]:

$$\delta_{fb}(t) = -u_1[\theta(t-t_1) - \theta_2] - u_2\omega_x(t-t_1), \quad (5)$$

где $u_1 \geq 0$, $u_2 \geq 0$ – коэффициенты обратной связи (передаточные числа); t_1 – время задержки срабатывания исполнительного устройства; ω_x – угловая скорость относительно продольной оси аппарата. При этом для изменения угла отклонения руля крена вводится конструктивное ограничение:

$$|\delta_{fb}(t)| \leq \delta_{fb1}, \quad t > t_{beg}, \quad (6)$$

где $t = t_{beg}$ – момент начала работы руля крена. На рис. 2 показана структурная схема системы автоматической стабилизации угла крена СК-аппарата по закону (5) с одним контуром обратной связи и одним усилителем A .

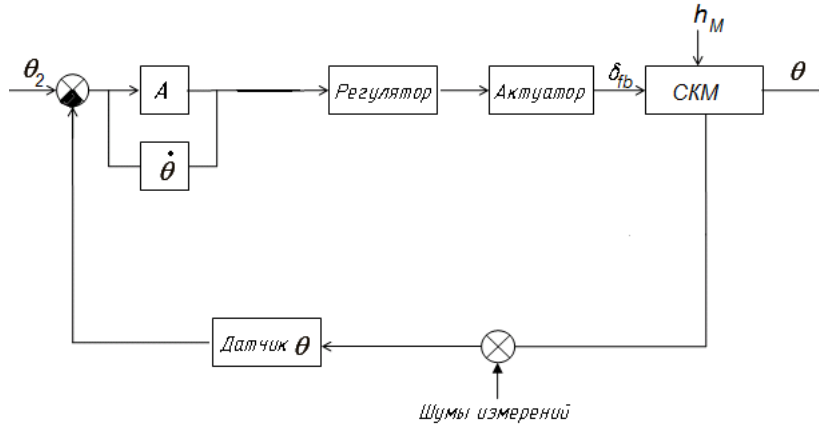


Рис. 2. Структурная схема одноконтурной автоматической системы стабилизации угла крена СК-аппарата

4. Алгоритм θ -управления СК-аппаратом по курсу. Метод θ -управления движением СК-аппарата по курсу (или управление типа "bank-to-turn") основан на том, что при изменении угла крена θ суперкавитирующей модели в трехмерном движении изменяется эффективный угол наклона кавитатора в горизонтальной плоскости, а, следовательно, и проекции вектора силы, действующей на кавитатор. Действительно, крен аппарата на угол θ с одновременным наклоном кавитатора на угол δ'_z эквивалентен наклону кавитатора в двух плоскостях на углы δ_z и δ_y при $\theta = 0$. Можно показать, что углы δ'_z , θ , δ_z и δ_y связаны соотношениями:

$$\operatorname{tg} \delta_z = \frac{\operatorname{tg} \delta'_z}{\cos \theta}, \quad \operatorname{tg} \delta_y = \frac{\operatorname{tg} \delta'_z}{\sin \theta}. \tag{7}$$

Таким образом, при θ -управлении движением СК-аппарата активным управляющим элементом является кавитатор, поэтому оно так же эффективно, как δ -управление. Нужный крен аппарата $\theta_2 \neq 0$ достигается при помощи руля крена 2 (см. рис. 1). При этом возникает проблема установления и поддержания необходимого угла крена модели θ_2 . Для решения этой проблемы нами предложен следующий алгоритм:

- 1) на временном отрезке $0 < t < t_{beg}$ считается, что руль крена отсутствует, при этом модель движется без крена: $\theta = 0, \omega_x = 0$;
- 2) в момент времени $t = t_{beg}$ руль крена отклоняется на заданный угол $\delta_{fb} = \delta_{fb0}$. При этом угол крена модели θ и угловая скорость относительно оси модели ω_x начинают возрастать;
- 3) в момент, когда $\theta = \theta_1 / 2$ (где θ_1 – некоторый пробный угол крена), угол отклонения нижнего руля изменяется на противоположный $\delta_{fb} = -\delta_{fb0}$. В результате угловая скорость ω_x начинает уменьшаться, а угол крена модели θ продолжает расти;
- 4) в момент, когда $\omega_x = 0$ (при этом угол крена принимает значение $\theta = \theta_2$) угол отклонения руля крена устанавливается равным нулю и включается система автоматической стабилизации угла крена θ_2 (5).

Заметим, что при использовании θ -управления движением СК-аппарата наличие метацентрической высоты $h_M > 0$ играет отрицательную роль, поскольку при стабилизации необходимого значения угла крена θ_2 автоматической системе управления приходится постоянно преодолевать осевой момент (3), стремящийся установить нулевое значение угла крена $\theta = 0$.

5. Примеры компьютерного моделирования. Примем дополнительно к перечисленным выше следующие параметры расчетной модели СК-аппарата: положение центра масс $x_c = 3.5$ м; метацентрическая высота $h_M = 28$ мм. При этом равновесные значения угла наклона кавитатора δ_z и угла тангажа модели ψ равны: $\delta_z^* = -4.313^\circ$, $\psi^* = 0.3362^\circ$. Все расчеты проводились при включенной системе автоматической δ -стабилизации движения СК-аппарата по глубине [6]:

$$\delta_z(t) = \delta_z^* + k_1 \bar{y}_c(t - t_1) + k_2(\psi(t - t_1) - \psi^*) - k_3 \omega_z(t - t_1), \quad (8)$$

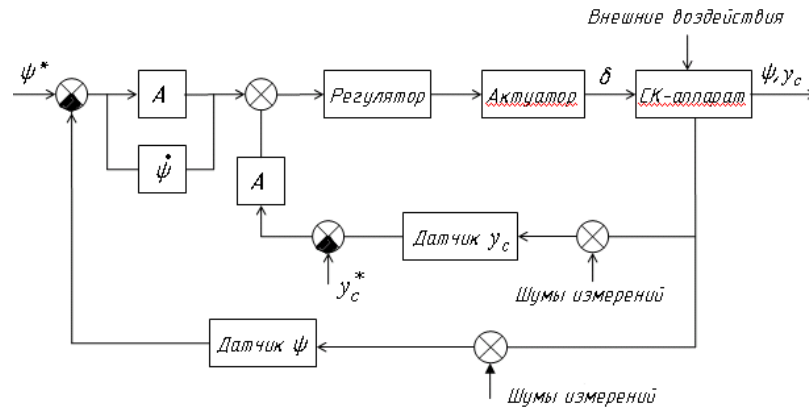


Рис. 3. Схема двухконтурной системы δ -стабилизации движения СК-аппарата по глубине

где k_1, k_2, k_3 – неотрицательные коэффициенты обратной связи; $\bar{y}_c = y/L$ – отклонение центра масс аппарата от горизонтальной траектории; ω_z – угловая скорость относительно поперечной оси аппарата. Для данной модели в расчетах использовались значения коэффициентов $k_1 = 2.0, k_2 = 5.0, k_3 = 0$. На рис. 3 показана структурная схема системы автоматической δ -стабилизации движения СК-аппарата по глубине по закону (8) с двумя контурами обратной связи и двумя усилителями A .

Пример 1. Стабилизация нулевого угла крена при f -управлении СК-аппаратом. На рис. 4, а, б представлены графики изменения угла отклонения руля крена модели δ_{fb} (а) и соответствующих достигнутых значений угла крена θ (б) на начальном интервале $0 < t < 5.0$ с при работе системы автоматической θ -стабилизации угла крена $\theta = 0$. Расчеты проводились при следующих значениях параметров управления: $\delta_{fv} = 5.0^\circ$; $u_1 = 0.1$; $u_2 = 0.3$; $\delta_{fu1} = 10.0^\circ$.

Как видно, после окончания переходного процесса обе функции $\delta_{fb}(t), \theta(t)$ принимают форму установившихся квазипериодических колебаний с основной частотой 6.80 Гц. При этом достигаются параметры маневра $\dot{\chi}_m = 7.645^\circ/\text{с}$, $r = 0.888$ км.

Для сравнения заметим, что при отсутствии θ -стабилизации нулевого угла крена движение модели в этом примере продолжается только 0.3 с, после чего модель оказывается замытой водой. При этом угол крена модели в момент $t = 0.3$ с составил $\theta = 140^\circ$.

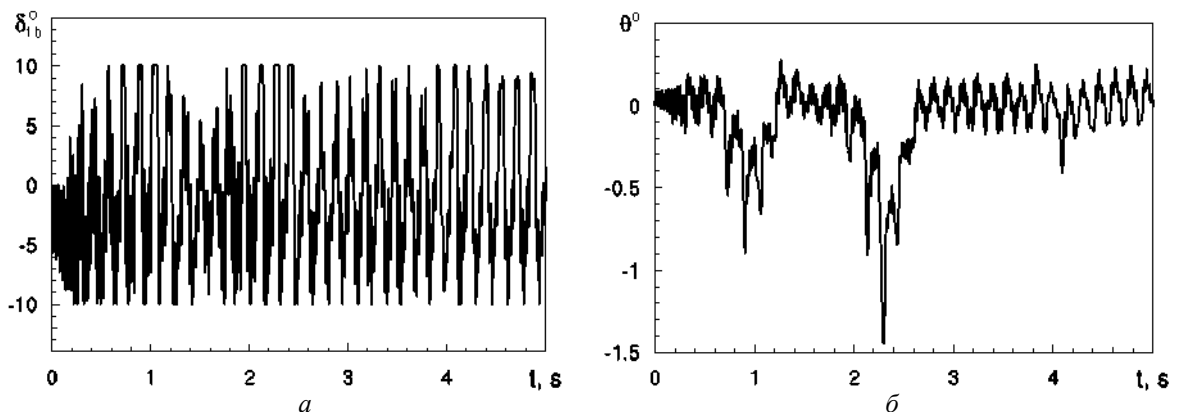


Рис. 4. Работа системы автоматической стабилизации нулевого угла крена СК-аппарата: а – $\delta_{fb}(t)$; б – $\theta(t)$

Пример 2. Установление и стабилизация заданного угла крена СК-аппарата. Будем теперь считать, что вертикальные рули у СК-аппарата отсутствуют, и рассмотрим работу системы автоматического установления и стабилизации заданного угла крена по алгоритму, описанному выше в Разделе 4.

На рис. 5, а представлен график зависимости угла отклонения руля крена модели δ_{fb} от времени при работе системы автоматического установления и стабилизации угла крена $\theta_2 = 15.0^\circ$. Расчеты проводились при следующих значениях основных параметров: $\theta_1 = 17.6^\circ$; $t_{beg} = 1.0$ с; $u_1 = 0.1$, $u_2 = 0.3$; $\delta_{fu1} = 10.0^\circ$. График соответствующего изменения угла крена θ представлен на рис. 5, б.

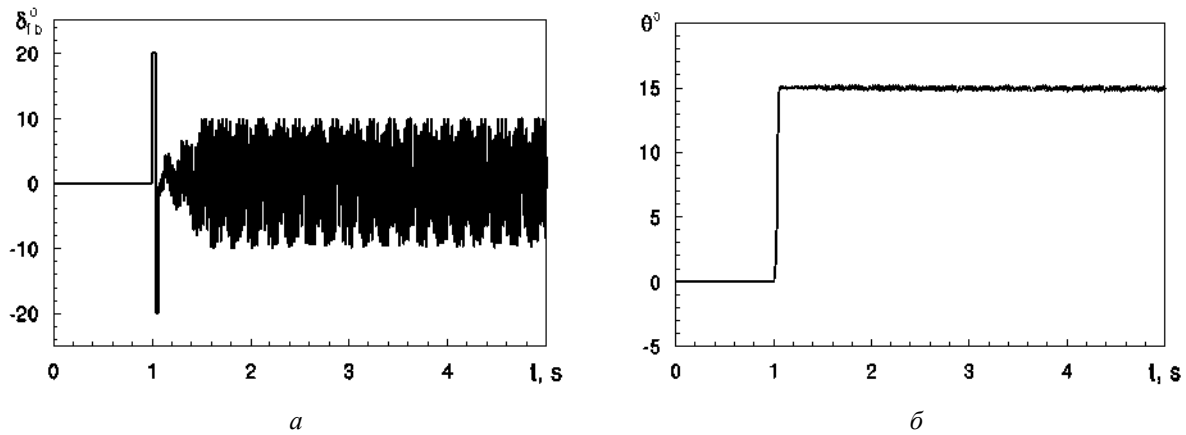


Рис. 5. Работа системы автоматического установления и стабилизации заданного угла крена $\theta = 15.0^\circ$: а – $\delta_{fu}(t)$; б – $\theta(t)$

Пример 3. Маневрирование СК-аппарата по курсу с помощью θ -управления. Исследуем эффективность θ -управления движением СК-аппарата при его маневрировании по курсу. В таблице 1 приведены результаты расчета средней скорости поворота модели по курсу $\dot{\chi}_m$ и радиуса циркуляции r для ряда значений угла крена θ . Расчеты для каждой колонки таблицы 1 проводились при постоянном значении угла крена модели θ на дистанции 1.0 км при $x_c = 2.5$ м и $h_M = 0$.

Таблица 1

Зависимость скорости поворота СК-аппарата и радиуса циркуляции от угла крена

θ°	0	2.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0
$\dot{\chi}_m, \text{ }^\circ/\text{с}$	0	-0.417	-0.743	-0.849	-1.715	-2.711	-3.942
$r, \text{ км}$	∞	37.5	16.5	8.09	4.01	2.54	1.74

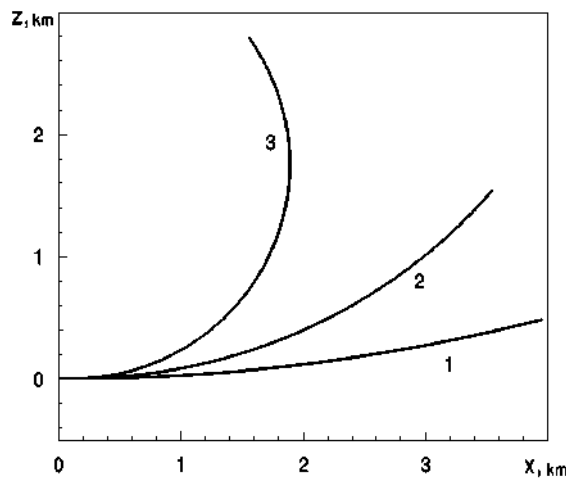


Рис. 6. Формы траектории СК-аппарата при θ -управлении:

$$1 - \theta_2 = 6.61^\circ; \quad 2 - \theta_2 = 20.85^\circ; \quad 3 - \theta_2 = 44.24^\circ$$

На рис. 6 показаны рассчитанные формы траекторий центра масс модели (проекция на горизонтальную плоскость) на дистанции 4.0 км при θ -управлении для ряда значений регулируемого угла крена θ_2 . Сравнение с [5] показывает, что θ -управление движением СК-аппарата для его маневрирования по курсу так же эффективно, как δ -управление.

Выводы

Предложен новый метод активной стабилизации самодвижущихся СК-аппаратов по крену с помощью специального донного руля крена и автоматической системы управления с обратной связью. Показано, что стабилизация нулевого угла крена необходима при маневрировании СК-аппаратов по курсу с помощью f -управления.

Тот же метод может быть использован для θ -управления движением высокоскоростного подводного СК-аппарата по курсу путем установления заданного угла крена θ_2 и дальнейшей автоматической стабилизации этого угла.

Поскольку при θ -управлении движением СК-аппарата активным управляющим элементом является кавитатор, то θ -управление обладает теми же достоинствами и ограничениями, что и δ -управление [9]. В результате сравнительного анализа достоинств и недостатков каждого из рассмотренных четырех методов управления движением СК-аппарата по курсу можно сделать вывод, что предложенный метод θ -управления является достаточно эффективным и в пределах своей эффективности является оптимальным.

Список использованной литературы

1. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами / Г.В. Логвинович. – Киев: Наукова думка, 1969. – 208 с.
2. Dzielski J. A benchmark control problem for supercavitating vehicles and an initial investigation of solution / J. Dzielski, A. Kurdila // Journal of Vibration and Control, 2003, 19(7), pp. 791–804.
3. Kirschner I. Control strategies for supercavitating vehicles / I. Kirschner, D.C. Kring, A.W. Stokes, N.E. Fine, J.S. Uhlman // Journal of Vibration and Control, 2002, Vol. 8, pp. 219 – 242.
4. Ruzzene M. Trajectory optimization strategies for supercavitating underwater vehicles / M. Ruzzene, R. Kamada, C.L. Botasso, F. Scorcelletti // Journal of Vibration and Control, 2008, 14(5), pp. 611–644.
5. Савченко Ю.Н. О маневренности по курсу подводных суперкавитирующих аппаратов / Ю.Н. Савченко, В.Н. Семенов // Прикладна гідромеханіка. – 2011. – Т. 13, № 1. – С.43–50.
6. Semenenko V.N. Study of the supercavitating body dynamics / V.N. Semenenko, Ye.I. Naumova // In book: Supercavitation: Advances and Perspectives. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 2012, pp. 147–176.
7. Semenenko V.N. Prediction of supercavitating vehicle maneuvering / V.N. Semenenko // Proceedings of the 11th International Scientific School "High Speed Hydrodynamics & Shipbuilding (HSH-2013)", 20–26 June 2013, Cheboksary, Russia.
8. Савченко Ю.Н. Особенности маневрирования при суперкавитационном обтекании / Ю.Н. Савченко, В.Н. Семенов, Г.Ю. Савченко // Прикладна гідромеханіка. – 2016. – Т. 18, № 1. – С.79–82.
9. Semenenko V.N. Artificial cavitation. Physics and calculations / V.N. Semenenko // VKI Special Course on Supercavitating Flows. – RTO EN-010, VKI, Brussels, Belgium, 2001.
10. Savchenko Yu.N. Control of supercavitation flow and stability of supercavitating motion of bodies / Yu.N. Savchenko // VKI Special Course on Supercavitating Flows. – RTO EN-010, VKI, Brussels, Belgium, 2001.
11. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами / В.А.Боднер. – М.: Машиностроение, 1973. – 506 с.
12. Лукомский Ю.А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю.А. Лукомский, В.С. Чугунов. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.