

УДК 532.528:681.513

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ АППАРАТОВ

В. Н. СЕМЕНЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 05.10.2009

Проведен анализ устойчивости горизонтального движения подводных суперкавитирующих аппаратов и способов его стабилизации. Метод исследования – компьютерное моделирование динамики самодвижущегося суперкавитирующего аппарата с использованием аппроксимационной модели нестационарной суперкаверны Г. В. Логвиновича. Показано, что движение суперкавитирующего аппарата является неустойчивым по глубине, причем его поведение оказывается различным в зависимости от положения центра масс. Исследована эффективность активной стабилизации движения суперкавитирующего аппарата путем автоматического регулирования угла наклона кавитатора при линейном законе обратной связи.

Проведено аналіз стійкості горизонтального руху підводних суперкавітуючих апаратів і способів його стабілізації. Метод дослідження – комп'ютерне моделювання динаміки саморушного суперкавітуючого апарату з використанням аппроксимационної моделі нестационарної суперкаверни Г. В. Логвиновича. Показано, що рух суперкавітуючого апарату є нестійким за глибиною, причому його поведінка виявляється різною в залежності від положення центру мас. Досліджена ефективність активної стабілізації руху суперкавітуючого апарату шляхом автоматичного регулювання кута нахилу кавитатора при лінійному законі зворотнього зв'язку.

Stability of horizontal motion of the underwater supercavitating vehicles and methods of its stabilization are analysed numerically. An investigation method consists in the computer simulation of dynamics of a supercavitating self-propelled vehicle with using the approximation model of an unsteady supercavity by G.V. Logvinovich. It is shown that the supercavitating vehicle motion is unstable per the depth, and the vehicle behaviour turns out different in dependence on its mass center position. An effectiveness of active stabilization of the supercavitating vehicle motion by an automatic control of a cavitator slope angle with the linear feedback law is investigated.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в разных странах активно ведутся работы по созданию подводных аппаратов, движущихся со скоростями порядка ста и более метров в секунду. Единственный путь достижения таких скоростей в воде – организация движения в режиме суперкавитации, когда вокруг тела с помощью специального носового кавитатора образуется полость, заполненная водяным паром или газом [1, 2]. Основными параметрами подобия суперкавитационных (СК) течений являются числа кавитации и Фруда:

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

где p_∞ – давление в невозмущенном потоке; p_c – давление в каверне; V – скорость аппарата; D_n – диаметр кавитатора. Суперкавитационному режиму соответствуют значения числа кавитации $\sigma < 0.1$. Оценки показывают, что при $\sigma < 0.06$ СК-аппарат испытывает меньшее сопротивление, чем тот же аппарат при сплошном обтекании, причем эффективность СК-обтекания быстро возрастает при уменьшении σ [3].

Процесс проектирования самодвижущихся СК-аппаратов имеет ряд специфических особенностей

[2, 4], требующих глубокого понимания происходящих при их движении гидродинамических процессов. СК-аппараты формируют внутри жидкости свободную границу, которую можно использовать для компенсации веса аппарата, стабилизации и управления движением. Однако в результате гидродинамического взаимодействия корпуса аппарата со стенками каверны форма каверны и траектория движения искажаются, а движение может быть неустойчивым.

При решении задач динамики СК-тел требуются методы расчета нестационарных суперкаверн, которые разработаны недостаточно. За последние годы опубликован ряд работ, посвященных проблемам динамики, стабилизации и управления движением СК-аппаратов (см. например [5–11]), в которых используются математические модели стационарной суперкаверны.

Цель данной работы – анализ устойчивости и способов стабилизации продольного движения СК-аппарата. Метод исследования – компьютерное моделирование динамики самодвижущегося СК-аппарата с использованием наиболее полной в настоящее время аппроксимационной модели нестационарной суперкаверны, основанной на принципе независимости расширения сечений суперкаверны Г. В. Логвиновича [12]. Ранее мы успешно

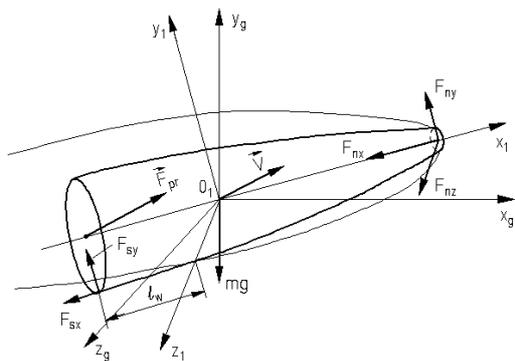


Рис. 1. Схема пространственного движения СК-аппарата

использовали эту математическую модель для исследования динамики СК-тел, движущихся в воде по инерции [4, 13].

1. УРАВНЕНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СК-АППАРАТА

При постановке общей пространственной задачи расчета динамики самодвижущегося СК-аппарата примем следующие допущения:

- 1) корпус аппарата имеет форму тонкого тела вращения;
- 2) форма кавитатора – диск диаметром D_n ;
- 3) тяга движителя F_{pr} постоянна по величине.

На рис. 1 представлена схема пространственного движения СК-аппарата, обтекаемого в режиме глиссирования в суперкаверне. На схеме показаны связанная система координат $O_1x_1y_1z_1$ и полусвязанная система координат $O_1x_gy_gz_g$. Начало обеих систем координат находится в центре масс аппарата O_1 . Направление осей полусвязанной системы координат совпадает с направлением осей неподвижной системы координат.

Как и в случае летательных аппаратов, общее пространственное движение СК-аппарата удобно разделить на продольное и боковое движения [14]. Продольным называется движение в вертикальной плоскости (вращение вокруг оси O_1z_1 и поступательное движение в направлении осей O_1x_1 и O_1y_1). Продольное движение можно рассматривать независимо от бокового. Исследование продольного движения является основной проблемой для СК-аппаратов, так как оно определяет устойчивость движения аппарата по глубине. При постановке задачи продольного движения примем дополнительно к перечисленным выше следующие допущения:

- 4) движение аппарата происходит в вертикальной плоскости;
- 5) вращение аппарата относительно продольной оси отсутствует;
- 6) масса m , положение центра масс x_c и момент инерции I_z аппарата не изменяются во время движения.

Тогда из двенадцати уравнений общего пространственного движения твердого тела [15] остаются шесть. Переходя в них к дифференцированию по продольной абсолютной координате x , получаем расчетную систему пяти дифференциальных уравнений продольного движения СК-аппарата:

$$V \cos(\psi - \alpha) \frac{dV_{x1}}{dx} = \omega_z V_{y1} + \frac{1}{m} \Sigma F_{x1}, \quad (2)$$

$$V \cos(\psi - \alpha) \frac{dV_{y1}}{dx} = -\omega_z V_{x1} + \frac{1}{m} \Sigma F_{y1}, \quad (3)$$

$$V \cos(\psi - \alpha) \frac{d\omega_z}{dx} = \frac{1}{I_z} \Sigma M_{z1}, \quad (4)$$

$$V \cos(\psi - \alpha) \frac{d\psi}{dx} = \omega_z, \quad (5)$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \text{tg}(\psi - \alpha), \quad (6)$$

где $V = \sqrt{V_{x1}^2 + V_{y1}^2}$; $\alpha = -\text{arctg} V_{y1}/V_{x1}$ – угол атаки; ψ – угол тангажа; y_c – отклонение центра масс от горизонтальной траектории. При этом для любого x истекшее время рассчитывается по формуле:

$$t = \int_0^x \frac{ds}{V \cos(\psi - \alpha)}. \quad (7)$$

Правые части уравнений (2), (3) включают проекции гидродинамической силы на кавитаторе \vec{F}_n , силы глиссирования \vec{F}_s , силы тяги движителя \vec{F}_{pr} и управляющей силы \vec{F}_c (если она присутствует):

$$\Sigma F_{x1} = F_{nx} + F_{sx} + F_{pr} \cos \eta_z - mg \sin \psi + F_{cx}, \quad (8)$$

$$\Sigma F_{y1} = F_{ny} + F_{sy} + F_{pr} \sin \eta_z - mg \cos \psi + F_{cy}, \quad (9)$$

где $F_{pr} = |\vec{F}_{pr}|$ – тяга движителя; η_z – угол отклонения вектора тяги. Правая часть уравнения (4) включает проекции моментов всех перечисленных сил относительно центра масс аппарата.

Компоненты силы \vec{F}_n , действующей на дисковый кавитатор, в поточной системе координат рассчитываются по формулам [1]:

$$\begin{aligned} F_{nx0} &= -F_{x0} \cos(\alpha_n + \delta) \cos(\alpha + \delta), \\ F_{ny0} &= -F_{x0} \cos(\alpha_n + \delta) \sin(\alpha + \delta), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\alpha_n = \alpha + \omega_z x_c / V_{x1}$; δ - угол наклона нормали к кавитатору к оси аппарата; $F_{x0} = 0,82(1 + \sigma)$ - сопротивление кавитатора, перпендикулярного к потоку. Компоненты той же силы в связанной системе координат вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} F_{nx} &= -F_{x0} \cos(\alpha_n + \delta) \cos \delta, \\ F_{ny} &= -F_{x0} \cos(\alpha_n + \delta) \sin \delta. \end{aligned} \quad (11)$$

Для расчета формы нестационарной каверны используем уравнение расширения сечения каверны [12], которое является выражением принципа независимости расширения сечений каверны Г.В.Логвиновича [1]:

$$\frac{\partial^2 S_c(\tau, t)}{\partial t^2} = -\frac{k_1(p_\infty - p_c)}{\rho}, \quad (12)$$

$$x(t) - L_c(t) \leq \xi \leq x(t), \quad S_c(\tau, \tau) = \pi D_n^2 / 4,$$

$$\frac{\partial S_c(\tau, \tau)}{\partial t} = \frac{k_1 A}{4} D_n V(\tau) \sqrt{c_x}, \quad k_1 = \frac{4\pi}{A^2},$$

где S_c - площадь сечения каверны с абсциссой $\xi(\tau)$; $\tau \leq t$ - момент образования сечения ξ ; L_c - длина каверны; $A \approx 2$ - эмпирическая константа.

Форма оси каверны определяется траекторией центра кавитатора. Дополнительно она искривляется под действием сил весомости и подъемной силы на кавитаторе. Эти эффекты приближенно учитываются с помощью аппроксимационных формул [16]:

$$\bar{h}_g(x) = \frac{(1 + \sigma)\bar{x}^2}{3Fr_l^2}, \quad Fr_l = \frac{V}{\sqrt{gL_c}}, \quad (13)$$

$$h_f(x) = -c_{ny} \frac{D_n}{2} \left(0.46 - \sigma + \frac{\bar{x}}{2} \right), \quad (14)$$

где $\bar{h}_g = h_g / L_c$; $\bar{x} = x / L_c$. Кормовая сила глиссирования F_{sy} в каждый момент времени определяется взаимным положением корпуса аппарата и границы каверны и вычисляется по формуле [17]:

$$F_{sy} = \rho \pi R_s^2 V \left[V_1 \frac{\bar{h}(2 + \bar{h})}{(1 + \bar{h})^2} + V_2 \frac{2\bar{h}}{1 + \bar{h}} \right], \quad (15)$$

где R_s - радиус кормового среза (транца) аппарата; V_1 - относительная поперечная скорость транца и каверны; V_2 - относительная скорость изменения радиусов каверны и тела; $\bar{h} = h / (R_c - R_s)$, h - погружение транца; R_c - радиус каверны в районе транца. Продольная компонента силы глиссирования F_{sx} имеет вязкостную природу и рассчитывается по формуле

$$F_{sx} = \frac{\rho V^2}{2} S_w c_f(\text{Re}), \quad \text{Re} = \frac{l_w V}{\nu}, \quad (16)$$

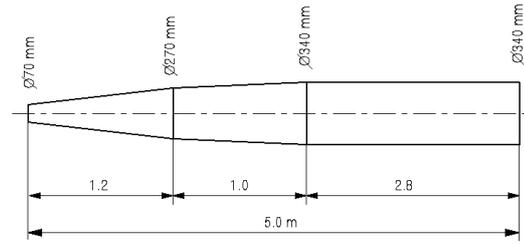


Рис. 2. Форма расчетной модели СК-аппарата

где c_f - коэффициент сопротивления трения; l_w и S_w - соответственно длина и площадь смоченной поверхности корпуса аппарата.

Система пяти дифференциальных уравнений (2)–(6) интегрировалась численно при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} V_{x1}(0) &= V_0, \quad V_{y1}(0) = 0, \quad \omega_z(0) = \omega_{z0}, \\ \psi(0) &= \psi_0, \quad y_c(0) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СК-АППАРАТА

Математическая модель (2)–(17) является нелинейной, содержит разрывные функции и функции запаздывающего аргумента. Ее аналитическое исследование возможно только в простейших случаях. Здесь мы приводим результаты ее численного анализа, полученные путем компьютерного моделирования динамики СК-аппарата с помощью разработанной нами программы **SC_Design** [4]. Для определенности все расчеты проводились для единой “стандартной” модели СК-аппарата, имеющей следующие параметры: длина корпуса $L = 5$ м; кавитатор - диск диаметром $D_n = 70$ мм; наибольший диаметр $D_s = 340$ мм; масса аппарата $m = 600$ кг; момент инерции относительно центра масс $I_z = 900$ кг м².

Предполагается, что модель движется горизонтально на глубине $H_m = 5$ м с постоянной скоростью $V_m = 120$ м/с. При этом числа кавитации и Фруда (1) равны $\sigma = 0.0201$ и $Fr = 144.8$, длина каверны - $L_c = 6.5$ м. Форма корпуса “стандартной” модели СК-аппарата спроектирована таким образом, чтобы она двигалась в экономичном режиме глиссирования в суперкаверне (см. рис. 2).

Для принятых параметров расчет дает необходимую величину тяги движителя СК-аппарата, равную суммарному сопротивлению $F_{pr} = 23,29$ кН, при этом движитель должен развивать буксировочную мощность

$P = F_{pr} V_m = 2.80$ МВт. Такие высокие параметры обеспечиваются ракетными двигателями на твердом или гидрореагирующем топливе, а также газотурбинными роторными движителями [2].

3. НАХОЖДЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ

Поскольку при СК-обтекании аппарата в режиме глиссирования в суперкаверне гидростатическая сила практически отсутствует, вес аппарата должен быть скомпенсирован гидродинамическими силами F_{ny} и F_{sy} , создаваемыми соответственно путем наклона кавитатора на угол δ и в результате глиссирования кормовой части аппарата по нижней стенке каверны. Дополнительная подъемная сила на кормовом срезе может быть получена путем отклонения вектора тяги движителя \vec{F}_{pr} на угол η_z относительно оси аппарата. При установившемся горизонтальном движении сумма вертикальных проекций этих трех сил должна равняться весу аппарата, а суммарный момент этих сил относительно центра масс должен равняться нулю:

$$F_{pr} \cos(\eta_z + \psi) - F_{nx0} - F_{sx} \cos \psi = 0, \quad (18)$$

$$F_{ny0} + F_{sy} \cos \psi + F_{pr} \sin(\eta_z + \psi) - mg = 0, \quad (19)$$

$$F_{ny} x_c - (F_{sy} + F_{pr} \sin \eta_z)(L - x_c) = 0. \quad (20)$$

Из формул (10) и (11) следует связь между проекциями силы на кавитаторе F_{ny} и F_{ny0} :

$$F_{ny} = F_{ny0} \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \psi)}. \quad (21)$$

Из уравнений (19), (20) с учетом (21) получаем соотношения для необходимых для баланса аппарата сил на кавитаторе и на транце:

$$F_{ny0}^* = \frac{mg - F_{pr} \cos \eta_z \sin \psi}{1 + \frac{\sin \delta \cos \psi}{\sin(\delta + \psi)} \frac{x_c}{L - x_c}}, \quad (22)$$

$$F_{sy}^* = F_{ny0}^* \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \psi)} \frac{x_c}{L - x_c} - F_{pr} \sin \eta_z. \quad (23)$$

В случае фиксированного угла η_z равновесные значения углов δ^* и ψ^* находятся численно с помощью итерационного процесса. Для очередного приближения $\delta^{(i)}$, $\psi^{(i)}$ вычисляются коэффициенты сил $c_{ny0}^{(i)}$ и $c_{sy}^{(i)}$ по формулам (22), (23). Уравнение (10) позволяет исключить одну из двух неизвестных:

$$\psi^{(i+1)} = -\delta^{(i+1)} + \frac{1}{2} \arcsin \left(-\frac{2c_{ny0}^{(i)}}{c_x} \right). \quad (24)$$

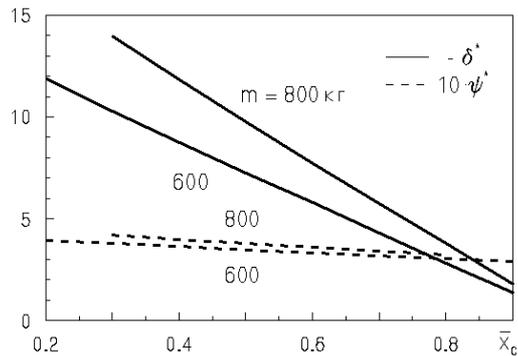


Рис. 3. Равновесные значения углов δ^* и ψ^*

Тогда на каждой итерации задача сводится к нахождению корня уравнения:

$$f(\delta^{(i+1)}) = c_{sy}^{(i+1)} - c_{sy}^{(i)} = 0. \quad (25)$$

Аналогичным образом находятся равновесные значения углов δ^* и η_z^* в случае фиксированного угла ψ .

На рис. 3 приведены расчетные зависимости $\delta^*(\bar{x}_c)$ и $\psi^*(\bar{x}_c)$ при $\eta_z = 0$ для двух значений массы аппарата (на графиках углы нанесены в градусах).

4. НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СК-АППАРАТА

Найденные равновесные значения углов δ^* , η_z^* и ψ^* соответствуют стационарному решению (стационарной точке) динамической системы (2)–(6). Стандартный путь рассмотрения устойчивости стационарного решения динамической системы состоит в ее линеаризации и исследовании корней характеристического уравнения. Для системы (2)–(6) такой анализ затруднителен, поэтому приходится судить об устойчивости СК-аппарата по результатам компьютерного моделирования его движения при равновесных начальных условиях:

$$\delta(0) = \delta^*, \quad \eta_z(0) = \eta_z^*, \quad \psi(0) = \psi^*.$$

Проведенные расчеты показали, что неуправляемое движение сбалансированного СК-аппарата всегда неустойчиво, причем неустойчивость проявляется как в возникновении и росте угловых колебаний аппарата, так и в росте отклонения центра масс аппарата от горизонтальной траектории. Поведение аппарата после потери устойчивости

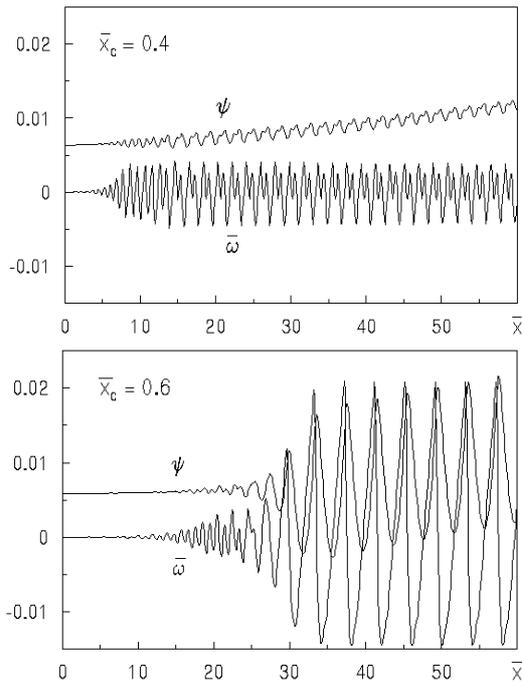


Рис. 4. Потеря устойчивости движения СК-аппарата

существенно зависит от его динамических параметров. На рис. 4 показано развитие угловых колебаний СК-аппарата при двух положениях его центра масс x_c . На рисунках обозначено $\bar{x} = x/L$; $\bar{x}_c = x_c/L$; $\bar{\omega} = \omega_z L/V_0$. Угол тангажа ψ измеряется в радианах.

Амплитуда угловых колебаний аппарата растет до тех пор, пока их не начинает ограничивать противоположная стенка каверны. После этого аппарат продолжает колебаться в каверне с приблизительно постоянной частотой f , которую естественно назвать собственной частотой СК-аппарата. На рис. 5 показана зависимость приведенной собственной частоты аппарата $k = 2\pi fL/V_0$ от безразмерного положения центра масс \bar{x}_c . Там же нанесены отклонения центра масс аппарата y_c (в метрах) в конце дистанции $\bar{x} = 60$.

Как видно, собственная частота и отклонение центра масс СК-аппарата существенно зависят от положения центра масс. При этом значение $\bar{x}_c = 0.5$ приблизительно делит область изменения функций на две зоны. При $\bar{x}_c < 0.5$ аппарат совершает сложные колебания с высокой частотой (см. рис. 4, а). При $\bar{x}_c > 0.5$ угловые колебания аппарата близки к простым периодическим (см. рис. 5, б), при этом их частота падает, а отклонение центра масс y_c растет. Расчеты показывают, что для любого значения x_c можно указать та-

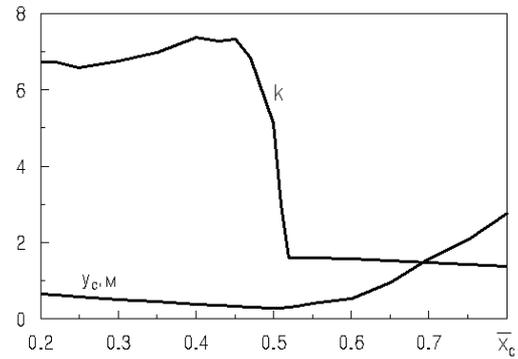


Рис. 5. Собственные частоты и отклонения центра масс неуправляемого СК-аппарата

кую дистанцию, что отклонение СК-аппарата превысит любую наперед заданную величину. Со временем неуправляемый СК-аппарат обычно выходит на поверхность воды. Например, при $\bar{x}_c = 0.4$ и $\bar{x}_c = 0.6$ “стандартная” модель СК-аппарата выходит на поверхность, пройдя в воде дистанцию соответственно $\bar{x} = 146.3$ и $\bar{x} = 131.6$.

5. СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СК-АППАРАТА

Система стабилизации СК-аппарата должна решать две задачи: 1) превратить неустойчивое движение СК-аппарата в устойчивое; 2) компенсировать воздействие всевозможных возмущений. В упоминавшихся выше работах [5–11], посвященных проблеме стабилизации движения СК-аппаратов по глубине, используются методы линейной теории систем автоматического управления (САУ), применяемые в авиации [14].

Однако система уравнений динамики СК-аппарата (2)–(6) не допускает линеаризацию без потери своих ключевых свойств. Причинами являются сложное нестационарное поведение каверны и разрывный характер кормовой силы глиссирования. В каждый момент времени кормовая сила глиссирования определяется положением аппарата и формой каверны. Уравнения для формы нестационарной каверны содержат запаздывающий аргумент из-за конечности скорости распространения возмущений вдоль каверны и включают в себя историю движения аппарата (так называемый “эффект памяти” каверны). Упрощенные линеаризованные модели СК-аппарата, которые используются в работах [5–11], не учитывают эти важные особенности. Потому полученные в них ре-

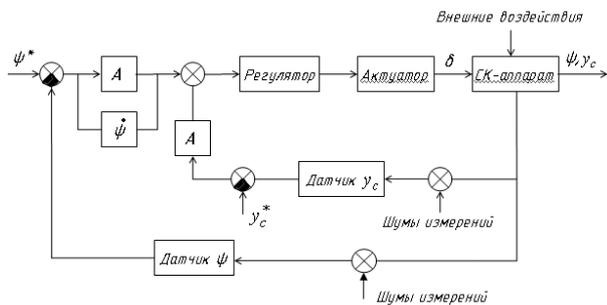


Рис. 6. Схема двухконтурной САУ СК-аппарата

зультаты имеют, строго говоря, лишь качественный характер. Единственным надежным методом анализа способов стабилизации СК-аппарата является компьютерное моделирование его динамики на основе полной нелинейной системы уравнений.

Примем закон автоматического регулирования угла наклона кавитатора δ , содержащий члены, пропорциональные y_c (регулирование по глубине), ψ (регулирование по тангажу), а также демпфирующий член, пропорциональный угловой скорости аппарата $\omega = \dot{\psi}$ [14]. Введем в него также время задержки реакции исполнительного устройства t_1 , которое присуще всякой реальной САУ:

$$\delta(t) = \delta^* + k_1 \bar{y}_c(t-t_1) + k_2 [\psi(t-t_1) - \psi^*] + k_3 \bar{\omega}(t-t_1), \quad (26)$$

где k_1, k_2, k_3 – неотрицательные коэффициенты обратной связи (передаточные числа регулятора). В формуле (26) обозначено $\bar{y}_c = y_c/L$; $\bar{\omega} = \dot{\psi}L/V_0$; углы измеряются в радианах. На рис. 6 показана структурная схема системы автоматической стабилизации СК-аппарата по глубине по закону (26) с двумя контурами обратной связи и двумя усилителями A . В схеме отражено влияние внешних воздействий на СК-аппарат (например, морского волнения) и шумов измерений.

Поскольку конечной целью САУ является стабилизация СК-аппарата по глубине, положим сначала в законе обратной связи (26) $k_1 > 0, k_2 = 0, k_3 = 0$. На рис. 7 показана работа управляющего органа (кавитатора) при стабилизации СК-аппарата по отклонению y_c при $k_1 = 4$ и двух положениях центра масс аппарата. На графиках значения угла δ даны в градусах. Равновесные значения δ^* равны соответственно -8.764° и $-5,781^\circ$.

Как видим, поведение управляющего кавитатора существенно отличается для случаев $\bar{x}_c < 0.5$ и $\bar{x}_c > 0.5$, как и поведение неуправляемого СК-аппарата. В обоих случаях отклонения y_c на всей дистанции весьма малы, однако при этом разви-

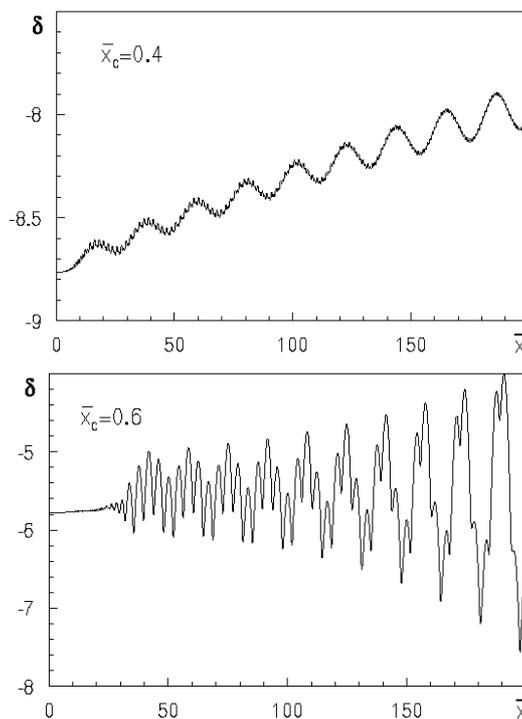


Рис. 7. Изменение управляющего угла δ при стабилизации по отклонению y_c

ваются возрастающие угловые колебания угла δ с относительно низкой частотой. При этом среднее значение угла тангажа ψ также непрерывно растет. Таким образом, автоматическое управление только по отклонению y_c не может обеспечивать стабилизацию движения СК-аппарата неограниченно долгое время.

Существенным недостатком регулирования по отклонению y_c является также то, что при движении СК-аппарата трудно измерять это отклонение с достаточной точностью. В то же время, существуют высокоточные электро-механические датчики измерения угловых отклонений. Поэтому далее рассмотрим автоматическое регулирование по отклонению угла тангажа ψ : $k_1 = 0, k_2 > 0, k_3 = 0$.

На рис. 8 показана работа кавитатора при стабилизации СК-аппарата по отклонению ψ при $k_2 = 3$ и двух положениях центра масс аппарата. Как видно, при $\bar{x}_c = 0.4$ кавитатор совершает угловые колебания постоянной амплитуды с растущим средним значением δ , а при $\bar{x}_c = 0.6$ – простые установившиеся колебания.

На рис. 9 показан результат стабилизации СК-аппарата по отклонению ψ . На рис. 9, а приведен фазовый портрет $\bar{\omega}(\psi)$ при $\bar{x}_c = 0.6, k_2 = 13$.

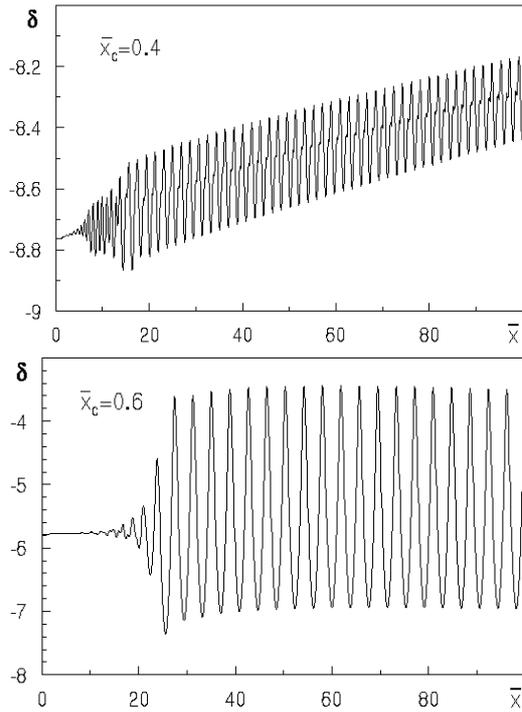


Рис. 8. Изменение управляющего угла δ при стабилизации по отклонению ψ

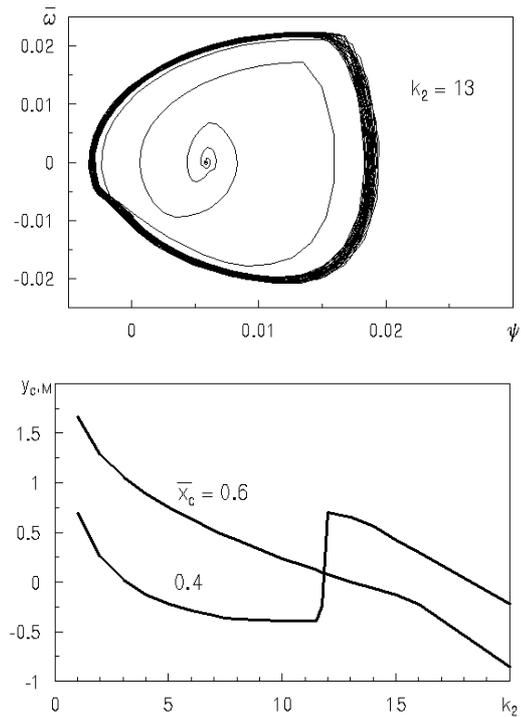


Рис. 9. Результат стабилизации по отклонению ψ а – фазовый портрет; б – отклонения центра масс

Как видно, САУ превращает неустановившиеся угловые колебания аппарата в установившиеся. На рис. 9, б приведена зависимость отклонения центра масс СК-аппарата в конце дистанции $\bar{x} = 100$ от передаточного числа k_2 .

Итак, при стабилизации по отклонению ψ СК-аппарат совершает установившиеся угловые колебания с частотой и амплитудой, которые слабо зависят от передаточного числа k_2 . Однако при этом отклонение центра масс аппарата непрерывно растет. Расчеты показывают, что оно растет еще быстрее при наличии внутренних и внешних возмущений. Таким образом, автоматическое управление только по отклонению ψ также не обеспечивает стабилизацию движения СК-аппарата неограниченно долгое время.

Можно улучшить качество стабилизации движения СК-аппарата, т. е. уменьшить максимальные отклонения y_c и ψ на заданной дистанции, применяя автоматическое регулирование одновременно по отклонениям y_c и ψ . На рис. 10 показан фазовый портрет в случае автоматического управления при $\bar{x}_c = 0.6$; $k_1 = 4.5$; $k_2 = 4.0$; $k_3 = 0$, иллюстрирующий влияние запаздывания реакции САУ. При $t_1 = 0$ фазовый портрет подобен рис. 9, а. При $t_1 = 0$ и $t_1 = 40$ мс амплитуда колебаний угла тангажа и отклонения центра масс аппарата оказа-

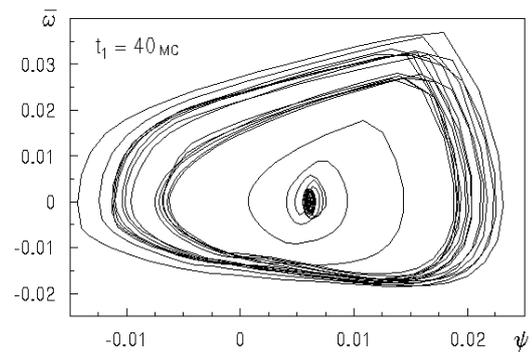


Рис. 10. Влияние запаздывания реакции САУ

лись практически одинаковыми. Приведенная частота и амплитуда управляющих колебаний составила $k = 3.46$, $A_\delta = 1.132^\circ$ при $t_1 = 0$ и $k = 4.56$, $A_\delta = 0.970^\circ$ при $t_1 = 40$ мс.

Как видно, наличие запаздывания реакции САУ при тех же значениях передаточных чисел не нарушает стабилизацию движения СК-аппарата. Рост t_1 приводит к увеличению частоты и уменьшению амплитуды колебаний аппарата.

Расчеты также подтвердили, что автоматическое регулирование по закону (26) обеспечивает

стабилизацию движения на заданной конечной дистанции при наличии внешних возмущений различной природы. При этом может быть полезным добавление демпфирующего члена $k_3 > 0$.

ВЫВОДЫ

Выполнен численный анализ устойчивости самодвижущегося СК-аппарата и способа активной стабилизации его движения по глубине путем автоматического регулирования угла наклона кавитатора. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Продольное движение неуправляемого СК-аппарата является неустойчивым. Неустойчивость проявляется в возникновении и росте угловых колебаний аппарата, а также в росте отклонения центра масс аппарата от горизонтальной траектории. Поведение аппарата после потери устойчивости может быть различным в зависимости от положения его центра масс и других параметров.

2. Задача стабилизации продольного движения СК-аппарата на конечной дистанции успешно решается путем введения автоматического регулирования угла наклона кавитатора δ при линейном законе обратной связи (26).

3. Оптимальные значения передаточных чисел k_1 , k_2 , k_3 должны определяться методом компьютерного моделирования для конкретного СК-аппарата при заданных длине дистанции и допустимых отклонениях аппарата по глубине.

1. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. – К.: Наук. думка, 1969. – 208 с.
2. Савченко Ю.Н. Исследования суперкавитационных течений // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – Т. 9, N 2-3. – С. 150–158.
3. Savchenko Yu.N., Semenenko V.N., Putilin S.I., and others. Designing the high-speed supercavitating vehicles. Proc. 8th International Conference on

fast sea transportation (FAST'2005). St. Petersburg, Russia. – 2005.

4. Semenenko V.N. Some problems of supercavitating vehicle designing. Proc. International Conference on superfast marine vehicles moving above, under and in water surface (SuperFAST'2008). St. Petersburg, Russia. – 2008.
5. Kirschner I., Kring D.C., Stokes A.W., Fine N.E., and Uhlman J.S. Control strategies for supercavitating vehicles // Journal of Vibration and Control. – 2002. – Vol. 8. – P. 219–242.
6. Dzielski J., and Kurdila A. A Benchmark Control Problem for Supercavitating Vehicles and an Initial Investigation of Solution // Journal of Vibration and Control. – 2003. – Vol. 19. – P. 791–804.
7. Lin G., Balachandran B., and Abed E.H. Nonlinear Dynamics and Bifurcations of a Supercavitating Vehicle // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2007. – Vol. 32, No. 4. – P. 753–761.
8. Balas G.J., Bokor J., Vanek B., and Arndt R.E.A. Control of High-speed underwater vehicles. In book: Control of Uncertain Systems, LNCIS 329. Berlin, Springer-Verlag, 2006, – P. 25–44.
9. Vanek B., Bokor J., Balas G.J., and Arndt R.E.A. Longitudinal Motion Control of a High-Speed Supercavitation Vehicle // Journal of Vibration and Control. – 2007. – 13(2). – P. 159–184.
10. Ruzzene M., Kamada R., Botasso C.L., and Scorcelletti F. Trajectory Optimization Strategies for Supercavitating Underwater Vehicles // Journal of Vibration and Control. – 2008. – 14(5). – P. 611–644.
11. Zhao X.-H., Mo H.-W., Sun Y. H_∞ control and simulation for underwater high-speed vehicle. Proc. International Conference on superfast marine vehicles moving above, under and in water surface (SuperFAST'2008). St. Petersburg, Russia. – 2008.
12. Semenenko V.N. Artificial cavitation. Physics and calculations. RTO-AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. VKI, Brussels, Belgium. – 2001.
13. Семенов В.Н. Компьютерное моделирование динамики суперкавитирующих тел // Прикладна гідромеханіка. – 2000. – Т. 2(77), N 1. – С. 64–69.
14. Боднер В.А. Системы управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1973. – 506 с.
15. Поляхов Н.Н., Зегжда С.А., Юшков М.П. Теоретическая механика. – М.: Высшая школа, 2000. – 592 с.
16. Буйвол В.Н. Тонкие каверны в течениях с возмущениями. – К.: Наук. думка, 1980. – 296 с.
17. Васин А.Д., Парышев Э.В. Погружение цилиндра в жидкость через цилиндрическую свободную поверхность // Известия АН СССР, Механика жидкости и газа. – 2001. – N 2. – С. 3–12.