

УДК 532.528

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ СУПЕРКАВИТИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

С. И. ПУТИЛИН

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 15.06.2000

Исследуется влияние конструктивных параметров суперкавитирующей модели на проходимое ею расстояние и на характер ее возмущенного движения. Показано, что применение двигателя позволяет повысить дальность только при использовании высокоэффективного топлива. Установлено, что характер возмущенного движения модели существенно зависит от зазора между кормовой частью модели и границей каверны. При большом зазоре типичная форма движения представляет собой установившиеся колебания с амплитудой и частотой, не зависящими от начальных условий. При малом зазоре возможны различные формы движения: неустойчивое движение, асимметричные стационарные колебания, нерегулярные колебания.

Досліджується вплив конструктивних параметрів суперкавітуючої моделі на відстань, що вона може подолати, і особливості її збуреного руху. Встановлено, що застосування двигуна дозволить збільшити проходиму відстань лише за умови застосування високоефективного палива. Також встановлено, що характер збуреного руху суттєво залежить від зазору між кормовою частиною моделі і границею каверни. При великих зазорах типова форма збуреного руху являє собою коливання з амплітудою і частотою, що не залежать від початкових умов. При малому зазорі можливі різноманітні форми руху: нестійкий рух, асиметричні стаціонарні коливання, нерегулярні коливання.

Influence of a supercavitating model design parameters on the model range and its perturbed motion features is investigated. It is shown, that a propulsive device can increase the model range if high-efficient fuel were used only. The model perturbed motion depends on clearance between the model stern part and a cavity wall. If clearance is grate, the motion is stationary oscillation, amplitude and frequency being independent on initial conditions. Different forms of motion are possible if clearance is small: unstable motion, stationary asymmetric oscillation, irregular oscillation.

ВВЕДЕНИЕ

Движение свободных суперкавитирующих моделей существенно отличается от движения моделей обычного типа при сплошном обтекании.

Различие определяется тем, что большая часть суперкавитирующей модели не взаимодействует с набегающим потоком и гидродинамические силы возникают только на переднем конце модели (кавитаторе) и вблизи ее заднего конца. Более того, задний конец модели может в течение значительных промежутков времени не касаться границ каверны или иметь с ними лишь кратковременные периодические контакты.

Практический интерес представляют два аспекта проблемы: расстояние, проходимое моделью по инерции, и устойчивость ее движения.

РАССТОЯНИЕ, ПРОХОДИМОЕ МОДЕЛЬЮ

Сопротивление движению суперкавитирующей модели, полностью охватываемой каверной, равно сопротивлению кавитатора и рассчитывается по формуле

$$R_x = \frac{\rho V^2}{2} c_{xn} S_n, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; V – скорость модели; S_n – площадь кавитатора; c_{xn} – его коэффициент сопротивления (для диска $c_{xn} = 0.82(1 + \sigma)$, где σ – число кавитации [1]). При малых числах кавитации c_{xn} можно считать постоянным. Тогда уравнение движения модели, масса которой равна m , запишется в виде

$$\frac{dV}{dt} = -kV^2, \quad (2)$$

где

$$k = \frac{\rho c_{xn} S_n}{2m}. \quad (3)$$

Его решение дает зависимость пройденного пути S от скорости в виде:

$$S(V) = \frac{1}{k} \ln \frac{V_0}{V}, \quad (4)$$

где V_0 – начальная скорость модели.

Отсюда следует, что модель движется бесконечно долго и проходит бесконечно большое расстояние. Для того, чтобы расчет дальности имел смысл, необходимо установить критерии, по которым определяется конечная точка пути.

Таковыми критериями могут быть снижение скорости до определенной величины, уменьшение кинетической энергии модели до определенной величины или исчезновение зазора между моделью и

стенками каверны. Поскольку второй и третий критерии однозначно определяют значение конечной скорости, можно считать, что непосредственное ее задание является наиболее простым и универсальным способом определения дальности.

При заданном отношении начальной и конечной скорости дальность зависит от массы модели m и радиуса кавитатора r_n , определяющего сопротивление движению. Поскольку модель должна размещаться в каверне, ее максимально возможная масса m зависит от плотности материала ρ_b , длины модели L и поперечных размеров каверны, определяемых тем же радиусом кавитатора.

Эти три независимые величины и определяют то максимальное расстояние, которое модель может пройти по инерции.

Существенно, что масса модели растет быстрее, чем L , но медленнее, чем r_n^2 . В этом можно убедиться, аппроксимировав форму каверны зависимостью вида [2]

$$r(x) = r_n \left(\frac{x}{r_n} \right)^\beta, \quad (5)$$

где $\beta < 0$ для выпуклой каверны. Тогда объем передней части каверны длиной L определится зависимостью

$$W(r_n, L) = \frac{\pi}{1 + 2\beta} r_n^{2(1-\beta)} L^{1+2\beta}. \quad (6)$$

Следовательно, при фиксированной длине и возрастающем радиусе кавитатора сопротивление растет быстрее, чем масса, коэффициент k в уравнении (2) увеличивается и дальность падает.

Исследование влияния параметров суперкавитирующих моделей на дальность проводилось путем численного моделирования их движения с помощью программы SCAV13, разработанной в ИГМ НАН Украины. Эта программа позволяет рассчитать:

- характеристики (объем, массу и т.п.) модели, составленной из трех усеченных конусов;
- размеры стационарной каверны, образованной кавитатором модели при заданной скорости и глубине хода и зазоры между моделью и границей каверны;
- зависимость скорости модели от пройденного пути для суперкавитирующей модели, двигающейся по инерции;
- основные размеры нестационарной каверны (длина и диаметр миделя) в произвольной точке дистанции.

Исходными данными являются размеры модели, плотность материала, начальная скорость и глубина хода.

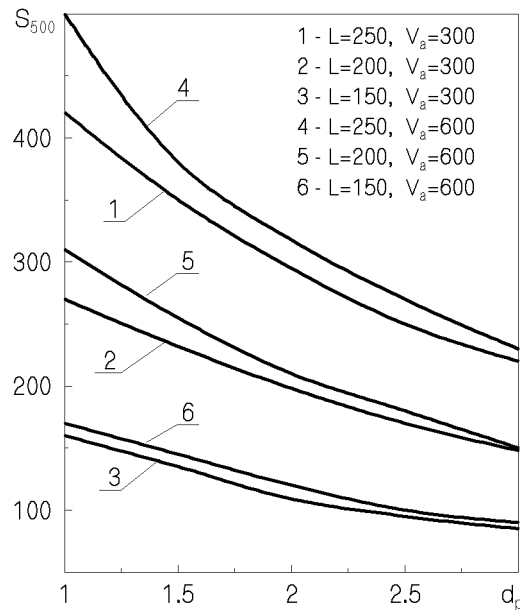


Рис. 1. Влияние размеров модели на дальность

Расчеты были проведены для серии из 30 моделей. Основные их параметры: плотность 7.85 г/см^3 ; длина 150, 200 и 250 мм; диаметр кавитатора 1, 1.5, 2, 2.5 и 3 мм. Остальные размеры моделей выбирались таким образом, чтобы модель размещалась в каверне, образуемой кавитатором при скорости V_a , равной 300 или 600 м/с, с зазором не менее 1 мм. При этом масса моделей составляла от 60 до 780 г.

Дальность хода определялась как расстояние, на котором скорость модели уменьшалась в 2.4 раза. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

Они подтвердили, что наибольшая дальность достигается у длинных моделей с маленьким кавитатором. С увеличением диаметра кавитатора или уменьшением длины модели дальность резко уменьшается.

Так, модель длиной 250 мм с кавитатором диаметром 1 мм весит 156 г и проходит 420 м, такая же модель с диаметром кавитатора 3 мм имеет массу 743 г, но проходит всего 220 м. Уменьшение дальности почти в 2 раза связано с тем, что увеличение массы приблизительно в 5 раз сопровождается увеличением сопротивления в 9 раз.

Если бы длина модели была увеличена пропорционально диаметру кавитатора и составляла 750 мм, то масса увеличилась бы в 27 раз и составила 4.2 кг, но дальность возросла бы только в 3 раза, т.е. до 1260 м.

С уменьшением длины модели снижается ее масса, следовательно, и дальность. Модель длиной

150 мм с кавитатором диаметром 1 мм имеет дальность 160 м, а с кавитатором диаметром 3 мм – всего 80 м.

Увеличение расчетной скорости с 300 до 600 м/с приводит к уменьшению начального зазора и некоторому увеличению массы модели. Соответственно увеличивается дальность.

Расчеты показывают, что для достижения наибольшей дальности желательно проектировать модель таким образом, чтобы внутри каверны оставалось возможно меньше свободного пространства.

ВЛИЯНИЕ ДВИГАТЕЛЯ НА ДАЛЬНОСТЬ ХОДА МОДЕЛИ

Одним из возможных путей повышения дальности хода модели является применение двигателя, например, ракетного.

Движение модели с двигателем имеет две особенности. Во-первых, на модель действует сила тяги, компенсирующая часть силы сопротивления. Во-вторых, часть материала модели должна быть заменена топливом, плотность которого ρ_f существенно меньше. Поэтому масса модели с двигателем, особенно в конце пути, меньше массы сплошной модели.

Тяга ракетного двигателя может быть определена из соотношения

$$T_p = Q_f \frac{dm_f}{dt}, \quad (7)$$

где T_p – тяга двигателя; m_f – масса топлива; Q_f – удельный импульс топлива. Типичные значения Q_f лежат в пределах от 200 до 500 кгс/(кг/с).

Импульс силы T_p за все время работы двигателя составит

$$K_f = Q_f m_f. \quad (8)$$

Если объем камеры двигателя равен W_c , то уменьшение массы модели будет

$$\Delta m_0 = (\rho_b - \rho_f) W_c \quad (9)$$

в начале пути и

$$\Delta m_0 = \rho_b W_c \quad (10)$$

в конце пути.

В результате общий располагаемый импульс составит

$$K_0 = m_0 V_0 + W_c [\rho_f Q_f - V_0 (\rho_b - \rho_f)]. \quad (11)$$

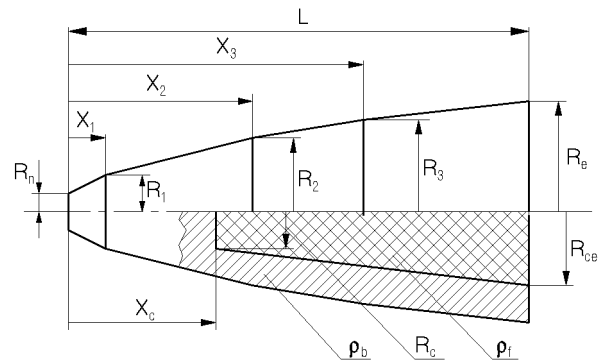


Рис. 2. Схема модели

Выражение в скобках обращается в 0 при

$$V_{cr} = Q_f \frac{\rho_f}{\rho_b - \rho_f}. \quad (12)$$

При $V_0 < V_{cr}$, начальный импульс увеличивается, и можно рассчитывать на увеличение дальности. Напротив, при $V_0 > V_{cr}$ он уменьшается, и следует ожидать, что модель с двигателем пройдет меньшее расстояние, чем сплошная.

Для расчета движения модели с двигателем была разработана программа CDILM, включающая блок для расчета характеристик тела с полостью, заполненной топливом, и блок для расчета тяги двигателя; уравнения движения дополнены соответствующими слагаемыми.

В блоке расчета характеристик тела программы CDILM внешний контур тела аппроксимируется четырьмя усеченными конусами (рис. 2). Модель может содержать полость в виде усеченного конуса, начинающегося на заданном расстоянии от кавитатора и заканчивающегося в корме модели. Определяются: объем модели по ее внешнему контуру, объем полости, масса модели с топливом, масса топлива, положение центра инерции и момент инерции.

Блок расчета тяги выполняет расчет массы топлива и ее производной по времени. При этом предполагается, что горение начинается в момент времени t_{0f} , а скорость горения является линейной функцией времени. Уравнение для расчета массы несгоревшего топлива имеет вид

$$m_f(t) = m_{f0} \left[1 - a_{f0}(t - t_{0f}) - \frac{1}{2} a_{f1}(t - t_{0f})^2 \right]. \quad (13)$$

Следовательно,

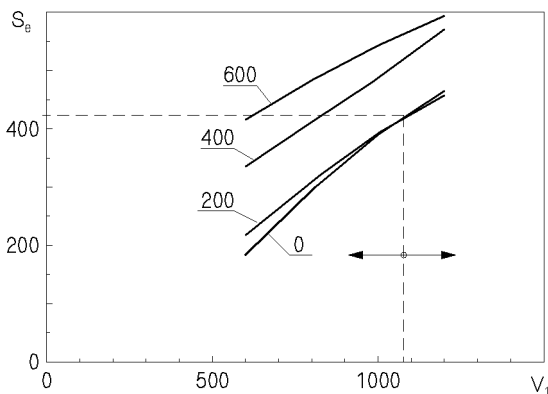


Рис. 3. Влияние эффективности топлива на дальность

$$T_p(t) = Q_f m_{f0} [a_{f0} + a_{f1}(t - t_{0f})]. \quad (14)$$

Здесь m_{f0} – начальная масса топлива. Коэффициенты $a_{f0}[c^{-1}]$ и $a_{f1}[c^{-2}]$ определяют скорость горения топлива.

В процессе счета выводятся пройденный путь, скорость, время, тяга и остаток топлива. Счет прекращается, если скорость или кинетическая энергия уменьшались до заданной (критической) величины, зазор между телом и каверной уменьшался до нуля или если модель прошла заданное расстояние.

При исследовании влияния ракетного двигателя на дальность хода моделей в качестве базовых были выбраны три модели предыдущей серии, две длиной 250 мм и одна длиной 150 мм. Варьировались начальная скорость модели (1200, 1000, 800 и 600 м/с) и удельный импульс топлива (200, 400 и 600 кГс/(кг/с)). Плотность топлива во всех случаях принималась равной 1.85 г/см³.

В расчетах также принималось, что горение происходит с постоянной скоростью (коэффициент a_{f1} в уравнении (13) равен 0). Величина коэффициента a_{f0} выбиралась таким образом, чтобы за время движения все топливо сгорело. Значение его было различным и составляло от 2 до 12 для разных моделей, т. е. горение топлива продолжалось 1/2 – 1/12 с. В этом случае большую часть пути модель проходила с работающим двигателем.

Результаты расчетов для одной из моделей приведены на рис. 3.

Видно, что при удельном импульсе $Q_f = 200$ замена материала модели топливом не дает выигрыша в дальности. Такой же результат получен для других моделей. Более эффективное топливо дает

определенный выигрыш в дальности – от 30% при большой начальной скорости до 150% при малой.

Для более легких моделей (например, алюминиевых) результаты были бы другими.

Представляет интерес исследовать влияние режима работы двигателя на проходимое моделью расстояние и найти оптимальный режим.

Предположим, что движение модели на дистанции состоит из трех участков: 1. Начальный участок движения по инерции без тяги; 2. Равномерное движение со скоростью V_1 при тяге, равной сопротивлению; 3. Заключительный участок движения по инерции.

Расстояние, проходимое на каждом участке, зависит от скорости V_1 .

Движение на участках 1 и 3 описывается уравнениями раздела 1.

На втором участке движение равномерно, тяга равна сопротивлению, а время горения топлива можно определить из выражения (14). Тогда для пройденного на этом участке пути получим:

$$S_2 = \frac{Q_f m_{f0}}{k m V_1^2}. \quad (15)$$

Таким образом, путь, проходимый на 1 и 2 участках, увеличивается с уменьшением V_1 . Путь, проходимый на 3 участке, уменьшается, однако сумма $S_1 + S_2$ от V_1 не зависит:

$$S_1 + S_3 = \frac{1}{k} \ln \frac{V_0}{V_e}, \quad (16)$$

где V_e – критическая (конечная) скорость.

Следовательно, общее расстояние увеличивается с уменьшением V_1 .

Поэтому двигатель должен включаться при скорости, лишь немного превышающей критическую. Численные расчеты подтвердили справедливость этой схемы. Во всех случаях, когда топливо успевало полностью сгореть до того, как скорость модели упала до критической величины, дальность возрастала с увеличением времени включения двигателя.

На рис. 4 показана зависимость скорости от пройденного пути для модели с работающим двигателем при стартовом времени 0.6 с (кривая 1), 0.2 с (кривая 2), для исходной сплошной модели (кривая 3), полый модели без двигателя (кривая 4). Видно, что при раннем включении двигателя модель проходит небольшое расстояние с повышенной скоростью, затем быстро тормозится.

Исследование зависимости дальности от скорости горения топлива при фиксированном времени включения показало, что дальность плавно снижается при увеличении скорости горения. Однако,

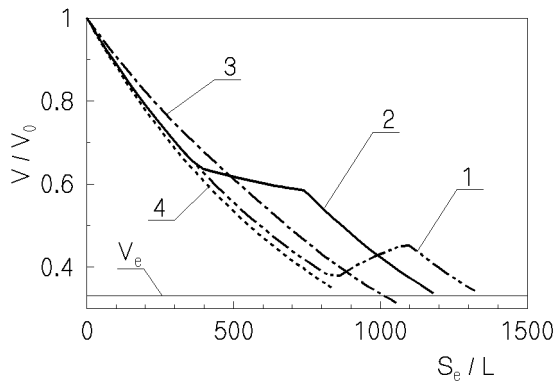


Рис. 4. Зависимость скорости от пути при различном времени запуска двигателя

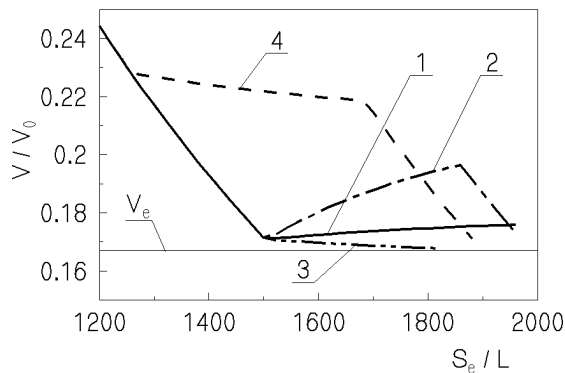


Рис. 5. Зависимость скорости от пути при различной скорости горения топлива

при очень малой скорости горения тяга оказывается недостаточной для поддержания постоянной скорости модели, последняя тормозится и дальность резко сокращается.

На рис. 5 показано изменение скорости модели при разной скорости горения топлива. Кривая 1 соответствует значению $a_{f0} = 1.75 \text{ c}^{-1}$ (максимум дальности), при этом тяга уравновешивает сопротивление и модель после включения двигателя движется равномерно. При $a_{f0} = 2.5 \text{ c}^{-1}$ (кривая 2) скорость модели увеличивается, но время работы двигателя уменьшилось, и дальность изменилась незначительно. При $a_{f0} = 1.5 \text{ c}^{-1}$ (кривая 3) модель теряет скорость и при работающем двигателе, что сказалось на дальности. Раннее включение двигателя (кривая 4) также ведет к потере дальности.

Расчеты показали, что оптимизация режима работы двигателя позволяет повысить дальность на 10 %.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ МОДЕЛИ

Описание методического подхода

Исследование возмущенного движения модели проводилось методом численного интегрирования уравнений движения при заданных начальных условиях. Эти уравнения включают [3]:

- собственно уравнения движения;
- уравнения для расчета размеров, формы и положения каверны;
- уравнения, связывающие гидродинамические силы с параметрами каверны и с параметрами движения тела.

Уравнения движения общеизвестны [4].

Уравнения для расчета размеров каверны включают формулы для расчета основных ее размеров (радиуса наибольшего сечения R_c и полудлины L_c) и радиуса на заданном расстоянии x от кавитатора. Последний определяется соотношением [1]

$$R(x) = R_c \sqrt{1 - \lambda^2 \left| 1 - \frac{t_x \cdot V(t - t_x)}{L_c(t - t_x)} \right|^{2/\kappa}}, \quad (17)$$

где t_x – время, прошедшее с момента образования рассматриваемого сечения каверны; κ – поправочный коэффициент, который принимался равным 1. Эта формула справедлива при $x > 2r_n$.

Положение оси каверны определяется:

- траекторией центра кавитатора;
- смещением каверны под действием силы Архимеда;
- смещением, вызванным наличием подъемной силы на кавитаторе.

Положение центра кавитатора в момент времени t определяется зависимостью

$$y_n(t) = y_m(t) + \psi(t)L_n, \quad (18)$$

где y_m – координата центра инерции модели; L_n – расстояние от кавитатора до центра инерции; $\psi(t)$ – угол тангажа.

Следовательно, имея зависимости $y_m(t)$ и $\psi(t)$ для некоторого промежутка времени, можно восстановить траекторию центра кавитатора, которая в первом приближении является геометрическим местом центров сечений каверны.

Сила плавучести каверны и подъемная сила кавитатора вызывают смещение оси каверны от траектории кавитатора. Формулы для расчета величины и скорости этого смещения приведены в [1]. Они содержат параметры движения тела

в момент образования рассматриваемого сечения каверны и параметры этого сечения в рассматриваемый момент времени.

Таким образом, координата центра каверны y_c определяется соотношением

$$y_c(t) = y_m(t - t_x) + \psi(t - t_x)L_n + Y_{cg}(x) + F_{ny}(t - t_x)Y_{cy}(x, t), \quad (19)$$

а скорость его смещения зависимостью

$$V_c(t) = V_{cg}(x) + F_{ny}(t - t_x)Y_{cy}^*(x, t), \quad (20)$$

где $Y_{cg}(x)$, $V_{cg}(x)$ – смещение и скорость смещения центра каверны под действием силы плавучести; $F_{ny}(t - t_x)$ – подъемная сила кавитатора в момент образования сечения каверны; $Y_{cy}(x, t)$ – множитель, зависящий от формы каверны.

Координата точки x на оси модели в момент t равна

$$y(x, t) = y_m(t) + \psi(t)(L_n - x) \quad (21)$$

и ее скорость

$$V_y(x, t) = V_{ym}(t) + \Omega(L_n - x), \quad (22)$$

где Ω – угловая скорость модели.

Отсюда находим погружение произвольного сечения модели в нижнюю или верхнюю границы каверны и относительную скорость сечения модели и сечения каверны.

Приведенные соотношения справедливы для любого закона движения модели. В частных случаях движения с постоянным углом атаки или с постоянной угловой скоростью можно получить более удобные для практических расчетов выражения.

Используя связанную с моделью систему координат [4] и пренебрегая составляющими, связанными с движением каверны под действием силы плавучести и подъемной силы кавитатора, получим следующее выражение для скорости центра сечения каверны относительно модели:

$$u_c(x, t) = V\alpha_m(t) - \Omega(t)(L_n - x), \quad (23)$$

где α_m – угол атаки в центре инерции модели; x – расстояние от кавитатора до рассматриваемого сечения.

При движении с постоянным углом атаки без угловой скорости (прямолинейное движение) интегрирование соотношения (23) приводит к следующему выражению для расстояния между осями модели и каверны a_c :

$$a_c(x) = \alpha_m x. \quad (24)$$

Если угол атаки и угловая скорость постоянны (равномерное движение по окружности), то получим:

$$a_c(x) = \alpha_m x - \frac{\Omega}{V}(L_n x - \frac{x^2}{2}). \quad (25)$$

Большой интерес представляет прямолинейное движение с постоянной угловой скоростью. В этом случае угол атаки будет переменным, а выражение для расстояния a_c имеет вид

$$a_c(x, t) = x[\alpha_m(t) - \frac{\Omega}{V}(L_n - x)], \quad (26)$$

где $\alpha_m(t)$ – угол атаки в центре инерции модели в рассматриваемый момент времени.

Полученные соотношения позволяют оценить влияние возмущений, возникающих при движении модели, на перераспределение зазоров между моделью и границей каверны.

Гидродинамические силы

Основными гидродинамическими силами, действующими на модель в случае, если диаметр любого ее сечения меньше диаметра соответствующего сечения каверны, являются сила на кавитаторе и сила, возникающая при контакте боковой поверхности тела с границей каверны.

Сила, действующая на кавитатор, зависит [1] от угла между вектором скорости кавитатора относительно жидкости и нормалью к кавитатору. В случае идеальной жидкости и плоского кавитатора, перпендикулярного оси модели, она сводится к силе сопротивления.

При симметричном обтекании такого кавитатора действующая на него сила направлена по оси модели и не создает момента относительно ее центра инерции. В идеальной жидкости нарушение симметрии обтекания не приводит к появлению составляющей, перпендикулярной оси модели. Возможно только смещение линии действия этой силы на величину, не превышающую радиуса кавитатора.

В реальной жидкости возможно появление поперечной силы вследствие асимметрии сил трения на кавитаторе.

К сожалению, нам не известны численные значения коэффициентов, учитывающих два упомянутых эффекта.

Силы, возникающие на боковой поверхности модели в случае, когда ее радиус меньше радиуса каверны, определяются по теории глассирования тонкого тела [23], при этом используется решение задачи о погружении круговой дужки в сжимающуюся круговую свободную поверхность. В результате получается простое выражение для силы, действующей на ту часть модели, которая рас-

положена впереди рассматриваемого сечения, через скорость относительного смещения тела и каверны U_1 , скорость сжатия сечения каверны U_2 , среднюю величину зазора между границами модели и каверны и погружение нижней точки сечения модели относительно невозмущенной границы каверны h .

Для нецилиндрических тел скорость U_2 следует определять с учетом угла расширения поверхности тела.

Величины h и U_1 зависят от предыдущего движения модели, см. уравнения (21) и (22). В силу этого система уравнений движения суперкавитирующего тела является системой уравнений с запаздыванием [6], и для определенности решения начальные условия должны быть заданы на отрезке пути, равном длине модели.

Выражение для гидродинамического момента, возникающего при глиссировании модели по границе каверны, получается достаточно сложным. Поэтому расчет его осуществляется методом численного интегрирования.

Для расчета движения суперкавитирующих моделей по приведенным уравнениям была разработана программа DCAVM-i.for, которая позволяет рассчитывать движение моделей в кавернах, образующихся как при очень низких, так и при высоких числах кавитации. При очень низких числах кавитации модель расположена в передней части каверны, причем угол между образующей поверхности модели и границей каверны очень мал. Это создает определенные трудности при расчете длины смоченной части модели и продольного момента. В программе DCAVM-i расчет взаимного положения модели и каверны производится для нескольких поперечных сечений, что повышает его точность.

Исследование поведения моделей

Для сравнительной оценки поведения различных моделей проводилось интегрирование уравнений движения при одинаковых начальных условиях. Начальные условия подбирались таким образом, чтобы в начальный момент времени модель двигалась в горизонтальном направлении, имея небольшой угол тангажа и небольшую угловую скорость. Знак начальной угловой скорости выбирался таким образом, чтобы абсолютная величина угла тангажа увеличивалась. Через некоторое время кормовая часть модели касалась границы каверны и начиналось колебательное движение (рис. 6). Обычно вначале амплитуда колебаний заметно изменялась, но, достигнув некоторой величины, стабилизировалась. На рис. 6 приведен пример зависимости угла тангажа, угловой скорости, подъем-

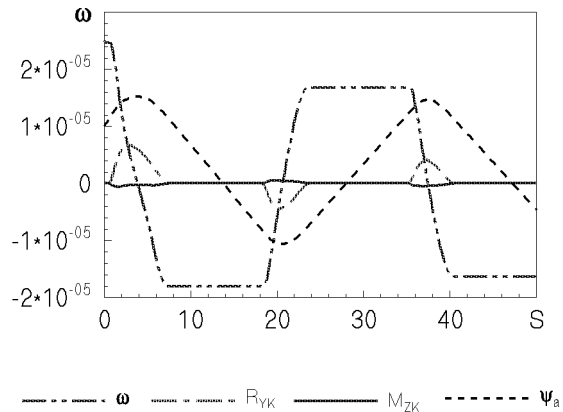


Рис. 6. Движение модели при большом зазоре

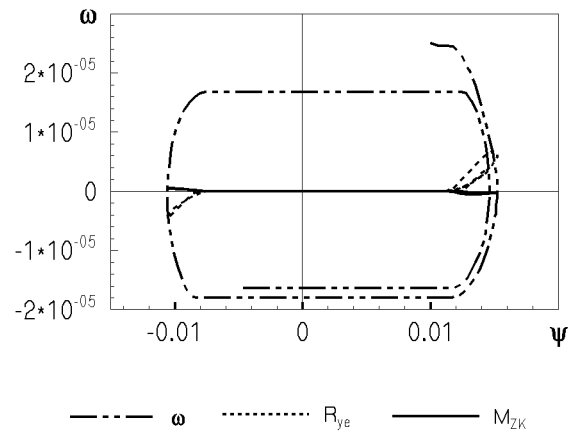


Рис. 7. Фазовая траектория колебаний модели в каверне

ной силы и продольного момента от пройденного пути.

Наглядное представление о процессе дают фазовые траектории [7], т. е. зависимость угловой скорости от угла тангажа (рис. 7). Обычно фазовые траектории представляют собой спирали, которые сжимаются при устойчивом движении или расширяются при неустойчивом. Фазовая траектория в виде замкнутой кривой соответствует автоколебательному режиму. Движение по фазовой траектории происходит по часовой стрелке.

На приводимых рисунках показаны также подъемная сила и продольный момент.

В случае движения модели в каверне с большим зазором виток спирали состоит из двух прямых, параллельных оси ψ , и двух криволинейных участков. Прямолинейные участки соответствуют движению модели без контакта со стенками, когда гидродинамические силы отсутствуют и угловая ско-

рость остается неизменной.

Влияние формы модели на характер ее движения

Для того, чтобы оценить влияние диаметра кавитатора и зазора в хвосте на поведение модели, была проведена серия расчетов применительно к моделям, похожим на описанные выше.

Исследованные модели отличались, в основном, формой и диаметром кормовой части. Каждая модель рассчитывалась с кавитаторами нескольких размеров. Радиус минимального выбирался таким образом, чтобы образующая каверна полностью охватывала модель. Наибольший кавитатор в два раза превосходил минимальный, остальные имели промежуточные размеры.

Расчеты показали, что при больших зазорах изменение радиуса кавитатора, как правило, слабо влияет на характер движения. Увеличение зазора ведет к увеличению амплитуды колебаний и (в меньшей степени) к уменьшению их частоты. Максимальная угловая скорость модели может в несколько раз превосходить угловую скорость начального возмущения. Примеры результатов расчета показаны на рис. 6 – 7.

Уменьшение диаметра кавитатора может привести к потере устойчивости движения, особенно в случае модели с кормовой частью малого диаметра (рис. 8 – 10).

Неустойчивое движение имеет место в определенном диапазоне размеров кавитатора. При очень малом зазоре движение опять становится устойчивым. Причиной неустойчивости является замыв части модели, расположенной впереди центра инерции. Взаимное положение модели и каверны в момент, предшествующий потере устойчивости, показано на рис. 11.

Справедливость приведенного заключения о причине потери устойчивости подтверждается расчетом для модели с уменьшенными размерами в средней части, но с теми же динамическими параметрами – положением центра тяжести и радиусом инерции. Модифицированная модель сохранила устойчивость на всем контрольном участке (50 длин).

Движение с малыми зазорами имеет свои особенности. При больших зазорах колебания обычно симметричны относительно линии $\psi = 0$. В этом случае направление движения модели в среднем совпадает с направлением, заданным при старте.

При малых зазорах часто наблюдается заметная асимметрия (рис. 12, 13). В этом случае возможно смещение центра колебаний на постоянную величину, при этом последовательные витки фазовой траектории накладываются один на другой, но

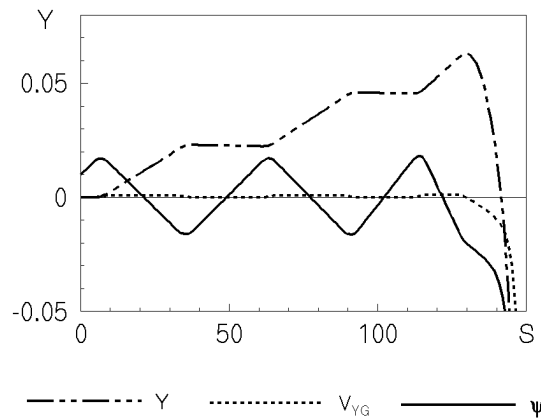


Рис. 8. Неустойчивое движение модели в каверне. Координата центра инерции

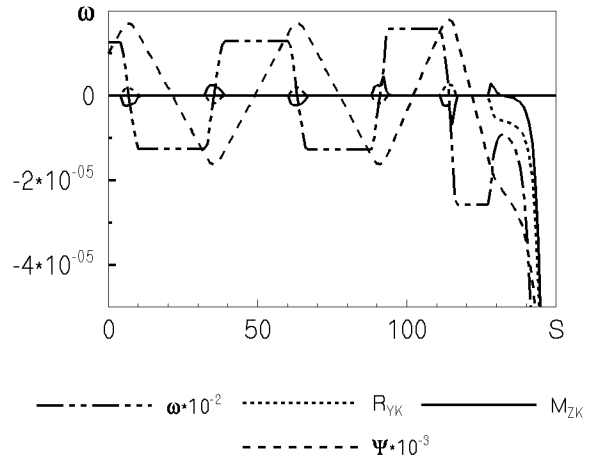


Рис. 9. Неустойчивое движение модели в каверне. Угол тангажа и угловая скорость

центр картины смещен относительно линии $\psi = 0$ (рис. 12). В других случаях последовательные витки смещены друг относительно друга, и центр колебаний постоянно уходит от линии $\psi = 0$.

Вследствие этого модель отклоняется от первоначально заданной траектории (рис. 14).

Таким образом, размер кавитатора оказывает существенное влияние на характер движения, если зазор между моделью и границей каверны мал, особенно если возможен замыв передней или средней части модели.

Отмечено также, что малые изменения формы кормовой части модели могут существенно повлиять на поведение модели.

Почти все рассмотренные модели расширяются

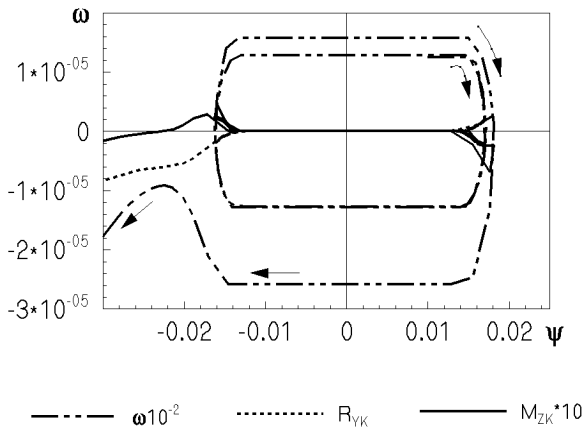


Рис. 10. Неустойчивое движение модели в каверне. Угол тангажа и угловая скорость

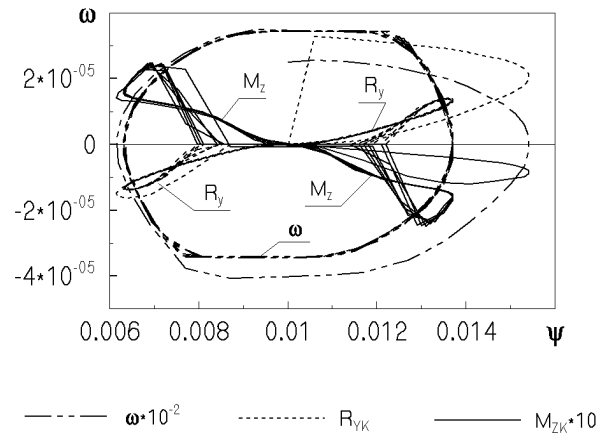


Рис. 12. Асимметричное движение модели в каверне. Угол тангажа и угловая скорость

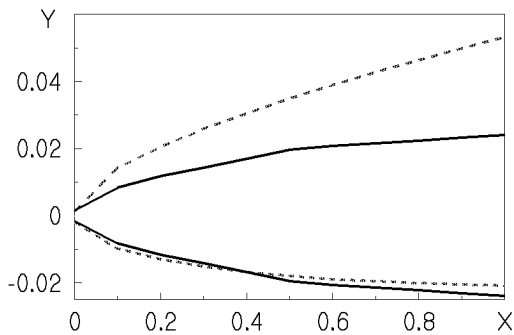


Рис. 11. Неустойчивое движение модели. Положение тела в каверне

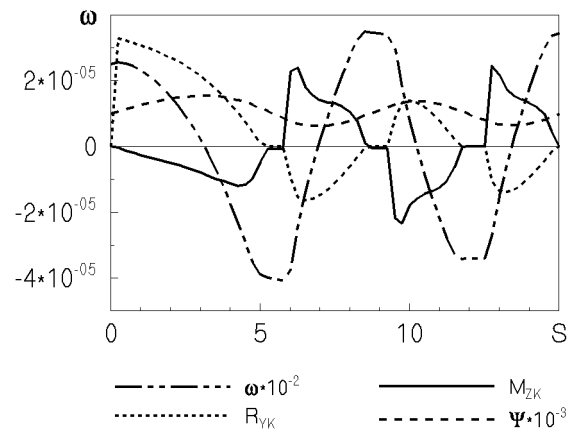


Рис. 13. Асимметричное движение модели. Угол тангажа, угловая скорость, кормовая сила и момент

в кормовой части. Расчеты показали, что модель с углом наклона поверхности около 1° (базовая модель) движется устойчиво при любом кавитаторе из рассмотренного диапазона. Однако небольшое изменение параметров модели, вызванное увеличением радиуса ее средней части, может привести к тому, что движение становится неустойчивым при всех кавитаторах малого радиуса.

Модели с уменьшенным диаметром кормы оказываются неустойчивыми при кавитаторах, радиусы которых лежат в определенном диапазоне. Устойчивой может оказаться модель как с уменьшенным, так и с увеличенным кавитатором.

Модель, радиус кормы которой увеличен на 15% по сравнению с базовым вариантом, оказалась устойчивой, а дальнейшее его увеличение существенного влияния на поведение моделей не оказало. Однако в некоторых случаях, чаще у моделей с малым кавитатором, наблюдаются асимметрия или нерегулярность движения.

Последняя может выражаться в появлении низкочастотной составляющей угловых колебаний, как на рис. 15, либо составляющей, монотонно возрастающей со временем. В обоих случаях модель отклоняется от первоначальной траектории

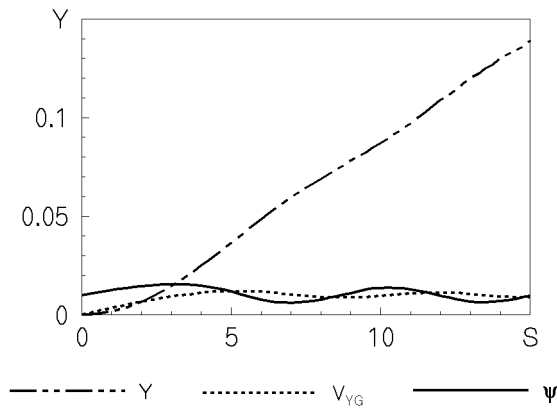


Рис. 14. Асимметричное движение модели. Координата и вертикальная скорость центра инерции и угол тангажа

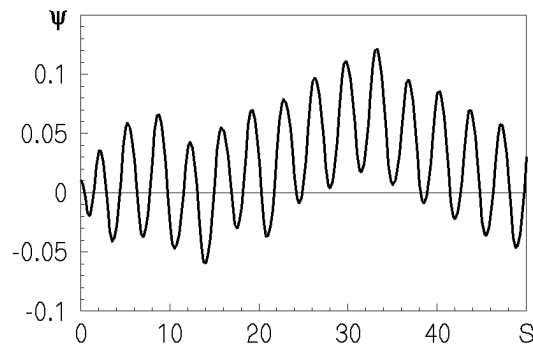


Рис. 15. Нерегулярное движение модели. Угол тангажа

(рис. 16).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что движение модели с кавитатором, обеспечивающим значительный зазор между каверной и кормовой частью модели, представляет собой устойчивые колебания с постоянными ам-

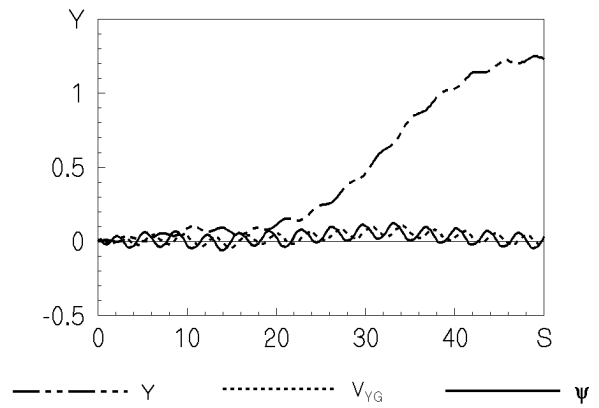


Рис. 16. Нерегулярное движение модели. Координата и вертикальная скорость центра инерции и угол тангажа

плитудой и частотой. При малом диаметре кавитатора движение может быть либо аperiodически неустойчивым, либо представлять собой результат наложения колебаний с различной частотой и носить нерегулярный характер.

1. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. – Киев: Наук. думка, 1969. – 208 с.
2. Серебряков В.В. Некоторые закономерности расширения сечений осесимметричной и сферической каверн // Гидромеханика. – Вып. 62. – 1990. – С. 80-88.
3. Putlin S.I. Stability of supercavitating Slender Body During Water Entry and Underwater motion // AGARD. – Report 827. – 1998. – С. 24-30.
4. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Управление морскими подвижными объектами. – Л: Судостроение, 1988. – 271 с.
5. Логвинович Г.В. Некоторые вопросы глиссирования и кавитации // Труды ЦАГИ. – Вып. 2052. – 1980. – С. 3–12.
6. Фешенко С.Ф. и др. Асимптотические методы в теории линейных дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. – Киев: Наук. думка, 1981. – 293 с.
7. Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. – М: Наука ФМ, 1981. – 400 с.