

УДК 629.12:532.5

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ПО ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ С ГИБКИМ ОГРАЖДЕНИЕМ БАЛЛОНЕТНОГО ТИПА

© 2014 г.

А.В. Туманин¹, В.В. Шабаров²

¹ООО Судостроительная компания «Аэроход», Нижний Новгород

²НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

isadymacar@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.06.2014

Представлена методика математического моделирования динамики движения амфибийного судна на воздушной подушке по водной опорной поверхности. Методика позволяет моделировать динамику как неуправляемого, так и управляемого движения с учетом пространственного нерегулярного характера волнения. Проведено сравнение результатов расчетов по разработанной методике с результатами буксировочных испытаний модели судна с гибким ограждением баллонетного типа на тихой воде и на регулярной волне, проведенных в скоростном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург.

Ключевые слова: амфибийное судно, воздушная подушка, гибкое ограждение баллонетного типа, математическое моделирование, динамика движения, водная поверхность.

Основные положения методики моделирования динамики движения АСВП с гибким ограждением баллонетного типа

Динамика амфибийного судна на воздушной подушке (АСВП) описывается известными уравнениями движения судна с шестью степенями свободы, а также уравнениями, определяющими давления в секциях воздушной подушки (ВП) судна:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{np_{\text{возд}}}{W_i} \left(Q_{\text{вент}}^i - Q_{\text{ист}}^i - Q_{\text{взаим}}^{ij} - \frac{dW_i}{dt} \right), \quad i, j = 1, 2, \quad (1)$$

где p_i – давление в i -й секции ВП; W_i – объем i -й секции ВП; $Q_{\text{вент}}^i$ – объемный расход воздуха, нагнетаемого вентилятором в i -ю секцию ВП; $Q_{\text{ист}}^i$ – объемный расход воздуха, истекающего из i -й секции ВП в атмосферу; $Q_{\text{взаим}}^{ij}$ – объемный расход воздуха, перетекающего из i -й секции в j -ю; $p_{\text{возд}}$ – нормальное атмосферное давление; $n = 1,4$ – показатель политропы.

При определении давления в каждой секции ВП считается, что давление в секции однородно в каждый момент времени, процесс сжатия воздуха адиабатический, значения избыточных давления и плотности воздуха в ВП малы по сравнению

с атмосферными значениями давления и плотности, втекание воздуха в ВП и истечение из ВП принято квазистационарным, плотность воздуха при истечении равна плотности воздуха в атмосфере.

Зависимость тяги маршевых движителей от скорости набегающего потока и подаваемой мощности, а также величин аэродинамических сил и моментов от характера внешнего обтекания судна являются входными данными и определяются в процессе вычислительных или физических экспериментов [1].

Вычисление сил и моментов, действующих на гибкое ограждение ВП при контакте с опорной поверхностью, основано на использовании гипотезы плоских поперечных сечений [2]. Вводится в рассмотрение контрольное сечение – поперечное сечение пневматического элемента гибкого ограждения (баллонета), разбитое на элементарные участки.

Взаимодействие гибкого ограждения с водной поверхностью

В случае взаимодействия элементов гибкого ограждения (ГО) с водной опорной поверхностью контрольное сечение предполагается недеформируемым. На рис. 1 представлено поперечное контрольное сечение двухъярусного баллонета – бортового гибкого ограждения баллонетного типа. Сечение характеризуется радиусами нижнего r_i и верхнего r'_i ярусов, а также величиной центрального угла α_i крепления нижнего яруса к верхнему ярусу.

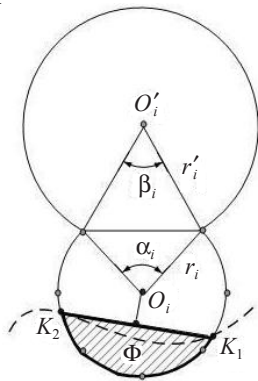


Рис. 1

При контакте ограждения с поверхностью имеется некоторая замкнутая область Φ , ограниченная отрезком K_1K_2 и дугой окружности (совокупностью дуг) сечения баллонета; K_1 и K_2 – точки пересечения поверхности воды и границы сечения баллонета. Периметр, положение центра тяжести погруженной части сечения при замыве, а также зазор между баллонетом и поверхностью воды при отсутствии контакта определяются по положениям точек K_1 и K_2 в каждом сечении.

При контакте ограждения с поверхностью имеется некоторая замкнутая область Φ , ограниченная отрезком K_1K_2 и дугой окружности (совокупностью дуг) сечения баллонета; K_1 и K_2 – точки пересечения поверхности воды и границы сечения баллонета. Периметр, положение центра тяжести погруженной части сечения при замыве, а также зазор между баллонетом и поверхностью воды при отсутствии контакта определяются по положениям точек K_1 и K_2 в каждом сечении.

В результате интегрирования по всем контрольным сечениям вычисляются площадь замыва ГО, координаты центра тяжести и нормали к каждой области контакта, а также площадь выдува из-под гибкого ограждения. С другой стороны, информация об областях контакта ГО и опорной поверхности используется при определении параметров ВП: площади, объема, центра давлений и самих значений давлений в секциях ВП.

При движении по водной поверхности рассматриваются следующие силы, действующие на ГО АСВП: гидростатическая архимедова сила и гидродинамическая нормальная сила, действующие на погруженные пневматические элементы ГО, а также гидродинамическая сила трения. Учет волнового сопротивления, вызванного образованием впадины под областью ВП, производится на основе аппроксимации данных сопротивления скеговых судов на воздушной подушке [3].

Гидродинамическая нормальная сила, действующая на пневматические элементы ГО при их контакте с водой, пропорциональна квадрату скорости входа их в воду:

$$\mathbf{F}_i^K = \begin{cases} 0,25 \cdot \rho_{\text{вод}} \cdot \pi \cdot |K_1K_2| \cdot V_{\Sigma n}^2 \mathbf{n}_{K_1K_2}, & V_{\Sigma n} > 0, \\ \mathbf{0}, & V_{\Sigma n} \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $\mathbf{n}_{K_1K_2}$ – единичный вектор нормали к отрезку K_1K_2 ; $V_{\Sigma n}$ – проекция на эту нормаль вектора \mathbf{V}_{Σ} – относительной скорости входа середины отрезка K_1K_2 в воду с учетом скоростей орбитального волнового движения частиц воды.

Гидродинамическая сила трения рассчитывается, исходя из турбулентного режима течения, по формуле Прандтля – Шлихтинга [4] на каждом замытом участке пневматического баллонета:

$$\mathbf{F}_j^{\text{TP}} = k \frac{0,455}{(\lg \text{Re}_j)^{2,58}} \frac{\rho_{\text{вод}} |\mathbf{V}_j^{\text{TP}}|^2 A_j}{2} \frac{\mathbf{V}_j^{\text{TP}}}{|\mathbf{V}_j^{\text{TP}}|}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, устанавливающий связь между степенью замыва части баллона, находящейся в области ВП, и давлением в ВП; A_j – площадь j -го замытого участка; \mathbf{V}_j^{TP} – скорость в центре тяжести области замыва; Re_j – число Рейнольдса на рассматриваемом замытом участке.

Модель морского волнения

Трехмерное нерегулярное морское волнение моделируется системой плоских нерегулярных волн малой амплитуды, распространяющихся к генеральному направлению волны под различными углами α_j . Генеральное направление распространения волн характеризуется углом χ относительно оси Ox_g земной системы координат, элементарные волновые системы находятся в секторе $\alpha_j \in (-\pi/2, \pi/2)$ относительно генерального направления распространения волны (рис. 2).

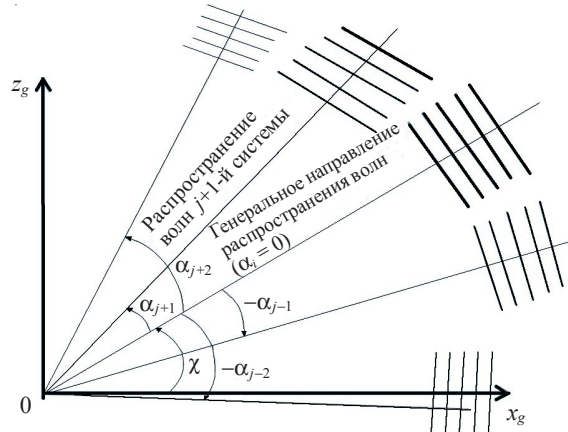


Рис. 2

Вследствие линейности теории волн малой амплитуды справедлив принцип суперпозиции решений для систем волн, указанных на рис. 2. Полагая, что каждая из N плоских систем, распространяющихся под углами α_j к генеральному направлению распространения волны, состоит из n элементарных волн, получим выражения для профиля волны $\eta(x, z, t)$ и потенциала скорости $\phi(x, y, z, t)$:

$$\eta(x_g, z_g, t) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N a_{ij} \sin(\omega_i t - k_i (x_g \cos \lambda_j + z_g \sin \lambda_j) + \varepsilon_{ij}), \quad (4)$$

$$\phi(x_g, y_g, z_g, t) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N \frac{a_{ij} g}{\omega_i} \cos(\omega_i t - k_i (x_g \cos \lambda_j + z_g \sin \lambda_j) + \varepsilon_{ij}) e^{k_i y_g}, \quad (5)$$

где $\lambda_i = \chi + \alpha_i$.

В (4), (5) фазы ϵ_{ij} элементарных волн – случайные числа, равномерно распределенные в интервале $[0, 2\pi]$. Величины амплитуд a_{ij} элементарных волн линейной теорией не устанавливаются и определяются из спектральной плотности морского волнения [5].

Значения высот волн 3%-ной обеспеченности, дисперсии, частоты максимумов и средние частоты основного спектра получены экстраполяцией результатов [5] по энергетическим спектрам морского волнения.

Результаты моделирования движения АСВП по водной поверхности

Верификация методики для движения АСВП по водной поверхности проводилась с использованием результатов буксировочных испытаний модели АСВП с аэродинамической разгрузкой (АР) в скоростном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [6]. Модель выполнена в масштабе 1:4 натурального размера. Физические эксперименты проводились как на тихой воде, так и в условиях регулярного волнения со средними значениями высот волн $h_b = 42$ мм и длин волн $\lambda_b = 2,2$ м. Сопоставление результатов экспериментов для буксировок модели на тихой воде с результатами расчетов по моделированию движения самоходной модели с АР проекта «Тунгус» приведены на рис. 3 в виде зависимостей дифферента судна ψ и его относительного сопротивления R/G от числа Фруда Fr по объемному водоизмещению.

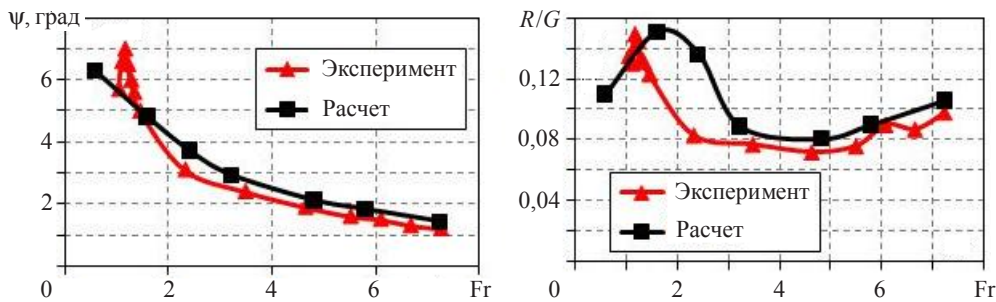


Рис. 3

Сравнение результатов экспериментов для буксировок модели на регулярном волнении с результатами расчетов по относительным размахам килевой $\psi_p/(2\alpha)$ и вертикальной качки $2Z/h_b$ представлено на рис. 4. Здесь $\alpha = \pi h_b/\lambda_b$ – наибольший угол волнового склона, Z – амплитуда вертикальной качки, ψ_p – размах килевой качки.

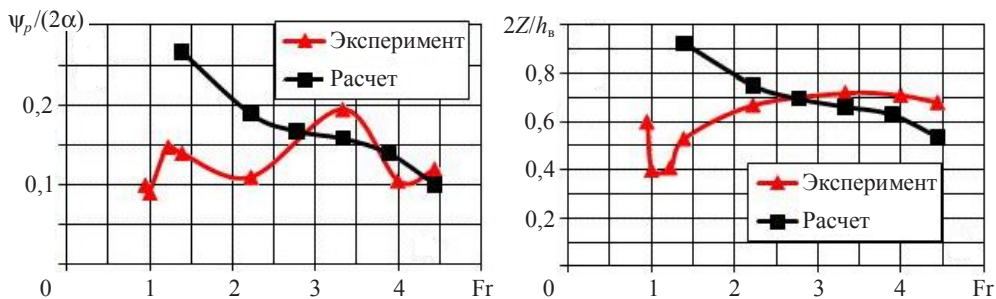


Рис. 4

Экспериментальные и расчетные величины вертикальных перегрузок в центре тяжести $n_{цт}$ и носовой части $n_{нос}$ на регулярном волнении в зависимости от числа Фруда по объемному водоизмещению представлены на рис. 5.

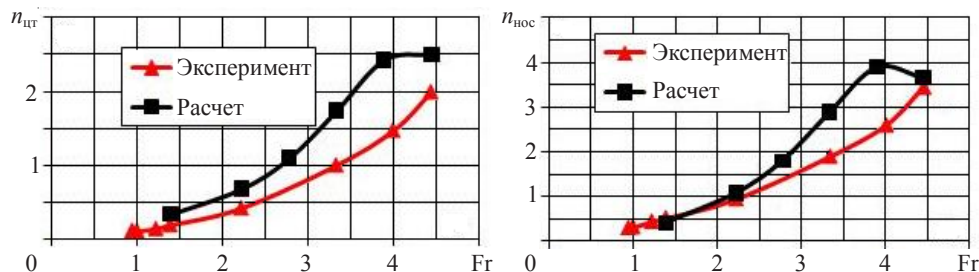


Рис. 5

Расчетные зависимости сопротивления натурального образца АСВП с АР при движении на различных скоростях и в зависимости от высоты волны 3%-ной обеспеченности представлены на рис. 6.

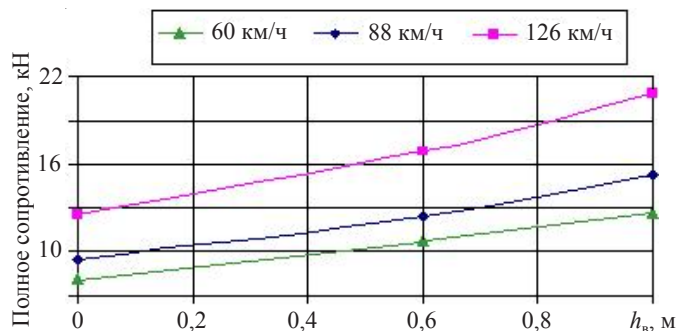


Рис. 6

В расчетах моделировались нагнетатели с диаметром рабочего колеса 1,0 м.

Заключение

Разработана методика моделирования динамики движения АСВП с ГО баллонетного типа и аэродинамической разгрузкой при его движении по водной опорной поверхности. Методика позволяет моделировать динамику как управляемого, так и неуправляемого пространственного движения АСВП по водной поверхности, в том числе на трехмерной нерегулярной волне, определять сопротивление движению и действующие нагрузки на элементы корпуса судна.

Результаты сопоставления расчетов по разработанной методике для случая движения АСВП по водной опорной поверхности находятся в удовлетворительном согласовании с результатами буксировочных испытаний модели на тихой воде и волне.

Список литературы

1. Математическое моделирование несущего комплекса судов на воздушной подушке (СВП) / П.С. Кальясов, А.В. Туманин, В.В. Шабаров, А.К. Якимов // Морской вестник: Сб. ст. / СПб., 2011. №1. С. 104–107.
2. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев: Наукова думка, 1969. 215 с.
3. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. Л.: Судостроение, 1988. 286 с.

4. Федяевский К.К., Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 450 с.

5. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 288 с.

6. Результаты проведения буксировочных испытаний модели судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой: Отчет ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова». СПб., 2013. Рег. № 47519. 45 с.

**NUMERICALLY INVESTIGATING THE DYNAMICS
OF AN AMPHIBIAN HOVERCRAFT WITH A FLEXIBLE BALLONETE-TYPE
SHIELDING MOVING ALONG A WATER SURFACE**

A.V. Tumanin, V.V. Shabarov

A methodology for mathematically modeling the motion dynamics of an amphibian hovercraft along a supporting water surface is presented. The methodology makes it possible to model the dynamics of both controlled and uncontrolled motion, accounting for spatially non-linear nature of wavering. The results computed using the present methodology are compared with the results of tests with a model hovercraft with a flexible ballonet-type shielding towed across quiet water and across regular wave, as conducted in the testing pool of Krylov State Scientific Center, St Petersburg.

Keywords: amphibian, hovercraft, flexible ballonet-type shielding, mathematical modeling, dynamics of motion, water surface.