



## СОДЕРЖАНИЕ

### Статьи

<i>Семенова В.Ю., Тан Хтун Аунг.</i> Определение амплитуд качки судна в условиях мелководья на основании трехмерной теории.....	4
<i>Бестужева А.Н.</i> Пространственная задача о волновых движениях жидкости вокруг конуса.....	14
<i>Сухоруков А.Л.</i> Об использовании амортизирующих и демпфирующих устройств при подъеме груза с большой глубины в условиях волнения моря.....	22
<i>Векслер В.Я.</i> Отработка обводов подводных объектов с использованием компьютерных технологий проектирования для улучшения их гидродинамических характеристик.....	48
<i>Егоров С.К.</i> Исследование влияния удлинения корпуса на ходовые качества торпед и подводных аппаратов.....	58
<i>Лев И.Г., Виноградов Н.И., Нисневич М.З.</i> Об определении коэффициентов гидродинамического сопротивления и оценке характеристик вибрации плохообтекаемых гибких связей по данным морских испытаний.....	68
<i>Байтуганов М.В., Курносов А.А., Рудко А.А.</i> Формирование тактических решений по комплексному применению разнородных средств с учетом гидроакустической совместимости .....	85

### Конференции

Решение X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2010).....	92
--	----

### Из истории науки

100 лет со дня рождения И.П.Гинзбурга ( <i>Акимов Г.А., Максимов В.В.</i> ).....	96
--	----

<b>Поздравляем!</b> .....	102
---------------------------	-----

<b>Хроника</b> .....	104
----------------------	-----

Правила представления материалов в редакцию.....	109
--	-----

# CONTENTS

## Articles

- Semenova V.U., Than Htun Aung.* The Determination of the Ship Motion Amplitudes in Shallow Water by Means of the Three-Dimensional Theory..... 4

This paper describes the solution of the problem of the ship motions in regular waves in shallow water by means of the three-dimensional source technique. The unknown velocity potentials are represented with the help of the Green function of three-dimensional pulsating source. Results of the computations of surge, sway, heave, roll, pitch and yaw amplitudes for different depth parameter  $h/T$  are presented. Finally, the considerable influence of the shallow water effect on the amplitudes of different motion modes is graphically illustrated and discussed.

**Key words:** ship motions, shallow water, pulsating source, Green-function, amplitudes, depth of water.

- Bestuzheva A.N.* 3D-Problem of Wave Motion in a Fluid Around a Cone..... 14

Stationary wave motion of an ideal non-compressible fluid in a domain limited by a free surface and an infinite cone with the vertex on a free surface is considered. Wave motion is caused by the bottom movement. The problem is set for the velocity potential within the framework of the linear dispersion theory. By means of integral transforms the solution of the problem is reduced to a functional equation which has a solution in the particular cases. In assumption of smallness of angle between liquid free surface and cone surface analytic solution of the problem which contains dependencies from inclination angle is made.

**Key words:** linear dispersion theory, waves, ideal fluid, cone.

- Sukhorukov A.L.* On the Use of Shock-Absorbing and Damping Devices for Lifting Loads from Deep Waters under Various Sea States..... 22

Nowadays there is a tendency to development of ever deeper oil and gas fields due to depletion of hydrocarbon reserves onshore. Thus lots of lifting operations have to be carried out during infrastructural development of such fields. The present work, on the basis of Fourier finite integral transformation method, gives solution to the problem of lifting loads from deep waters taking into consideration wave and dissipating processes in lifting ropes. To reduce forces additional shock-absorbing and damping devices are introduced into the system. The effect of these devices on maximum forces realized in the system during the process of load lifting is currently being analysed.

**Key words:** load lifting, sea state, rope, wave process, shock-absorber, damper, integral transformations.

- Vekslyar V.Ya.* Underwater Object Outline Working-off Using Computer Design Technologies in Order to Improve Their Hydrodynamical Characteristics.... 48

Algorithm is given for development of underwater object outer architecture when design computer technologies are used based on hydrodynamic and hydroacoustic criteria for outline quality evaluation when prototype is not available. Methodology of primary design process of outline shape with choice of the qualifiers is described. Geometrical and mathematical models are developed on the basis of these qualifiers. These models assist in calculation of architectural surfaces being initial information in application programs of hydrodynamics and hydroacoustics, the main purpose is to solve variational design problems.

**Key words:** underwater object, propulsor, hydrodynamics, hydroacoustic, mathematical model.

<i>Egorov S.K.</i> Investigation of the Effect of Body of Revolution Lengthening on the Propulsion Performance of Torpedoes and Underwater Vehicles.....	58
--	----

The theoretical and numerical research of body of revolution lengthening effect on required power, conditioned by its drag coefficient and drag area, at constant velocity and the constant efficient volume are represented.

**Key words:** propulsion, the body of revolution, lengthening, specific volume of the power complex.

<i>Lev I.G., Vinogradov N.I., Nisnevich M.Z.</i> On Definition of Hydrodynamic Resistance Factors and Estimation of Vibration Characteristics of Bluff Cables According to Sea Tests.....	68
---	----

Results of data processing of sea tests of bluff cables are described. Approximation of hydrodynamic functions of loading according to aerodynamic tests is specified and values of hydrodynamic factors for straight-line 3-strands and 6-strands steel cables according to tests in water are defined at critical angles of attack. For the cables bent in a stream the empirical formulas are received, allowing to define factors of normal resistance depending on a combination of set tow-parameters. According to tension and configuration of flexible cables in a stream it is offered then to estimate some characteristics of hydroelastic vibration.

**Key words:** bluff cable, critical angles of attack, cable bent in a stream, set tow-parameters, hydroelastic vibration.

<i>Baituganov M.W., Kurnosov A.A., Rudko A.A.</i> Tactical Solutions Forming of Dissimilar Tools Complex Application Taking into Account Hydroacoustical Compatibility.....	85
---	----

Basic concepts and maintenance methods of hydroacoustic compatibility of dissimilar systems and tools that are placed on one carrier and are functionally united to solve various problems are outlined. Situational approach is suggested to control the complicated underwater object in dynamically changing signal clutter situations.

**Key words:** hydroacoustic compatibility, complex application, situated management, signal clutter situation.

УДК 629.12.073.243.4

© В.Ю.Семенова<sup>1</sup>, Тан Хтун Аунг<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет  
sem\_viktoria@mail.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУД КАЧКИ СУДНА В УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДЬЯ НА ОСНОВАНИИ ТРЕХМЕРНОЙ ТЕОРИИ

Рассмотрено решение линейной задачи о качке судна на регулярном волнении в условиях мелководья в трехмерной постановке методом интегральных уравнений. Искомые потенциалы скорости движения жидкости представлены через функции Грина пространственного пульсирующего источника. Приведены результаты расчетов поперечной и продольной качки судна на мелководье в зависимости от различных отношений глубины водоема к осадке судна  $h/T$ . Показано значительное влияние мелководья на амплитуды различных видов качки.

Ключевые слова: качка судна, мелководье, пульсирующий источник, функция Грина, амплитуды, глубина жидкости.

Оценка места и роли каждого нового образца современной сложной техники – это многоплановая и многоаспектная задача, необходимость решения которой очевидна. Труднее получить однозначный ответ, когда речь идет не об одном отдельно взятом образце, а о целом новом классе образцов подводной техники – о мобильных подводных роботах (МПР). Место новых образцов определяется тем, какие задачи они могут решать, а роль – тем, какой вклад в решение конкретных задач, обеспечиваемых определенной системой технических средств, они могут внести.

Эксплуатация судов в условиях ограниченной глубины часто приводит к существенному изменению их мореходных качеств. Влияние ограниченной глубины проявляется прежде всего в изменении распределения гидродинамических давлений по смоченной поверхности судна вследствие чего изменяются внешние гидродинамические силы, действующие на судно. Поскольку мореходные качества судна определяются действующими на него внешними силами, возникает необходимость определения этих сил.

Первые теоретические исследования гидродинамических сил, действующих на судно при качке на мелководье, принадлежат Жуковскому Н.Е., Хаскинду М.Д., Анфимову В.Н. Более строгое решение задачи о качке судна в линейной постановке дано Ремезом Ю.В. [1]. Для определения гидродинамических характеристик в его работе используется метод плоских сечений, на основании которого действующие гидродинамические силы определяются вначале для каждого шпангоутного сечения судна. Двухмерные задачи о качке шпангоутных контуров на мелководье были рассмотрены и в работах Урселла, Кейла, Такаки, Коханова, Элиса [2-5]. Решение задачи о качке судна на мелководье в трехмерной постановке существует в ряде зарубежных работ. Так, в работе Оортмерссен [6] рассмотрена качка объектов на мелководье без хода. В работе Папаниколао [7] сделана попытка учета скорости хода. Однако все эти работы отличаются ограниченным числом полученных результатов.

В настоящей работе рассматривается решение задачи о качке судна на мелководье в линейной постановке на основании трехмерного численного метода. В отечественной практике решение данной задачи в трехмерной постановке осуществлялось с помощью прикладных коммерческих пакетов, в связи с чем проблема остается актуальной.

**Постановка задачи.** Введем три системы координат (рис. 1). Неподвижная правая система  $O \xi^0 \eta^0 \zeta^0$  совпадает с невозмущенной свободной поверхностью жидкости. Для описания поверхности корпуса судна служит подвижная система координат  $O_1 x y z$ , ось  $O_1 z$  которой проходит через центр тяжести (ЦТ)  $G$  судна. Для характеристики колебаний судна и жидкости используется третья система координат  $O \xi \eta \zeta$ . Данная система движется со скоростью судна  $U$ . В положении равновесия судна подвижные системы  $O_1 x y z$  и  $O \xi \eta \zeta$  совпадают.

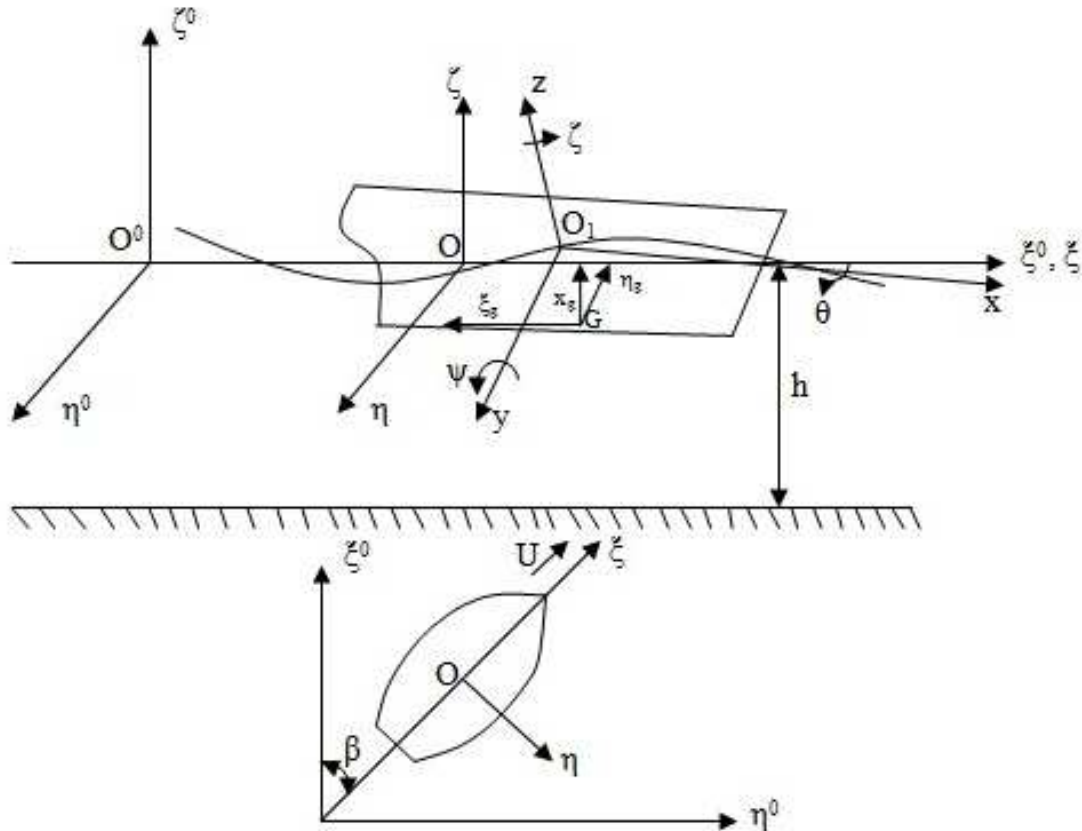


Рис. 1. Системы координат.

Согласно принятым системам координат положение качающегося корабля в произвольный момент времени определяется координатами его центра тяжести  $\xi_g, \eta_g, \zeta_g$  и тремя углами  $\theta, \psi, \chi$ , которые и требуется определить в результате решения.

Сформулируем общую краевую задачу для потенциала скорости движения жидкости  $\Phi(\xi, \eta, \zeta, t)$  в подвижной системе координат  $O \xi \eta \zeta$ , в которой и описывается качка корабля как твердого тела.

Потенциал скорости абсолютного движения жидкости  $\Phi(\xi, \eta, \zeta, t)$  должен удовлетворять уравнению Лапласа, граничному условию на свободной поверхности:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - 2U \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial \xi} + U^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} - g \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 0, \quad \zeta = 0$$

граничному условию на смоченной поверхности:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = U_1 \cos(n, \xi) + U_2 \cos(n, \eta) + U_3 \cos(n, \zeta) + U_4 [\eta \cos(n, \zeta) - \zeta \cos(n, \eta)] + U_5 [\zeta \cos(n, \xi) - \xi \cos(n, \zeta)] + U_6 [\xi \cos(n, \eta) - \eta \cos(n, \xi)], \quad (1)$$

где  $U_1 = V_{0\xi}; U_2 = V_{0\eta}; U_3 = V_{0\zeta}; U_4 = \omega_\xi; U_5 = \omega_\eta; U_6 = \omega_\zeta$ .

Здесь  $V_{0\xi}, V_{0\eta}, V_{0\zeta}$  - проекции вектора поступательной скорости;  $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$  - проекции вектора мгновенной угловой скорости на соответствующие координатные оси.

Граничное условие на бесконечности состоит, во-первых, в том, что при условии  $\sqrt{(\xi^2 + \eta^2)} \rightarrow \infty$  возмущения, вносимые в окружающую жидкость присутствием и качкой корабля, должны затухать, т.е. функция  $\Phi(\xi, \eta, \zeta, t)$  должна переходить в потенциал свободно распространяющихся волн; во-вторых, на дне водоема жидкость должна находиться в покое:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} = 0, \quad \zeta \rightarrow -h$$

В соответствии с линейной теорией качки судна потенциал  $\Phi$  можно представить в виде следующей суперпозиции:

$$\Phi = \varphi_0(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \varphi_7(\xi, \eta, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} + \sum_{j=1}^6 U_j \varphi_j,$$

где  $\varphi_0$  - потенциал набегающего волнения.

Для случая жидкости конечной глубины  $h$ :

$$\varphi_0 = -i \frac{g}{\omega} \zeta_w \frac{\operatorname{ch} \mu_0 (\zeta + h)}{\operatorname{ch} \mu_0 h} e^{i\mu_0 (\xi \cos \beta + \eta \sin \beta)},$$

где  $\beta$  - курсовой угол;  $\omega$  - частота набегающего волнения;  $\mu_0$  определяется из дисперсионного соотношения

$$\frac{\omega^2}{g} = \mu_0 \operatorname{th} \mu_0 h;$$

$\varphi_7$  - потенциал дифрагированного движения жидкости;  $\varphi_j$  - потенциал скорости возмущенного движения жидкости, обусловленного отдельными поступательными или вращательными колебаниями судна как твердого тела на поверхности спокойной воды.

Таким образом, поставленная задача сводится к последовательному определению потенциалов  $\varphi_j$ , обусловленных колебаниями судна и потенциала дифрагированного волнения  $\varphi_7$ .

**Решение задачи.** Построение решения сформулированной трехмерной задачи основано на использовании теоремы Грина, согласно которой для каждого потенциала  $\varphi_j$ , можно записать:

$$\varphi_j(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS, \quad (2)$$

где  $G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1)$  - функция Грина для пространственного пульсирующего источника, расположенного в точке с координатами  $(\xi_1, \eta_1, \zeta_1)$ ;  $Q_i$  - его интенсивность, подлежащая определению.

Функция Грина определяется, согласно [8], для случая жидкости конечной глубины  $h$ , как:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \int_0^\infty \frac{2(k+v)e^{-kh} \operatorname{ch}k(\zeta+h) \operatorname{ch}k(\zeta_1+h) J_0(kR) dk}{k \operatorname{sh}kh - v \operatorname{ch}kh} + i2\pi \frac{(\mu_0^2 - v^2) \operatorname{ch}\mu_0(\zeta+h) \operatorname{ch}\mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v} J_0(\mu_0 R), \quad (3)$$

где  $r = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2 + (\zeta - \zeta_1)^2}$  - расстояние между точкой, находящейся в жидкости, и точкой, в которую помещен источник;  $r_1 = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2 + (\zeta + \zeta_1 + 2h)^2}$  - расстояние между точкой в жидкости и точкой, представляющей собой зеркальное отражение источника относительно дна водоема;  $R = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2}$ ;  $v = \frac{\omega^2}{g}$  - волновое число.

Выражение для функции Грина (3) может быть представлено, согласно John [8], в виде бесконечных рядов:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = 2\pi \frac{(v^2 - \mu_0^2) \operatorname{ch}\mu_0(\zeta+h) \operatorname{ch}\mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v} (Y_0(\mu_0 R) - iJ_0(\mu_0 R)) + 4 \sum_{k=1}^\infty \frac{(\mu_k^2 + v^2) \cos\mu_k(\zeta+h) \cos\mu_k(\zeta_1+h)}{(\mu_k^2 + v^2)h - v} K_0(\mu_k R), \quad (4)$$

где  $\mu_k$  - положительные корни уравнения  $\mu_k \operatorname{tg} \mu_k h + v = 0$ ;  $J_0, Y_0$  - функции Бесселя и Неймана.

Выражение (4) для функции Грина более удобно при вычислениях и используется в большинстве практических случаев. Однако при  $R=0$  функция Макдональда  $K_0$  стремится к бесконечности. То же самое имеет место и при малых значениях  $R$ , поэтому при  $\mu_k R \leq 0.1$  следует использовать выражение (3). Для расчета функции Грина, согласно данному выражению, необходимо применить теорему о вычетах, поскольку подынтегральная функция имеет полюсы,  $i\mu_1, i\mu_2, i\mu_3, \dots, i\mu_k$ . Тогда окончательный вид формулы (3) при  $\mu_k R \leq 0.1$  будет иметь вид:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} - 4\pi \sum_{k=1}^\infty \frac{(v \cos\mu_k h + \mu_k \sin\mu_k h) \sin\mu_k h \cos\mu_k(\zeta+h) \cos\mu_k(\zeta_1+h) \cdot I_0(\mu_k R)}{-\sin(\mu_k h) + v h} + i \frac{2\pi(\mu_0^2 - v^2) \operatorname{ch}\mu_0(\zeta+h) \operatorname{ch}\mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v} \cdot I_0(\mu_0 R)$$

Неизвестная интенсивность источников  $\sigma_j(\xi, \eta, \zeta)$  в (2) определяется из кинематических граничных условий на поверхности тела  $S$ :

$$-\frac{1}{2} \sigma_j(\xi, \eta, \zeta) + \frac{1}{4\pi} \iint_s (\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS = -\frac{n_j}{\partial \varphi_0} \left. \begin{matrix} j = 1, \dots, 6 \\ j = 7 \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

$$n_1 = \cos(n, \xi); n_2 = \cos(n, \eta); n_3 = \cos(n, \zeta);$$

где  $n_4 = \eta \cos(n, \zeta) - \zeta \cos(n, \eta); n_5 = \zeta \cos(n, \xi) - \xi \cos(n, \zeta);$

$$n_6 = \xi \cos(n, \eta) - \eta \cos(n, \xi).$$

Полученное уравнение (5) является интегральным уравнением Фредгольма второго рода относительно комплексной интенсивности источников. Для его численного решения смоченная поверхность объекта разбивается на конечное число плоских элементов – панелей. Граничные условия (1) записываются для центральной точки каждого элемента. Данный подход трансформирует интегральное уравнение (5) в систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных интенсивностей источников:

$$-\frac{1}{2} \sigma_{jm} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jn} \frac{\partial}{\partial n} G_{nm} \Delta S_n = -\frac{n_{jm}}{\partial \varphi_0} \left. \begin{matrix} j = 1, \dots, 6 \\ j = 7 \end{matrix} \right\},$$

где  $N$  - число элементов панелей;  $\sigma_{jn}$  - интенсивность источника на  $n$ -м элементе;

$\sigma_{jm}$  - интенсивность источника в контрольной точке,  $\Delta S_n$  - площадь  $n$ -го элемента;

$n_{jm}, (-\frac{\partial}{\partial n} \varphi_{0m})$  - граничные условия, выполняемые в контрольной точке;  $G_{nm}$  - влияние  $n$ -го элемента на функцию Грина для  $m$ -й контрольной точки.

После определения неизвестных интенсивностей потенциалы в каждой контрольной точке могут быть найдены следующим образом:

$$\varphi_{jm} = \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jn} G_{nm} \Delta S_n.$$

Как было отмечено ранее, для решения сформулированной трехмерной задачи необходимо, прежде всего, представить смоченную поверхность судна как совокупность плоских элементов или панелей. В настоящее время описание корпуса судна осуществляется обычно с помощью прямоугольных или треугольных панелей или их комбинаций.

В настоящей работе выбрана аппроксимация треугольными панелями как обеспечивающая лучшим образом неразрывность поверхности судна из-за хорошей состыковки отдельных элементов между собой (рис.2).

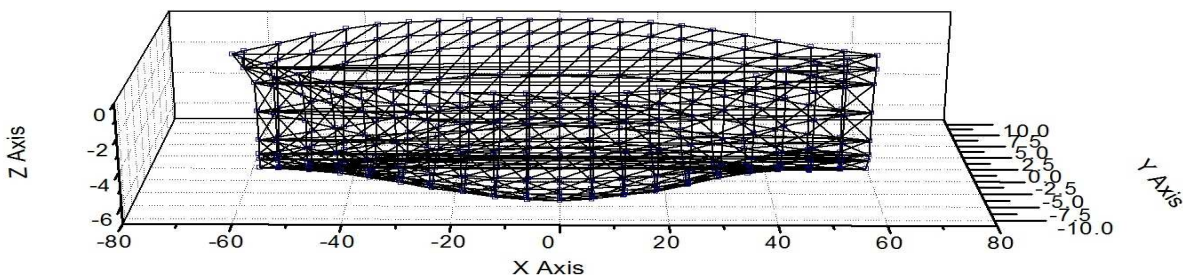


Рис. 2. Представление смоченной поверхности судна 60-й серии с помощью треугольных панелей.



Для каждой треугольной панели определяются координаты её центра  $x_0, y_0, z_0$ , составляющие внешней нормали к её поверхности  $n_x, n_y, n_z$ , площадь  $\Delta S_n$ .

Определенные на основании вышеизложенного метода потенциалы позволяют перейти к вычислению давления и действующих на судно гидродинамических сил.

Возмущающие силы и моменты находятся по формуле:

$$F_{B_k} = -\rho i \omega_K e^{-i \omega_K t} \iint_S (\varphi_0 + \varphi_7) \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS - \rho e^{-i \omega_K t} U \iint_S \frac{\partial}{\partial \xi} (\varphi_0 + \varphi_7) \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS, \quad (6)$$

где  $k=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;  $\omega_K = \omega - U v \cos$  - кажущаяся частота.

Инерционно-демпфирующие силы и моменты определяются как:

$$F_k = \rho \sum_{j=1}^6 U_{j0} e^{-i \omega_K t} \iint_S (-\omega_K^2 \varphi_j + iU \omega_K \frac{\partial \varphi_j}{\partial \xi}) \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS = \sum_{j=1}^6 U_{j0} e^{-i \omega_K t} T_{kj},$$

$$\text{где } T_{kj} = \rho \iint_S (-\omega_K^2 \varphi_j + iU \omega_K \frac{\partial \varphi_j}{\partial \xi}) \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS. \quad (7)$$

С другой стороны, инерционно-демпфирующие силы обычно представляют через коэффициенты присоединенных масс и демпфирования [1, 6]:

$$T_{kj} = \omega_K^2 \lambda_{kj} + i \omega_K \mu_{kj} \quad (8)$$

Учитывая комплексную форму потенциалов  $\varphi_j$  и приравнявая (7) и (8), получим:

$$\begin{aligned} \lambda_{kj} &= \rho \iint_S (-Re \varphi_j - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} Im \varphi_j) \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS; \\ \mu_{kj} &= \rho \iint_S (-\omega_K Im \varphi_j - U \frac{\partial}{\partial \xi} Re \varphi_j) \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} dS. \end{aligned} \quad (9)$$

Система дифференциальных уравнений качки с учетом (6) и (9) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} (M + \lambda_{11}) \ddot{\xi}_g + \lambda_{13} \ddot{\zeta}_g + \lambda_{15} \ddot{\psi} + \mu_{11} \dot{\xi}_g + \mu_{13} \dot{\zeta}_g + \mu_{15} \dot{\psi} &= F_{B1} e^{-i \omega_K t} \\ (M + \lambda_{22}) \ddot{\eta}_g + \lambda_{24} \ddot{\theta} + \lambda_{26} \ddot{\chi} + \mu_{22} \dot{\eta}_g + \mu_{24} \dot{\theta} + \mu_{26} \dot{\chi} &= F_{B2} e^{-i \omega_K t} \\ (M + \lambda_{33}) \ddot{\zeta}_g + \lambda_{31} \ddot{\xi}_g + \lambda_{35} \ddot{\psi} + \mu_{33} \dot{\zeta}_g + \mu_{31} \dot{\xi}_g + \mu_{35} \dot{\psi} + \rho g S \zeta_g - \rho g S x_f \psi &= F_{B3} e^{-i \omega_K t} \\ (J_{xx} + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + \lambda_{42} \ddot{\eta}_g + \lambda_{46} \ddot{\chi} + \mu_{44} \dot{\theta} + \mu_{42} \dot{\eta}_g + \mu_{46} \dot{\chi} + g M h_0 \theta &= F_{B4} e^{-i \omega_K t} \\ (J_{yy} + \lambda_{55}) \ddot{\psi} + \lambda_{51} \ddot{\xi}_g + \lambda_{53} \ddot{\zeta}_g + \mu_{55} \dot{\psi} + \mu_{51} \dot{\xi}_g + \mu_{53} \dot{\zeta}_g + g M H_0 \psi - \rho g S \cdot x_f \zeta_g &= F_{B5} e^{-i \omega_K t} \\ (J_{zz} + \lambda_{66}) \ddot{\chi} + \lambda_{62} \ddot{\eta}_g + \lambda_{64} \ddot{\theta} + \mu_{66} \dot{\chi} + \mu_{62} \dot{\eta}_g + \mu_{64} \dot{\theta} &= F_{B6} e^{-i \omega_K t}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $S$  - площадь действующей ватерлинии;  $M$  - масса судна;  $h_0, H_0$  - поперечная и продольная метацентрические высоты;  $J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$  - центральные моменты инерции судна;  $x_f$  - абсцисса центра тяжести площади ватерлинии.

Действительную часть решения системы (10) ищем в традиционном виде [1]:

$$\begin{aligned} \xi_g &= \xi_{g0} \sin(\omega_K t + \delta_\xi); \eta_g = \eta_{g0} \sin(\omega_K t + \delta_\eta); \zeta_g = \zeta_{g0} \sin(\omega_K t + \delta_\zeta); \\ \theta &= \theta_0 \sin(\omega_K t + \delta_\theta); \psi = \psi_0 \sin(\omega_K t + \delta_\psi); \chi = \chi_0 \sin(\omega_K t + \delta_\chi). \end{aligned}$$

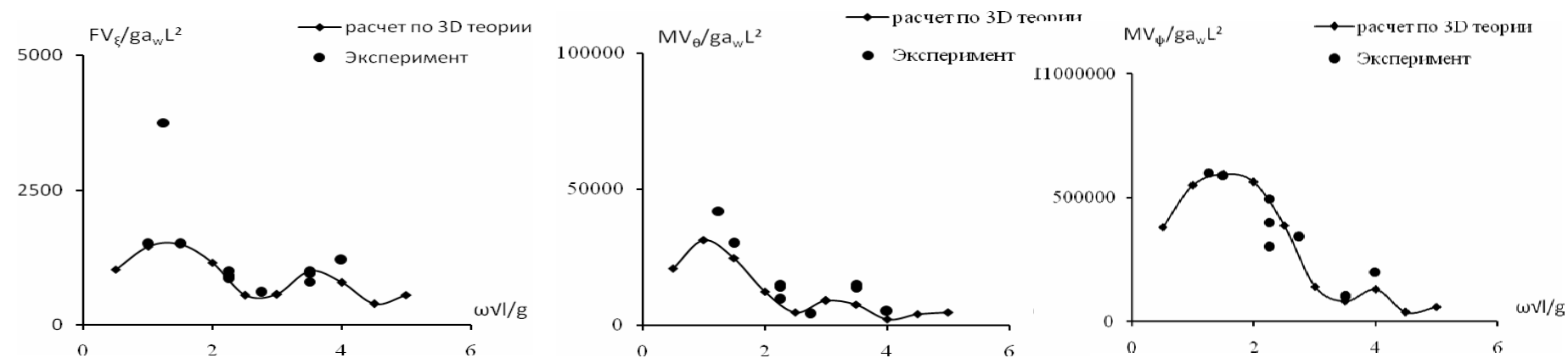


Рис. 3. Значения возмущающих сил и моментов для танкера при  $h/T=1.2$ .

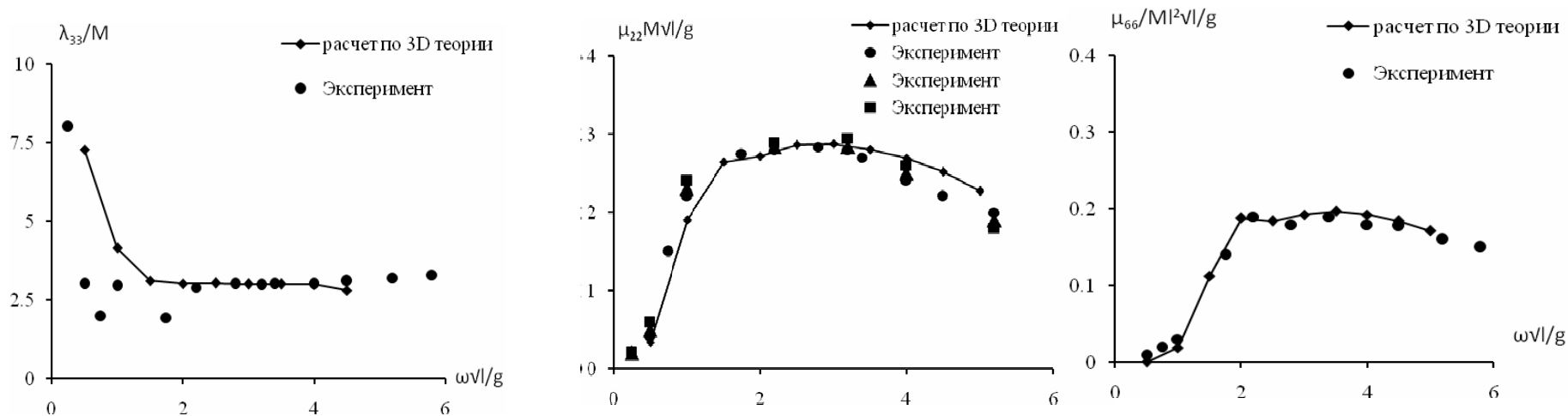


Рис. 4. Значения присоединенных масс и демпфирования для танкера  $h/T=1.2$ .

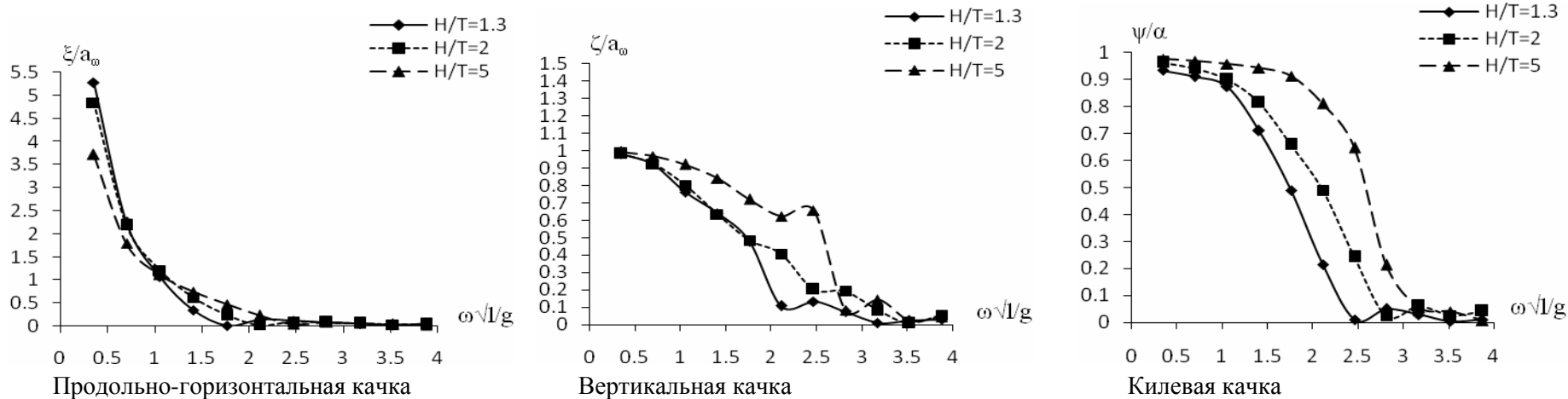


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики качки судна 60-й серии при кусовом угле  $\beta=180^\circ$ ,  $Fr=0.1$  в зависимости от разной глубины.

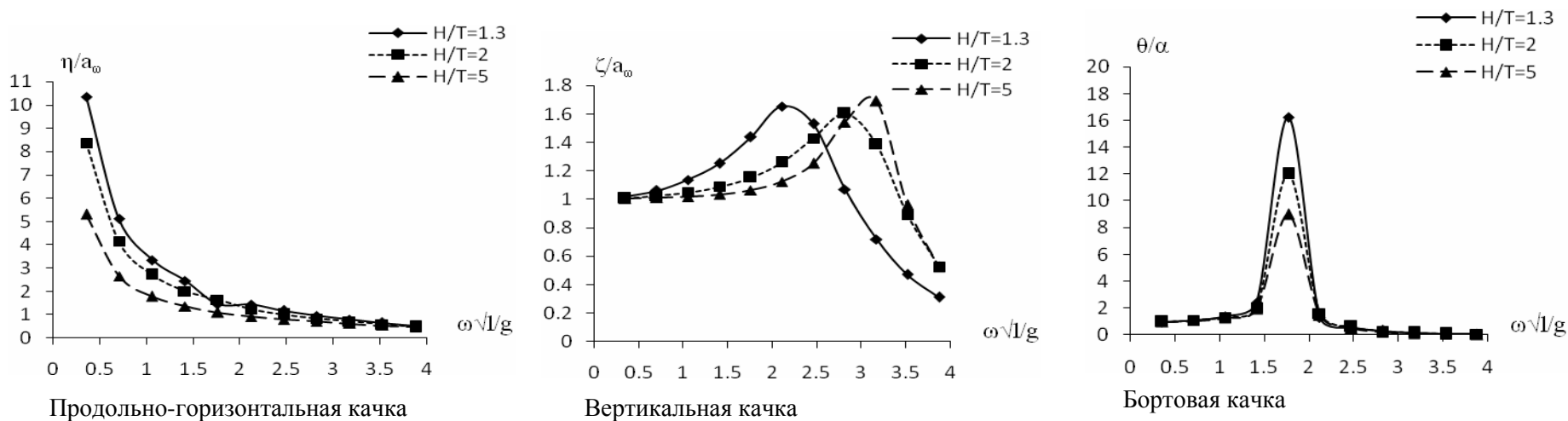


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики качки судна 60-й серии при кусовом угле  $\beta=90^\circ$ ,  $Fr=0$  в зависимости от разной глубины.

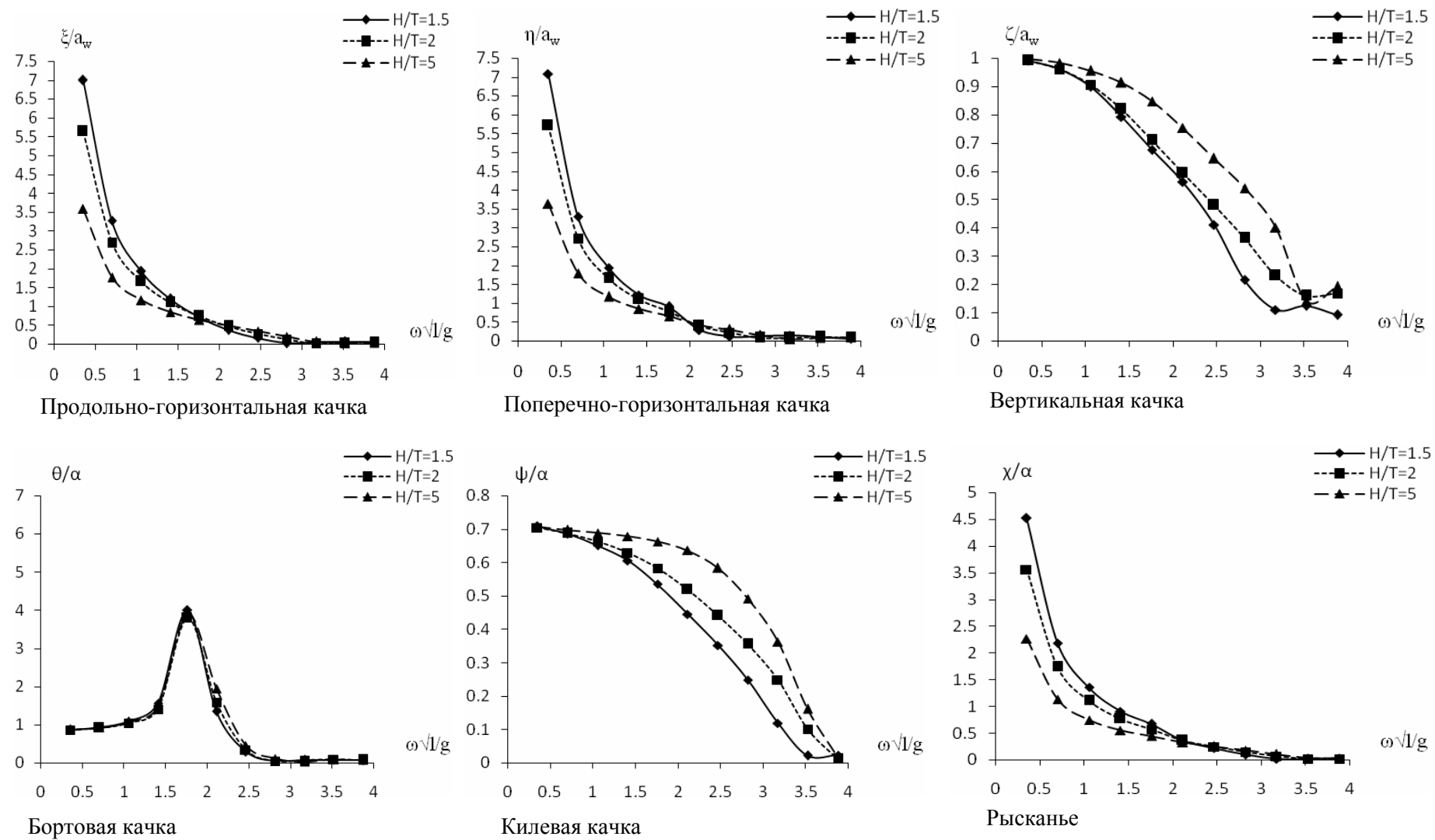


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики качки судна 60-й серии при курсовом угле  $\beta=135^\circ$ ,  $Fr=0$  в зависимости от разной глубины.

**Результаты расчетов.** На основании изложенного метода была разработана программа, реализующая расчеты коэффициентов присоединенных масс, демпфирования, возмущающих сил и амплитуд различных видов качки. Результаты расчетов для нескольких судов были сопоставлены с экспериментальными данными. На рис. 3, 4 представлены результаты сопоставлений расчетных и экспериментальных данных для танкера [6], из которых видно их хорошее согласование.

На рис. 5-7 представлены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик различных видов качки для судна 60-й серии в зависимости от изменения глубины водоема ( $h/T=1,3$ ;  $h/T=2$  и  $h/T=5$ ). Расчеты проводились для трех характерных курсовых углов: 90, 135 и 180.

На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

- уменьшение глубины фарватера приводит к увеличению амплитуд продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной, бортовой качки и рысканья независимо от курсового угла, но к уменьшению амплитуд вертикальной и килевой качки на курсовых углах, отличных от 90 градусов;

- при расположении судна лагом (курсовой угол 90 градусов) происходит смещение резонанса вертикальной качки в область низких частот без значительного уменьшения максимальных амплитуд;

- амплитуды продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной качки и рысканья при уменьшении глубины стремятся к бесконечности при уменьшении частоты возмущения (см.рис. 5-7), что подтверждается экспериментальными результатами для других судов [3].

Таким образом, полученные результаты показывают значительное влияние мелководья на амплитуды различных видов качки судна. Разработанная авторами программа в дальнейшем может быть использована не только для надводных судов, но и для подводных объектов, движущихся в условиях ограниченной глубины.

## Литература

1. Басин А.М., Веледницкий И.О., Ляховицкий А.Г. Гидродинамика судов на мелководье. Л.: Судостроение, 1976.
2. Yu Y.S., Ursell F. Surface waves generated by an oscillating circular cylinder on water of finite depth; theory and experiment // J. of Fluid Mech., 1961. V.2. P.529-549.
3. Takaki, M. On the hydrodynamic forces and moments as acting on the two-dimensional bodies oscillating in shallow water // Res.Inst. of Appl.Mech., Kyushu University, Japan. V.25. No78. 1977.
4. Коханов Э.В. О расчетах гидродинамических характеристик качки контуров на мелководье // Сб. Судостроение и судоремонт. Москва. 1977. Вып.УШ.
5. Элис Я.М. Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при качке судна с креном на мелководье // Сб. Судостроение и морские сооружения. Харьков. 1968. Вып.9.
6. Oortmerssen G. The motions of a ship in shallow water // Ocean Engineering. 1976. V.3. No4.
7. Papanikolaou D. A Three-dimensional Panel Method for Motions and Loads of Ships with Forward Speed. Schiffstechnik, B.39, H.4, 1992.
8. Wehausen J.V., Laitone E.V. Surface waves // Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag. 1960. V.9. P.446-778.

Статья поступила в редакцию 15.11.2009 г.

