

На правах рукописи



Щегорец Светлана Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ ВОЛНОВОГО ДРЕЙФА ПРИ КАЧКЕ ОБЪЕКТА В
УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДЬЯ**

Специальность: 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теории корабля ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» **Семенова Виктория Юрьевна**

Официальные оппоненты:

Кутейников Михаил Анатольевич, доктор технических наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств.

Ярисов Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВПО Балтийский федеральный университет им. И. Канта. Институт транспорта и технического сервиса.

Ведущая организация: ЗАО «Цетральный научно-исследовательский институт Морского Флота», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 25 сентября в 10 ч

на заседании диссертационного совета Д.411.004.01 при ФГУП «Крыловском государственном научном центре» по адресу СПб, Московское шоссе д.44

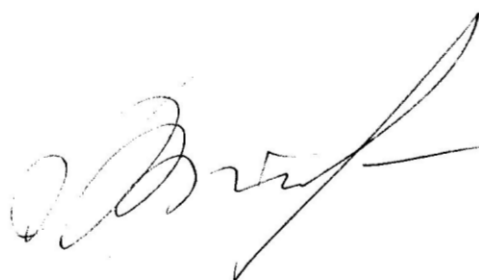
С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и на сайте www.krylov-center.ru

Автореферат разослан _____

Отзывы просим направлять в 2-х экземплярах по адресу:

по почте – 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44, ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Л.И. Вишнеvский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В последние годы большое распространение получают якорные и динамические системы позиционирования судов и плавучих технических средств освоения океана. При проектировании таких систем необходимо подробно знать характер сил, вызывающих дрейф, особенно при эксплуатации на ограниченной глубине. Неучет особенностей их возникновения и развития может привести к аварийным ситуациям. Таким образом, разработка методов определения сил волнового дрейфа (СВД) и их подробное исследование является актуальной задачей, решение которой позволит значительно повысить качество проектирования, безопасность и надежность эксплуатации морских объектов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью настоящей диссертационной работы является разработка метода и соответствующего программного комплекса для расчета сил волнового дрейфа в жидкости ограниченной и неограниченной глубины на основании трехмерной потенциальной теории.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В работе используются численные и экспериментальные методы исследования. С помощью известных теоретических разработок были созданы расчетные методы и реализующие их компьютерные программы. Экспериментальные методы использовались для верификации компьютерных методов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы состоит в разработке численного метода и основанного на нем программного комплекса, позволяющих корректно учитывать при определении сил и моментов волнового дрейфа непрямолинейность корпуса вблизи свободной поверхности жидкости и учитывать при этом один из важных факторов, связанный с безопасностью мореходности, как изменение глубины акватории.

ДОСТОВЕРНОСТЬ выводов, полученных в настоящей работе, подтверждается обоснованностью допущений и математическими выкладками, результатами экспериментальных исследований и сравнением с результатами других авторов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ настоящей диссертации заключается в разработке программного комплекса для определения составляющих силы и момента волнового дрейфа, действующих на водоизмещающие объекты различного типа и назначения на регулярном и нерегулярном волнении в условиях глубокой и мелкой воды.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Полученные результаты работы были использованы лабораторией мореходности ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при выполнении федерально-целевой работы для отечественного заказчика в 2013 г.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения и результаты диссертации были представлены на следующих конференциях: RAO Offshore – 2011 г., Крыловские чтения – 2009, 2011 и 2013 гг.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 7 работ. Из них 2 работы в личном авторстве, доля автора в остальных – 50%. В изданиях, определяемых Перечнем ВАК РФ, опубликованы 4 статьи, где доля автора в одной статье составляет 100%, в остальных – 50%.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, списка литературы, включающего 70 наименований. Общий объем работы составляет 188 страниц, в том числе 79 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ:

1. численный метод определения сил волнового дрейфа на мелководье;
2. результаты исследования влияния изменения глубины акватории и отдельных видов качки на составляющие сил волнового дрейфа;
3. результаты исследования влияния непрямолинейности корпуса вблизи ватерлинии на силы волнового дрейфа.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и основные задачи исследований, приводится краткое содержание работы по главам.

В первой главе дается обзор работ, посвященных методам расчета сил волнового дрейфа, проводится анализ полученных в данных исследованиях результатов; обосновываются цели исследования.

Основоположником гидродинамической теории возникновения сил волнового дрейфа является Маруо, в своей работе японский ученый в аналитической форме показал дифракционную природу возникновения СВД. Именно явление дифракции волн о неподвижную преграду, рассматриваемые во многих ранних исследованиях (важные положения (результаты) гидродинамической теории качки, полученные Хаскиндом, Хавелоком, Урселлом, Тасаи, Эвансом при решении частных задач), позволили в дальнейшем развить и перейти от простейших задач, таких как колебания контура, к более сложным пространственным задачам воздействия волнения на объект. Несмотря на новый этап в развитии гидродинамической теории волнового дрейфа, связанный с именем Ньюмана, который на основании двумерной теории получил выражения для горизонтальных СВД и разворачивающего момента, действующих на тело произвольной формы, все изложенные методы определяли силы и момент волнового дрейфа через асимптотические характеристики возмущенного волнового движения как средние за период набегающих волн возмущающие силы и момент, при этом на основании закона сохранения производилось интегрирование по контрольной поверхности в бесконечно удаленной области. Такой подход дает простые выражения, но не позволяет выделить в явном виде характерные составляющие искомых величин и оценить влияние формы плавающего тела и набегающего волнения на характеристики волнового дрейфа.

Первые шаги в новом направлении в изучении гидродинамики волнового дрейфа были предприняты Оортмерсеном, Далзелем, Пинкстером, Фалтинсенем, Молином, Папаниколао. В основе так называемого метода ближнего поля при определении сил второго порядка рассматривается известное распределение давления вокруг тела и непосредственное его интегрирование по смоченной поверхности. Данный метод основан на ранее разработанных алгоритмах, обеспечивающих решение задачи (плоской или пространственной) определения характеристик распределенных г\д источников по поверхности тела. Широкое распространение метода позволило получать достаточно приемлемые для практики результаты. Тем не менее, работы перечисленных авторов ограничены следующим:

- для аппроксимации смоченной поверхности использовались прямоугольные панели, что не позволяло достаточно точно описать объекты, имеющие специфические кормовые и носовые оконечности;
- не учитывалась величина наклона ватерлинии по отношению к свободной поверхности жидкости (непрямолинейность корпуса вблизи ватерлинии);
- данные исследования проведены при условии бесконечно глубокой жидкости. В этих работах не проводилось детального исследования влияния мелководья на СВД.

В связи с этим, встает вопрос о необходимости разработки численного метода, позволяющего решить трехмерную задачу определения сил волнового дрейфа, действующих на плавающий объект, свободного от перечисленных недостатков.

На основании вышеизложенного, основной целью настоящей диссертационной работы является разработка численного метода и соответствующего программного комплекса для расчета сил волнового дрейфа в жидкости ограниченной и неограниченной глубины на основании трехмерной потенциальной теории.

Во второй главе формулируется общая задача о качке судна, проводится линейризация граничных условий, излагается численный метод определения СВД.

В параграфе 2.1 рассматривается общая постановка задачи о качке судна на мелководье. Приводятся граничные условия, необходимые для решения задачи.

Для решения рассматриваемой задачи используются три классические системы координат, используемые в теории качки корабля (рис.1):

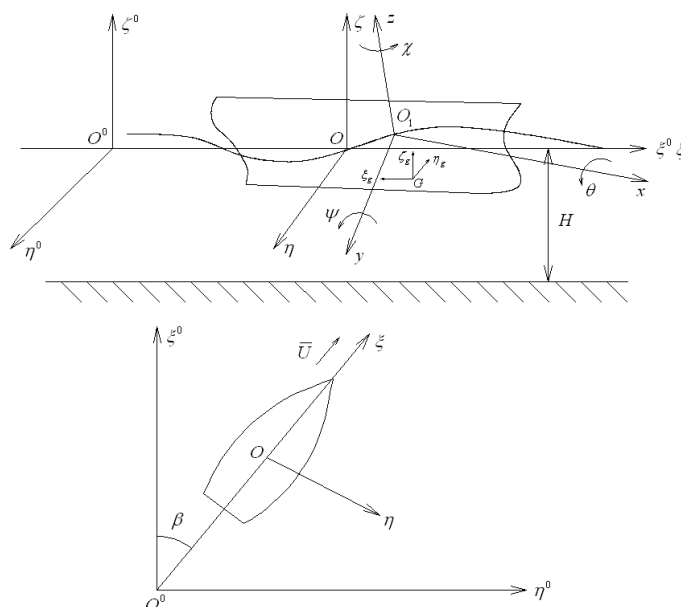


Рис.1 – Системы координат

Искомый потенциал скорости движения жидкости должен удовлетворять:

1) уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \zeta^2} = 0; \quad (1)$$

2) граничным условиям на свободной поверхности и смоченной поверхности тела;

$$p = p_0, \quad \frac{d}{dt} \Omega(\xi, \eta, \zeta, t) = 0; \quad (2)$$

3) граничным условиям на бесконечности и дне акватории (усл-ие излучения и затухания)

$$\text{при } \zeta \rightarrow -h \quad \text{grad } \Phi \Rightarrow 0. \quad (3)$$

В параграфе 2.2 проводится линейризация граничных условий, приводятся общие формулы для сил волнового дрейфа.

Для определения силы и момента волнового дрейфа, которые являются силами второго порядка малости, необходимо предварительно провести линейризацию общей нелинейной задачи качки. Для этого наиболее рациональным является применение метода малого параметра. Потенциал скорости движения жидкости может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Phi(\xi, \eta, \zeta, t) = & \Phi^{(1)}(\xi, \eta, \zeta, t) + \Phi^{(2)}(\xi, \eta, \zeta, t) = \left(\sum_i \varepsilon_i \varphi_i^{(1)}(\xi, \eta, \zeta) \right) e^{-j\omega t} + \\ & + \left(\sum_{i,k} \varepsilon_i \varepsilon_k \varphi_{ik}^{(2)}(\xi, \eta, \zeta) \right) e^{-j2\omega t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $i=k=1,2,3,4,5,6,7$.

Согласно линейной теории качки потенциал $\Phi^{(1)}$ можно представить в виде следующей суперпозиции:

$$\Phi = \varphi_0(\xi, \eta, \zeta) e^{-j\omega t} + \varphi_7(\xi, \eta, \zeta) e^{-j\omega t} + \sum_{j=1}^6 U_j \varphi_j; \quad (5)$$

где φ_0 – потенциал набегающего волнения

φ_7 – потенциал дифрагированного движения жидкости,

φ_j – потенциал скорости возмущенного движения жидкости, обусловленного отдельными поступательными или вращательными колебаниями судна на поверхности спокойной воды.

Потенциал набегающего волнения для жидкости безграничной глубины определяется как:

$$\varphi_0 = -j \frac{g}{\omega} \zeta_w e^{v\zeta} e^{jv(\xi \cos \beta + \eta \sin \beta)}; \quad (6)$$

Для случая жидкости конечной глубины h :

$$\varphi_0 = -j \frac{g}{\omega} \zeta_w \frac{ch\mu_0(\zeta + H)}{ch\mu_0 H} e^{jv(\xi \cos \beta + \eta \sin \beta)} \quad (7)$$

где β – курсовой угол;

ω – частота набегающего волнения,

μ_0 определяется из уравнения $\mu_0 \tanh \mu_0 H = \frac{\omega^2}{g}$;

μ_0 – положительный корень трансцендентного уравнения, удовлетворяющий условию $\mu_0 > v$ и имеющий вид:

$$\mu_0 \tanh \mu_0 H = \frac{\omega^2}{g} = v, \quad (8)$$

Гидродинамическое давление в жидкости определяется интегралом Лагранжа – Коши с точностью до второго порядка малости:

$$\begin{aligned} p(x, y, z, t) = & \varepsilon p^{(1)}(x, y, z, t) + \varepsilon^2 p^{(2)}(x, y, z, t) = \\ & - p \left\{ g \zeta_g(t) + yg \theta(t) - xg \psi(t) + (\xi_g + (\psi z - \chi y)) \frac{\partial^2 \Phi^{(1)}}{\partial t \partial \xi}(x, y, z) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \right)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Зная давление, можно определить главный вектор и главный момент гидродинамических сил:

$$\begin{aligned}\bar{F} &= \iint_{\Omega} (p^{(1)}\bar{n} + p^{(2)}\bar{n} + p^{(1)}\bar{n}^{(1)})d\Omega; \\ \bar{M} &= \iint_{\Omega} (p^{(1)}(\bar{n} \times \bar{r}_0) + p^{(2)}(\bar{n} \times \bar{r}_0) + p^{(1)}(\bar{n}^{(1)} \times \bar{r}_0))d\Omega.\end{aligned}\quad (10)$$

где $\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega$ – мгновенная смоченная поверхность судна, рассматриваемая в виде суммы двух частей как:

Ω_0 – постоянная часть, соответствующая равновесному положению;

$\Delta\Omega$ – переменная смоченная поверхность, имеющая порядок ε .

В работах J. A. Pinkster, G. van Oortmerssen определение составляющей $\Delta\Omega$ производится по формуле $\Delta\Omega = z_W dl$. При этом не учитывается непрямолинейность корпуса вблизи свободной поверхности жидкости.

В настоящей работе, предлагается корректный учет непрямолинейности корпуса. Для этого, в соответствии с геометрией корпуса вблизи линии пересечения ватерлинии и свободной поверхности, представим:

$$\Delta\Omega = z_W(\operatorname{cosec}(\alpha_{WL}))dl, \quad (11)$$

где α_{WL} – угол развала борта в соответствующем сечении.

$$\operatorname{cosec}(\alpha_{WL}) = \frac{1}{\sin(\alpha_{WL})}. \quad (12)$$

Тогда, выражения для постоянных составляющих нелинейных сил и моментов второго порядка будут иметь вид:

$$\begin{aligned}F_C^{(2)}(x, y, z) &= \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left\{ \left[\xi_g + (\psi z - \chi y) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \xi} + \left[\eta_g - (\theta z - \chi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + \right. \\ &+ \left. \left[\zeta_g + (\theta y - \psi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} \right\} \bar{n} d\Omega_0 + \rho \frac{1}{4} \iint_{\Omega_0} \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \eta} + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) \bar{n} d\Omega_0 + \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} (g(\zeta_g - x\psi + y\theta) + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t})(\bar{\alpha} \times \bar{n}) d\Omega_0 - \\ &- \frac{1}{4} \int_{WL} z_W \bar{z}_W \bar{n}(\operatorname{cosec}(\alpha_{WL})) dl.\end{aligned}\quad (13)$$

где $\bar{n} = (\cos(n, x); \cos(n, y); \cos(n, z))$;

$$\bar{\alpha} \times \bar{n} = \begin{bmatrix} (\bar{\psi} \cos(n, z) - \bar{\chi} \cos(n, y)); & (\bar{\chi} \cos(n, x) - \bar{\theta} \cos(n, z)); \\ (\bar{\theta} \cos(n, y) - \bar{\psi} \cos(n, x)) \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned}
M_C^{(2)}(x, y, z) = & \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left\{ \left[\xi_g + (\psi z - \chi y) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \xi} + \right. \\
& + \left[\eta_g - (\theta z - \chi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \eta} + \left[\zeta_g + (\theta y - \psi x) \right] \frac{\partial^2 \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial t \partial \zeta} \left. \right\} (\bar{r} \times \bar{n}) d\Omega_0 + \\
& + \rho \frac{1}{4} \iint_{\Omega_0} \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \xi} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\Phi}^{(1)}}{\partial \zeta} \right) (\bar{r} \times \bar{n}) d\Omega_0 + \\
& + \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega_0} \left(g(\zeta_g - x\psi + y\theta) + \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \right) (\bar{\alpha} \times (\bar{r} \times \bar{n})) d\Omega_0 - \\
& - \frac{1}{4} \int_{WL} z_W \bar{z}_W (\bar{r} \times \bar{n}) (\operatorname{cosec}(\alpha_{WL})) dl;
\end{aligned} \tag{14}$$

В параграфе 2.3 излагается численный метод определения потенциалов первого порядка и их производных, необходимых для вычисления сил волнового дрейфа.

Для определения потенциалов используется теорема Грина, согласно которой, можно записать:

$$\varphi_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) d\Omega, \tag{15}$$

где $G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1)$ – функция Грина для пространственного пульсирующего источника, расположенного в точке с координатами (ξ_1, η_1, ζ_1) .

Для случая жидкости конечной глубины H :

$$\begin{aligned}
G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = & \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \\
& + \int_0^{\infty} \frac{2(k + \nu) e^{-kH} \cosh k(\zeta + H) \cosh k(\zeta_1 + H)}{k \sinh kH - \nu \cosh kH} J_0(kR) dk + \\
& + i2\pi \frac{(\mu_0^2 - \nu^2) \cosh \mu_0(\zeta + H) \cosh \mu_0(\zeta_1 + H)}{(\mu_0^2 - \nu^2)H + \nu} J_0(\mu_0 R),
\end{aligned} \tag{16}$$

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 жидкости, и точкой, представляющей собой зеркальное отражение источника относительно дна водоема;

$R = \sqrt{(\xi - \zeta_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2}$. – аргумент функции Бесселя.

Выражение для функции Грина может быть представлено в виде бесконечных рядов:

$$\begin{aligned}
G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) &= \\
&= 2\pi \frac{(v^2 - \mu_0^2) \cosh \mu_0(\zeta + H) \cosh \mu_0(\zeta_1 + H)}{(\mu_0^2 - v^2)H + v} (Y_0(\mu_0 R) - iJ_0(\mu_0 R)) + \\
&+ 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + v^2) \cos \mu_k(\zeta + H) \cos \mu_k(\zeta_1 + H)}{(\mu_k^2 + v^2)H - v} K_0(\mu_k R),
\end{aligned} \tag{17}$$

где μ_k – положительные корни уравнения.

$$\mu_k \tan \mu_k H + v = 0, \tag{18}$$

при этом $\pi(k - \frac{1}{2}) \leq \mu_k H \leq \pi k$.

Для случая жидкости бесконечной глубины функция Грина имеет вид:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + 2v \int_0^{\infty} \frac{e^{k(\zeta + \zeta_1)}}{k - v} J_0(kR) dk + i2\pi v e^{k(\zeta + \zeta_1)} J_0(vR), \tag{19}$$

где $r_1 = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2 + (\zeta - \zeta_1)^2}$;

r и R определяются согласно выражениям, указанным ранее.

Выражение для функции Грина при $R \neq 0$ можно представить в более удобном для практических вычислений, виде:

$$G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + vF + i2\pi v e^{v(\zeta + \zeta_1)} J_0(vR), \tag{20}$$

где $F = -\pi e^{-v|\zeta + \zeta_1|} (H_0(vR) + Y_0(vR)) - 2 \int_0^{v|\zeta + \zeta_1|} e^{-t-v|\zeta + \zeta_1|} ((vR)^2 + t^2)^{-1/2} dt$.

Здесь $H_0(vR)$ – функция Струве; Y_0 – функция Неймана.

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

$$-\frac{1}{2} \sigma_j(\xi, \eta, \zeta) + \frac{1}{4\pi} \iint_s \sigma(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) d\Omega = \begin{cases} n_j & j = 1, \dots, 6 \\ -\frac{\partial \varphi_0}{\partial n} & j = 7 \end{cases}, \tag{21}$$

где $\frac{\partial G}{\partial n} = \frac{\partial G}{\partial \xi} n_\xi + \frac{\partial G}{\partial \eta} n_\eta + \frac{\partial G}{\partial \zeta} n_\zeta$,

G – функция Грина,

n_ξ, n_η, n_ζ – направляющие нормали к элементу смоченной поверхности.

Для численного решения данной системы интегральных уравнений смоченная поверхность объекта разбивается на конечное число плоских элементов – панелей треугольной формы. Граничные условия записываются для одной точки каждого элемента, находящейся в его центре. Данный подход трансформирует интегральные уравнения в систему линейных алгебраических уравнений для неизвестной интенсивности источников:

$$-\frac{1}{2}\sigma_{jm} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jn} \frac{\partial}{\partial n} G_{nm} \Delta\Omega_n = -\frac{n_{jm}}{\frac{\partial \varphi_0}{\partial n}} \left| \begin{array}{l} j=1,..6 \\ j=7 \end{array} \right. , \quad (22)$$

где N – число элементов панелей, σ_{jn} – интенсивность источника на n -м элементе,

σ_{jm} – интенсивность источника в контрольной точке, $\Delta\Omega_n$ – 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.

Система уравнений качки судна будет имеет вид:

$$\begin{aligned} (M + \lambda_{11}) \ddot{\xi}_g + \lambda_{13} \ddot{\zeta}_g + \lambda_{15} \ddot{\psi} + \mu_{11} \dot{\xi}_g + \mu_{13} \dot{\zeta}_g + \mu_{15} \dot{\psi} &= F_{B1} e^{-i\omega_k t}; \\ (M + \lambda_{22}) \ddot{\eta}_g + \lambda_{24} \ddot{\theta} + \lambda_{26} \ddot{\chi} + \mu_{22} \dot{\eta}_g + \mu_{24} \dot{\theta} + \mu_{26} \dot{\chi} &= F_{B2} e^{-i\omega_k t}; \\ (M + \lambda_{33}) \ddot{\zeta}_g + \lambda_{31} \ddot{\xi}_g + \lambda_{35} \ddot{\psi} + \mu_{33} \dot{\zeta}_g + \mu_{31} \dot{\xi}_g + \mu_{35} \dot{\psi} + \rho g S \zeta_g - \rho g S X_f \psi &= \\ = F_{B3} e^{-i\omega_k t}; & \\ (J_{xx} + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + \lambda_{42} \ddot{\eta}_g + \lambda_{46} \ddot{\chi} + \mu_{44} \dot{\theta} + \mu_{42} \dot{\eta}_g + \mu_{46} \dot{\chi} + D h_0 \theta &= F_{B4} e^{-i\omega_k t}; \\ (J_{yy} + \lambda_{55}) \ddot{\psi} + \lambda_{51} \ddot{\zeta}_g + \lambda_{53} \ddot{\xi}_g + \mu_{55} \dot{\psi} + \mu_{51} \dot{\zeta}_g + \mu_{53} \dot{\xi}_g + D H_0 \psi - \rho g S X_f \zeta_g &= \\ = F_{B5} e^{-i\omega_k t}; & \\ (J_{zz} + \lambda_{66}) \ddot{\chi} + \lambda_{62} \ddot{\eta}_g + \lambda_{64} \ddot{\theta} + \mu_{66} \dot{\chi} + \mu_{62} \dot{\eta}_g + \mu_{64} \dot{\theta} &= F_{B4} e^{-i\omega_k t}. \end{aligned} \quad (23)$$

Решения системы (23) ищется в виде:

$$\begin{aligned} \xi_g &= \xi_{g0} \sin(\omega_k t + \delta_\xi); \quad \eta_g = \eta_{g0} \sin(\omega_k t + \delta_\eta); \quad \zeta_g = \zeta_{g0} \sin(\omega_k t + \delta_\zeta) + \zeta^{(2)}; \\ \theta &= \theta_0 \sin(\omega_k t + \delta_\theta) + \theta^{(2)}; \quad \psi = \psi_0 \sin(\omega_k t + \delta_\psi) + \psi^{(2)}; \quad \chi = \chi_0 \sin(\omega_k t + \delta_\chi), \end{aligned} \quad (24)$$

Входящие в систему (23) коэффициенты присоединенных масс и демпфирования, возмущающие силы определяются по хорошо известным формулам.

Производные потенциалов, входящие в выражения для сил волнового дрейфа, определяются согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_i(\xi, \eta, \zeta)}{\partial \xi} &= \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1)}{\partial \xi} d\Omega; \\ \frac{\partial \varphi_i(\xi, \eta, \zeta)}{\partial \eta} &= \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1)}{\partial \eta} d\Omega; \\ \frac{\partial \varphi_i(\xi, \eta, \zeta)}{\partial \zeta} &= \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \sigma_i(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1)}{\partial \zeta} d\Omega. \end{aligned} \quad (25)$$

Определенные по формулам (13) – (14) СВД позволяют найти статические перемещения второго порядка как:

$$\zeta^{(2)} = \frac{M_x^{(2)}}{D h_0}; \quad \theta^{(2)} = \frac{M_y^{(2)}}{D H_0}; \quad \psi^{(2)} = \frac{F_\zeta^{(2)}}{\rho g S}. \quad (26)$$

В третьей главе проводится апробация разработанного численного метода, исследование влияния на силы волнового дрейфа различных факторов, таких как: изменение глубины, курсового угла распространения волнения (KVB), непрямолинейности корпуса. Приводятся результаты исследования влияния отдельных видов качки.

В параграфе 3.1 проводится апробация разработанного программного комплекса. В качестве объектов, были выбраны несколько судов различного типа и назначения: танкер, баржа, судно серии 60 ($Cv = 0,6$), трубоукладочное судно, плавучий кран и танкер «река-море». Основные характеристики судов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики судов

Название Судов	L /B	T	δ	α	Кол-во панелей
Серия-60:	6,5	6,968	10,854	0,600	684
Танкер	6,6	18,900	0,850	0,900	790
Баржа	3,0	10,000	1,000	1,000	488
Трубоукладочное судно	6,8	8,000 9,652	0,843	0,951	2036
Транспортное судно	7,5	4,945	0,687	0,797	566
Контейнеровоз S175	7,0	9,500	0,572	0,709	1178
Танкер «река-море»	8,4	4,200	0,871	0,957	1610
Плавучий кран	2,3	3,060	0,749	0,901	1438

В качестве примера приведены аппроксимации смоченных поверхностей некоторых рассматриваемых объектов.

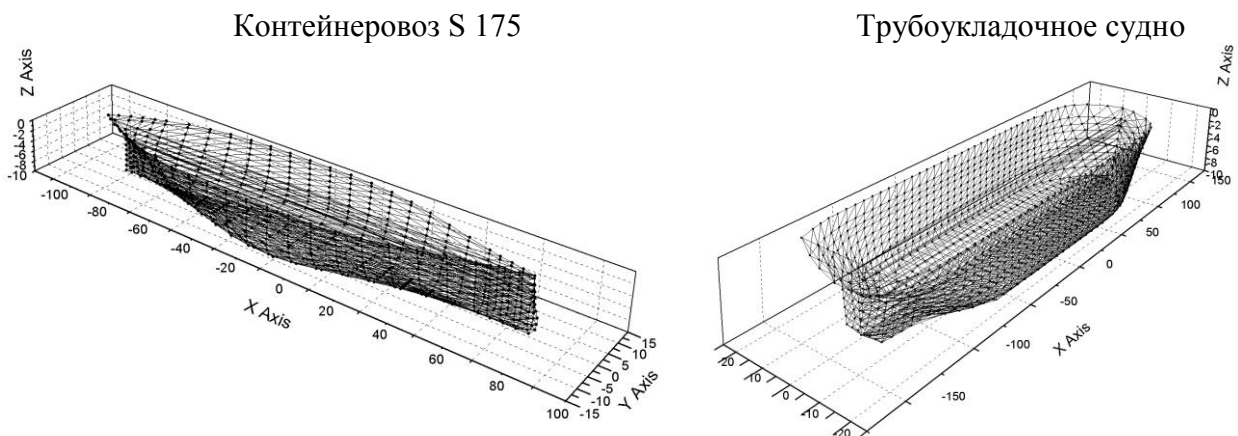


Рис.2 – Аппроксимация смоченных поверхностей объектов

Расчеты сил волнового дрейфа для танкера, баржи и судна 60-й серии были сопоставлены с экспериментальными данными и расчетами, полученными другими авторами: Пинкстер, Ньюман, Папаниколао (рис. 3).

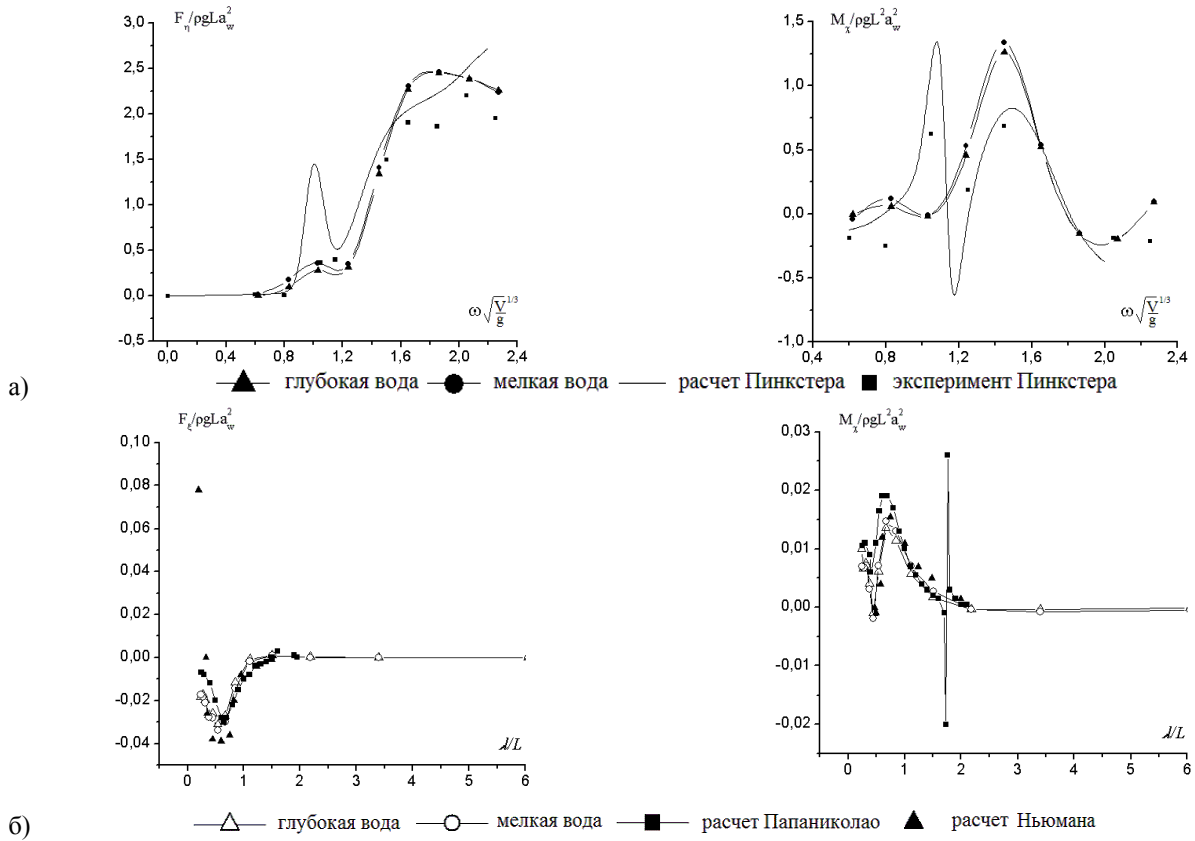


Рис. 3 – Безразмерные горизонтальные СВД и разворачивающий момент, действующие на: а) баржу и б) судно серии 60 на регулярном волнении при КУВ равном 135 и 150° соответственно

Как видно из рис. 3 имеется хорошее согласование результатов, полученных по разработанным автором программам с расчетами и экспериментами других исследователей.

Результаты расчетов сил волнового дрейфа для трубоукладочного судна и танкера «река-море» сопоставлялись с экспериментальными результатами, полученными автором в мореходном бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Характерные результаты приведены на рис. 4 – 5.

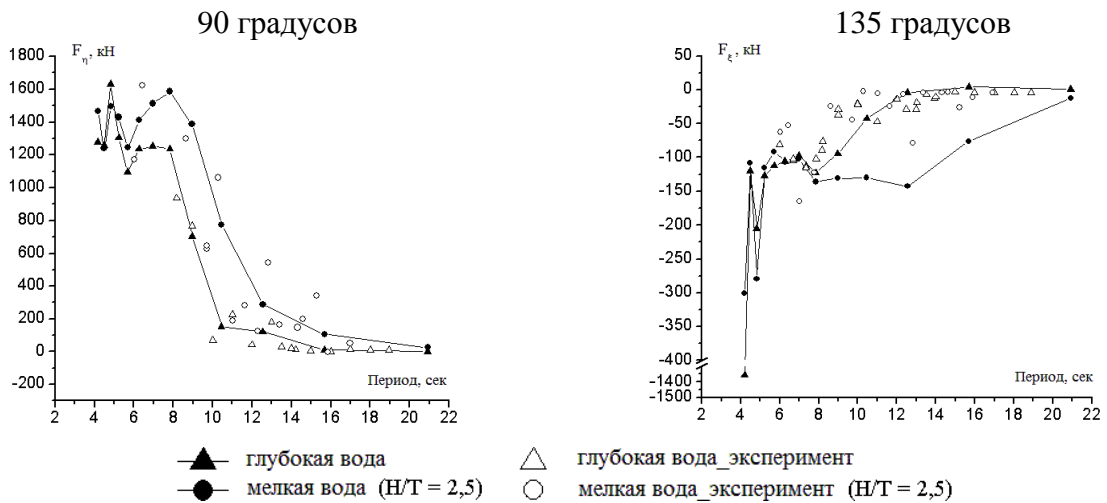


Рис. 4 – Поперечная и продольная сила волнового дрейфа, действующие на трубоукладочное судно (осадка Т = 9,652 м) на регулярном волнении при КУВ равном 90 и 135° в условиях глубокой и мелкой воды

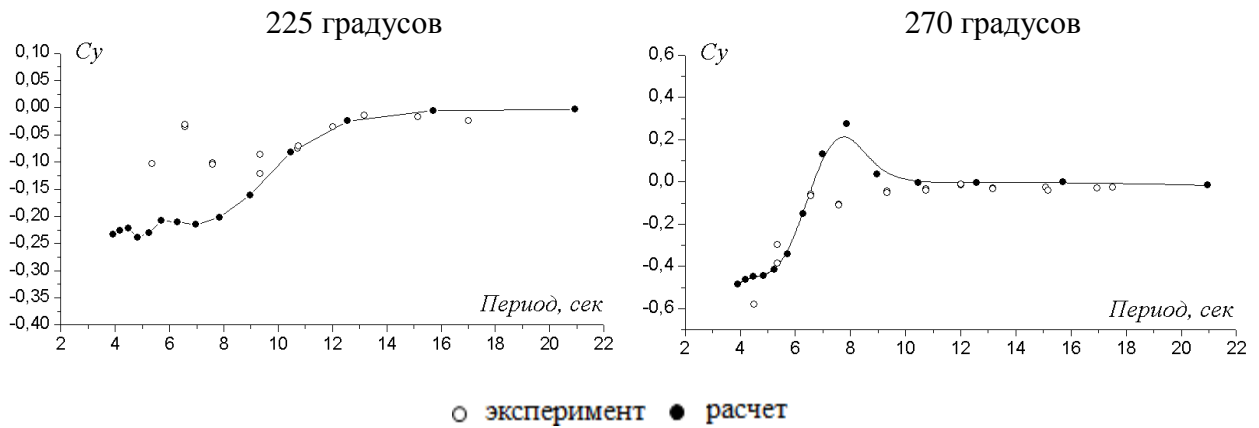


Рис. 5 – Результаты численного и экспериментального исследования безразмерного коэффициента поперечно-горизонтальной СВД, действующей на танкер «река-море» в условиях мелкой воды при КУВ равном 225 и 270° в зависимости от периода набегающего регулярного волнения

Из представленных сопоставлений видно, что имеется достаточно удовлетворительное согласование результатов, полученных автором по разработанным программам с экспериментальными данными, что подтверждает достоверность представленных результатов расчета СВД.

Немаловажным фактором для апробации программ является получение и сопоставление результатов численных расчетов силы и момента волнового дрейфа, действующих на морские объекты на волнении в условиях глубокой и мелкой воды, выполненных при разбивке смоченной поверхности объекта на разное количество панелей.

На рис. 6 приведены безразмерные величины всех составляющих силы и момента волнового дрейфа, действующих на транспортное судно при КУВ = 135° в условиях мелкой воды ($H/T = 1,5$), в зависимости от частоты регулярного волнения ω , 1/сек. Количество треугольных панелей n при трех вариантах разбивки составляло: 264, 438 и 566.

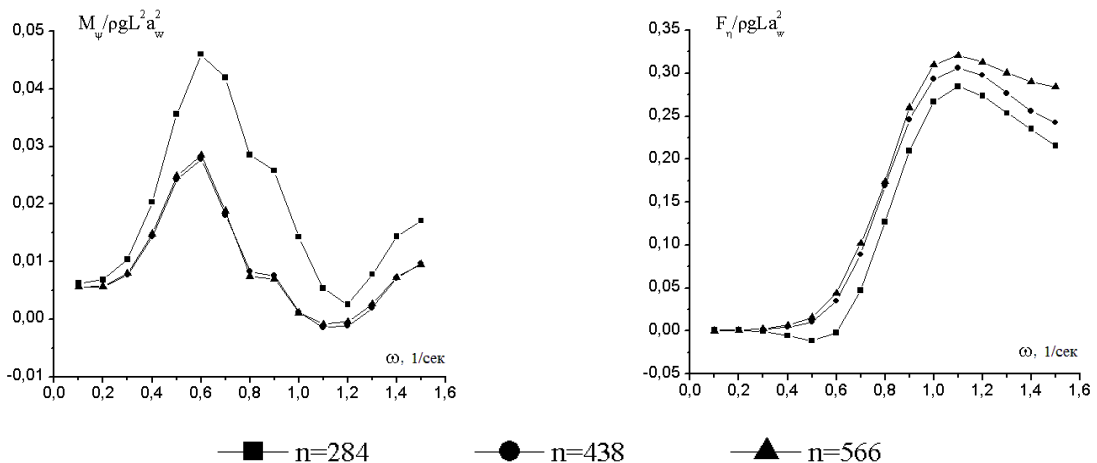


Рис. 6 – Безразмерные составляющие силы и момента волнового дрейфа, действующие на транспортное судно на регулярном волнении при КУВ = 135° в условиях мелкой воды

Как видно из представленного рисунка, меньшее количество панелей приводит к многократному увеличению или уменьшению продольной силы, дифференцирующего и разворачивающего моментов волнового дрейфа.

В параграфе 3.2 приводятся результаты исследования влияния мелководья на величины СВД и момента.

Одной из основных целей настоящей работы является исследование влияния мелководья на составляющие силы и момента волнового дрейфа и непосредственно на их компоненты.

На рис. 7 представлены безразмерные поперечная, вертикальная СВД и кренящий момент, действующие на баржу и судно серии 60 при КУВ = 90° при различных отношениях глубины воды к осадке.

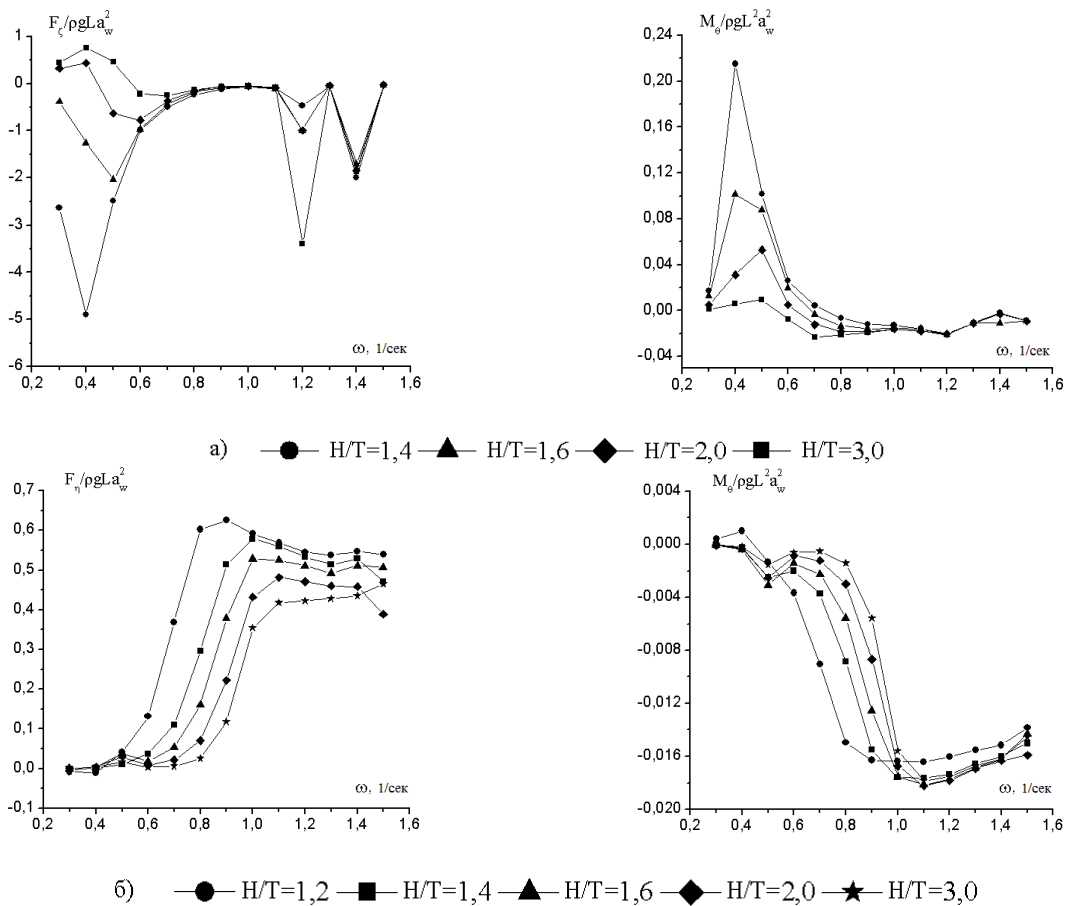


Рис. 7 – Безразмерные поперечная, вертикальная силы и кренящий момент волнового дрейфа, действующие на: а) баржу и б) судно серии 60 на регулярном волнении при КУВ = 90° в условиях мелкой воды

Анализ полученных результатов показал, что уменьшение относительной глубины воды приводит к возрастанию всех составляющих СВД и момента и сдвигу их максимальных значений в область низких частот для всех типов судов, независимо от курсового угла распространения волн.

Из выражения для СВД (13) можно выделить три компоненты, величины которых в отдельности имеют различное влияние на общую силу волнового дрейфа, действующую на морской объект на волнении. Эти компоненты представляют собой следующее:

- амплитуды различных видов перемещений объекта, входящие в подынтегральное уравнение первого слагаемого и второе слагаемое, представляющее собой квадратичный член интеграла Лагранжа, которые устанавливают непосредственную зависимость величины СВД и момента от качки объекта;

- третье слагаемое, относящееся к силам инерционной природы;
- четвертое слагаемое выражения для СВД учитывает возвышение свободной поверхности, устанавливая тем самым связь между формой корпуса судна (развал бортов) и величиной СВД.

$$F^I = \rho \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\xi_g + (\psi \zeta - \chi \eta) \right] \frac{\partial^2 \partial \bar{\Phi}}{\partial t \partial \xi} + \left[\eta_g - (\theta \zeta - \chi \xi) \right] \frac{\partial^2 \partial \bar{\Phi}}{\partial t \partial \eta} + \left[\zeta_g + (\psi \xi + \theta \eta) \right] \frac{\partial^2 \partial \bar{\Phi}}{\partial t \partial \zeta} \bar{n} d\Omega - \rho \frac{1}{4} \iint_{\Omega} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \xi} + \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \eta} + \frac{\partial \Phi}{\partial \zeta} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \zeta} \right) \bar{n} d\Omega; \quad (27)$$

$$F^{II} = -\frac{1}{4} \int_{WL} z_W \bar{z}_W \bar{n} (\operatorname{cosec}(\alpha_{WL})) dl; \quad F^{III} = -\frac{1}{2} \iint_{\Omega} \bar{p} (\bar{\alpha} \times \bar{n}) d\Omega.$$

Характерные результаты приведены на рис. 8.

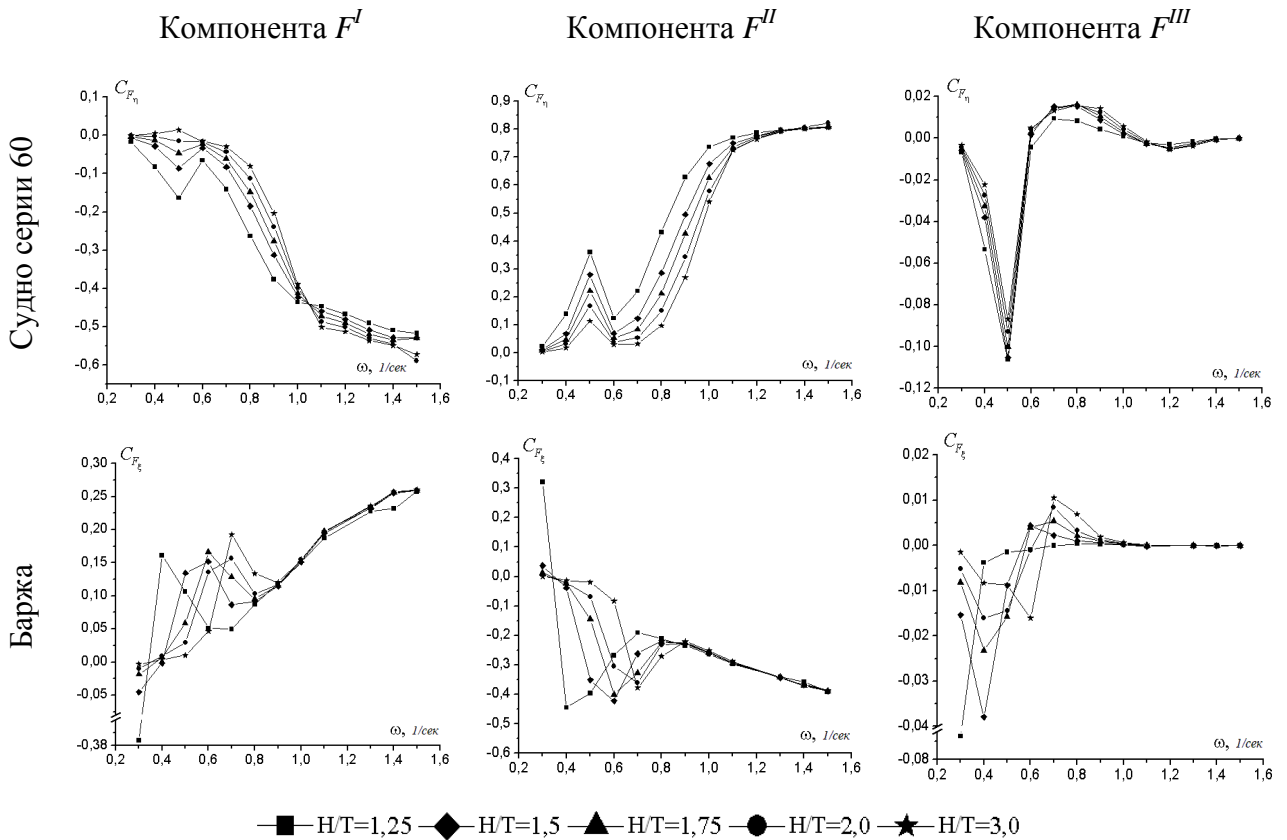


Рис. 8 – Компоненты безразмерных коэффициентов СВД, действующих на различные суда на регулярном волнении при КУВ = 135° в условиях мелкой воды

Анализ проведенного сравнения трех компонент величин СВД и момента для различных типов судов показал, что в общем балансе преобладают компоненты, обусловленные влиянием квадратичного члена Лагранжа-Коши и изменением свободной поверхности. Данные компоненты имеют величины одного порядка, но противоположные по знаку. Отсутствие учета одной из них приведет к грубым ошибкам при вычислении СВД. Третья компонента данных сил имеет влияние только в области резонансов бортовой и вертикальной качки.

Также был проведен анализ влияния курсового угла распространения волн на величину компонент составляющих силы и момента волнового дрейфа.

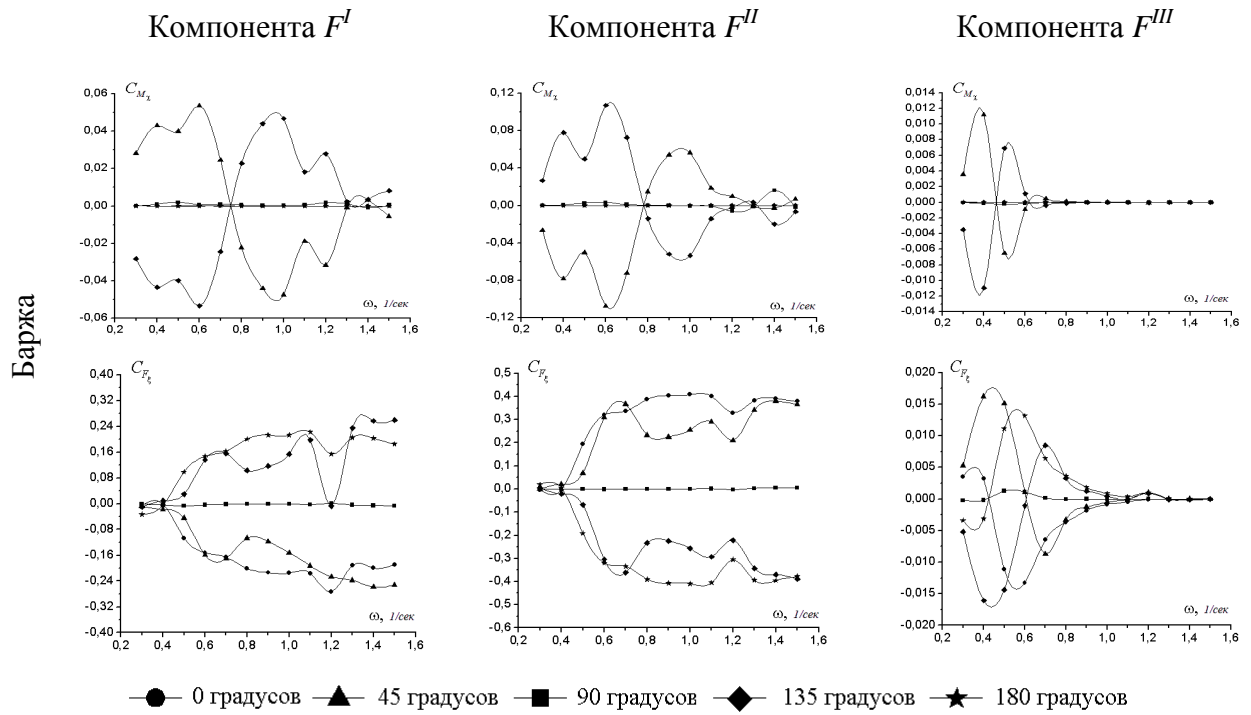


Рис. 9 – Компоненты коэффициента продольной СВД и разворачивающего момента, действующих на баржу на регулярном волнении при КУВ равном 0, 45, 90, 135 и 180° в условиях мелкой воды при $H/T = 2$

Полученные результаты (рис. 9) показали, что для коэффициентов СВД выполняются следующие равенства:

$$C_{F_z}(\beta) = -C_{F_z}(\pi - \beta), \quad C_{M_x}(\beta) = -C_{M_x}(\pi - \beta), \quad C_{F_y}(\beta) = C_{F_y}(\pi - \beta). \quad (28)$$

В параграфе 3.3 проводится исследование влияния отдельных видов качки на силы волнового дрейфа. На рис. 10 приведены результаты расчетов СВД с учетом всех шести видов качки и без их учета (неподвижное судно).

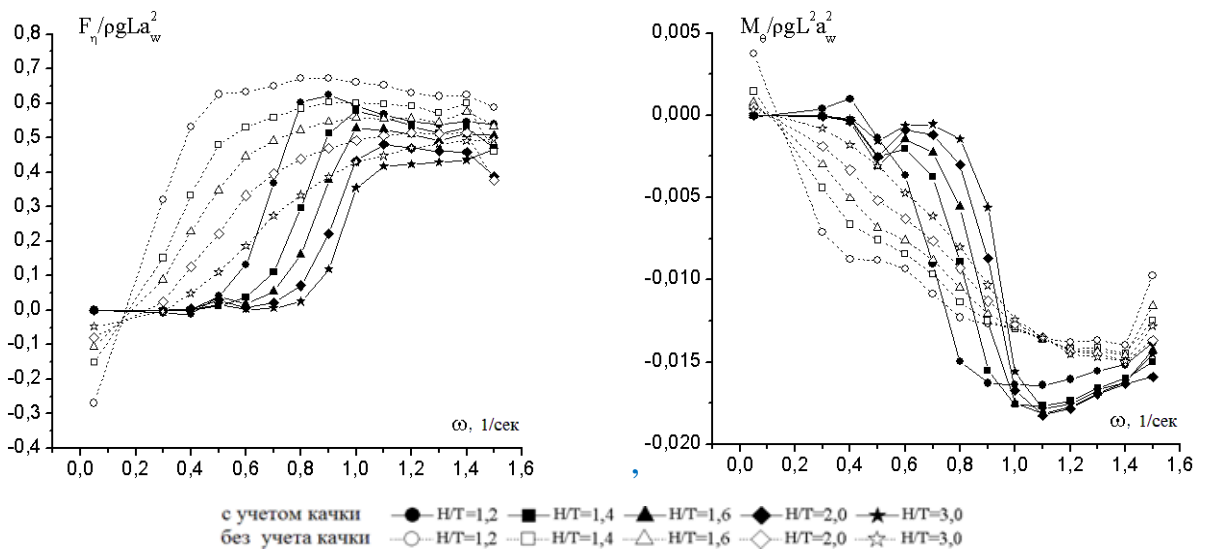


Рис. 10 – Силы и момент волнового дрейфа, действующие на судно серии 60 ($C_v = 0,6$) в условиях мелкой воды, в зависимости от изменения относительной глубины при КУВ = 90°

Анализ полученных результатов расчета показал, что:

- влияние качки возрастает с уменьшением относительной глубины H/T и в значительной мере проявляется в области средних волн. В области низких частот, где при $\omega < 0,4$ значения безразмерных составляющих силы и момента волнового дрейфа, полученные с учетом всех видов колебаний близки к нулю, в отличие от аналогичных величин, действующих на неподвижное судно;
- при уменьшении H/T происходит смещение максимумов значений СВД в область более длинных волн, что обусловлено сдвигом резонансных амплитуд вертикальной и килевой качек в ту же сторону;
- в области коротких волн влияние всех видов качек исчезает и значения всех величин СВД и момента, действующих на свободно плавающее судно, становятся такими же, как и для неподвижно зафиксированного объекта, так как при $\omega > 1$ амплитуды всех колебаний стремятся к нулю.

На рис. 11 ÷ 13 представлены результаты исследования влияния одного из основных видов качки. С этой целью расчеты сил волнового дрейфа последовательно проводились без учета вертикальной, килевой и бортовой качки.

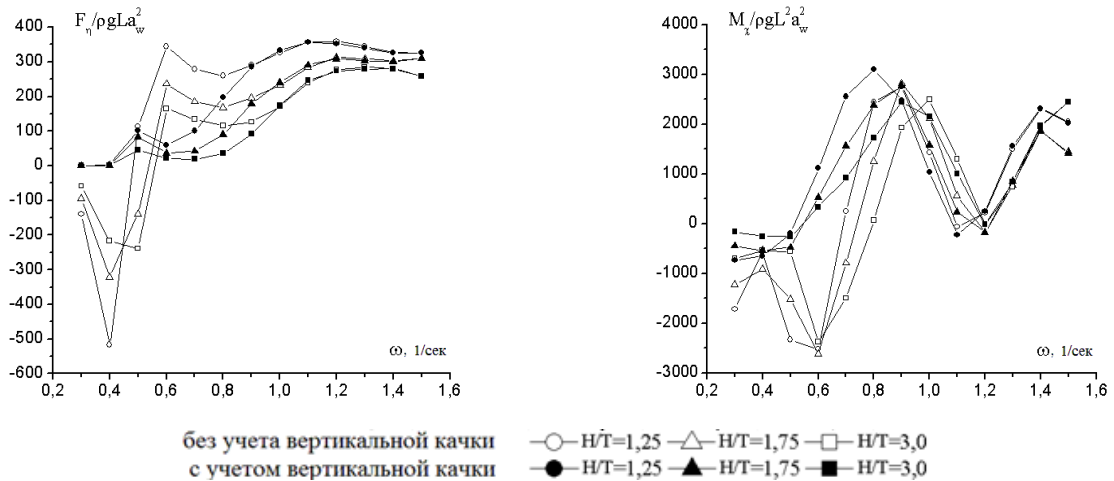


Рис. 11 – Безразмерные поперечная сила и разворачивающий момент волнового дрейфа, действующие на судно серии 60 при КУВ = 135° на регулярном волнении в условиях мелкой воды

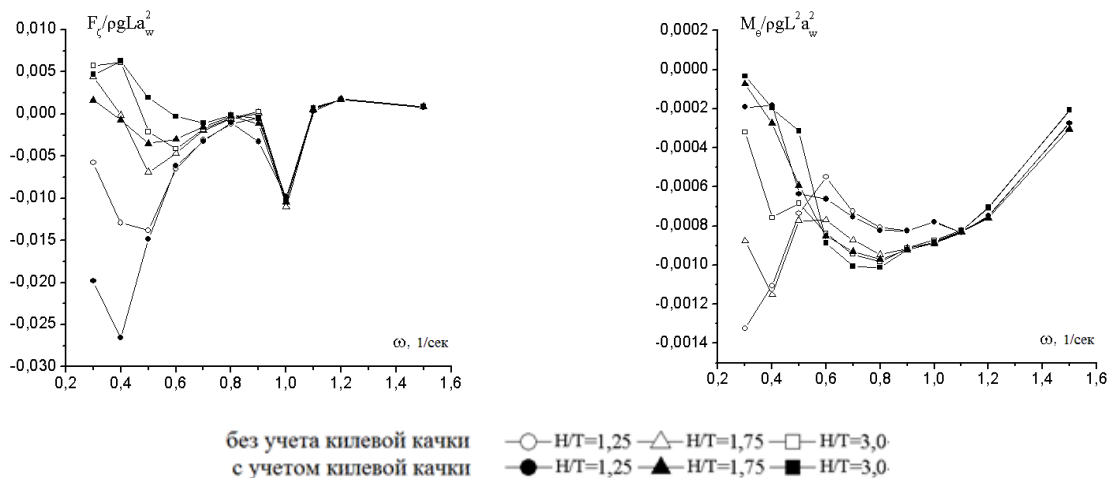


Рис. 12 – Безразмерные вертикальная сила и кренящий моменты волнового дрейфа, действующие на танкер при КУВ = 45°

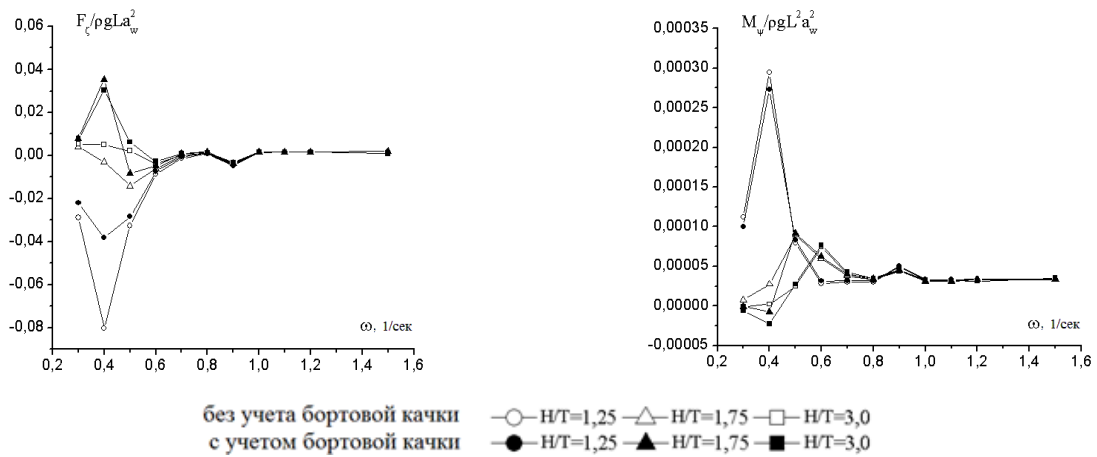


Рис. 13 – Безразмерные вертикальная сила и кренящий момент волнового дрейфа, действующие на танкер на регулярном волнении при КУВ = 90° в условиях мелкой воды

Проведенное исследование показало, что отсутствие одного из видов колебаний в разной степени воздействует на безразмерные величины составляющих силы и момента волнового дрейфа и по-разному проявляет себя для различных типов судов. Отсутствие учета амплитуд вертикальной качки приводит, в основном, к значительному уменьшению значений поперечной СВД в зоне низких частот, независимо от значения относительной глубины акватории и курсового угла, а также к изменению значений разворачивающего момента в той же области частот как в качественном, так и в количественном отношении. Неучет амплитуд вертикальных колебаний приводит к смене знака данного момента.

Неучет амплитуд бортовой качки проявляется в зоне резонанса данного вида колебаний и приводит к уменьшению значений поперечной, вертикальной СВД и дифференцирующего моментов в этой области частот, независимо от глубины акватории.

Отсутствие учета амплитуд килевой качки в расчетах СВД приводит к увеличению значений поперечных составляющих, смене знака постоянных кренящего и разворачивающего моментов на противоположный, и уменьшению дифференцирующего момента, а также к изменению продольной составляющей как в количественном, так и в качественном отношении. Таким образом, точное определение всех составляющих силы и момента волнового дрейфа возможно только при учете амплитуд всех шести видов колебаний судна. Исключение из расчетов одного из них приводит к существенным погрешностям не только в количественном, но и в качественном смысле.

В параграфе 3.4 приводятся результаты исследования влияния непрямолинейности бортов судна на составляющие СВД и момента

В работе проведено исследование влияния непрямолинейности корпуса на основании предложенного метода ее учета. В качестве примера были рассмотрены судно серии 60 и контейнеровоз S175, имеющих развал в кормовой части (рис. 14).

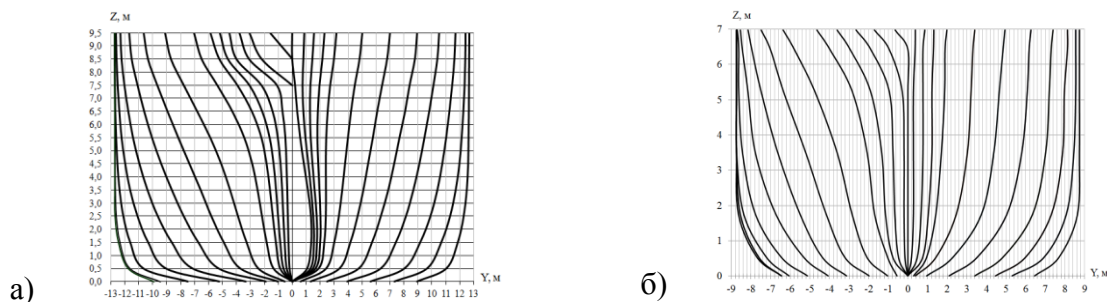


Рис 14 – Вид корпуса а) контейнеровоза S 175 и б) судна серии 60

Характерные результаты приведены на рис.15 – 16.

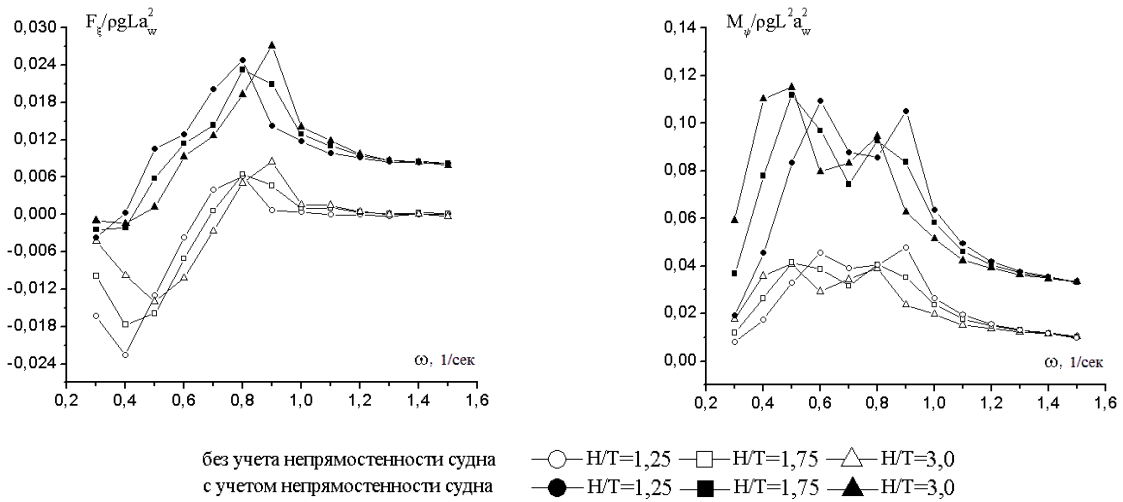


Рис. 15 – Безразмерные продольная, вертикальная силы и дифференцирующий момент волнового дрейфа, действующие на контейнеровоз S 175 при КУВ = 0° в условиях мелкой воды

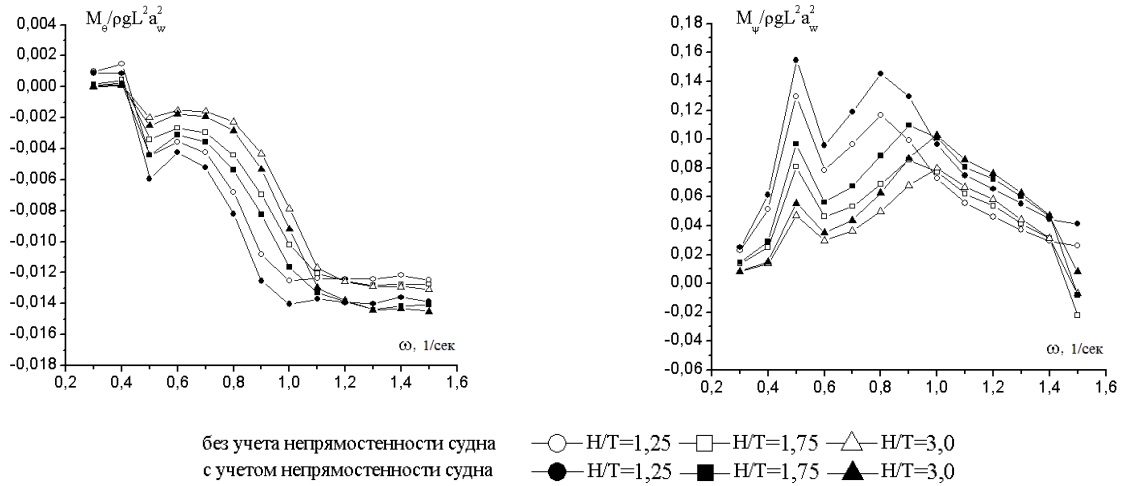


Рис. 16 – Безразмерные вертикальная сила, кренящий и дифференцирующий моменты волнового дрейфа, действующие на: судно серии 60 при КУВ = 45° в условиях мелкой воды

Анализ полученных результатов расчета, позволяет сделать следующие выводы: неучет в численных расчетах развала бортов судна, в основном, приводит к снижению значений безразмерных величин сил, в среднем, на 15 – 20% и момента волнового дрейфа – на 30 – 40% в области средних и высоких частот и к увеличению отдельных составляющих в области низких частот ($\omega < 0,5$);

- влияние развала в большей степени проявляется на попутном, встречном и косом волнении и в меньшей степени при положении судна лагом;
- влияние непрямолинейности корпуса увеличивается при уменьшении относительной глубины воды.

В четвертой главе рассматривается методика расчета сил волнового дрейфа на нерегулярном волнении; проводится исследование влияния мелководья.

Для расчета СВД на нерегулярном волнении использовались следующие выражения:

$$\bar{F}_i(\beta) = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot L_{PP} \cdot \int_0^{\infty} C_{F_i}(\omega, \beta) \cdot S_{\zeta}(\omega) d\omega, \quad \bar{M}_i(\beta) = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot L_{PP}^2 \cdot \int_0^{\infty} C_{M_i}(\omega, \beta) \cdot S_{\zeta}(\omega) d\omega, \quad (28)$$

где $C_{F_i}(\omega, \beta)$ и $C_{M_i}(\omega, \beta)$ – безразмерные коэффициенты соответствующих проекций силы и момента волнового дрейфа, полученные на регулярном волнении в зависимости от частоты волнения,

$S_{\zeta}(\omega)$, $m^2 \cdot c$ – заданная спектральная плотность волновых ординат.

Для описания спектральной плотности двумерного нерегулярного волнения целесообразно использовать спектр ТМА. Спектральная модель ТМА имеет вид:

$$S_{TMA}(\omega, H) = \Phi_K(\omega, H) S_{JS}(\omega), \quad (29)$$

где $S_{TMA}(\omega, H)$ – спектральная плотность волнения на мелководье,

$S_{JS}(\omega)$ – спектральная плотность волнения на глубокой воде,

$\Phi_K(\omega, H)$ – поправка Китайгородского С. А. для мелкой воды, выражение для которой имеет вид:

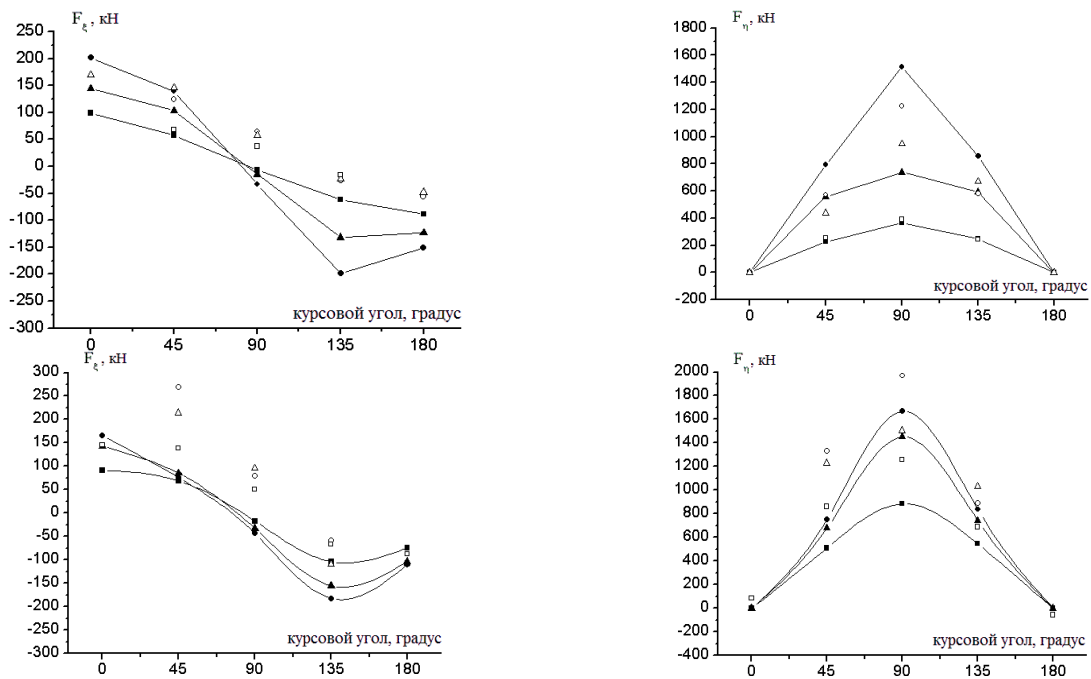
$$\Phi_K(\omega, H) = \left[\frac{k_0(\omega, \infty)}{k(\omega, H)} \right]^3 \frac{\partial k(\omega, H) / \partial \omega}{\partial k_0(\omega) / \partial \omega}; \quad (30)$$

$k(\omega, H)$ – волновое число, соответствующее частоте ω на глубине H и определяемое следующим образом:

$$k(\omega, H) = gk \tanh(kH); \quad (31)$$

$k_0(\omega, \infty)$ – волновое число, соответствующее частоте ω на глубокой воде.

В качестве апробации, результаты расчетов СВД и момента на глубокой и мелкой воде для трубоукладочного судна были сопоставлены с данными эксперимента. Зависимости средних горизонтальных сил и момента приведены на рис. 17.



расчет: ● $T_p = 8$ с, ▲ $T_p = 10$ с, ■ $T_p = 12$ с; эксперимент: ○ $T_p = 8$ с, △ $T_p = 10$ с, □ $T_p = 12$ с

Рис. 17 – Зависимость средних горизонтальных сил, действующих на трубоукладочное судно на нерегулярном волнении ($H_s = 3,5$ м и $T_p = 7, 8$ и 10 с), от курсового угла набегающего волнения в условиях мелкой воды при $H/T = 2,0$

Сравнение экспериментальных и расчетных данных в целом показало удовлетворительное согласование для продольных и поперечных сил.

В работе проводилось исследование влияния изменения относительной глубины на величины СВД на нерегулярном волнении при различных курсовых углах и различной интенсивности волнения. Типичные результаты, полученные для танкера приведены на рис. 18 – 19.

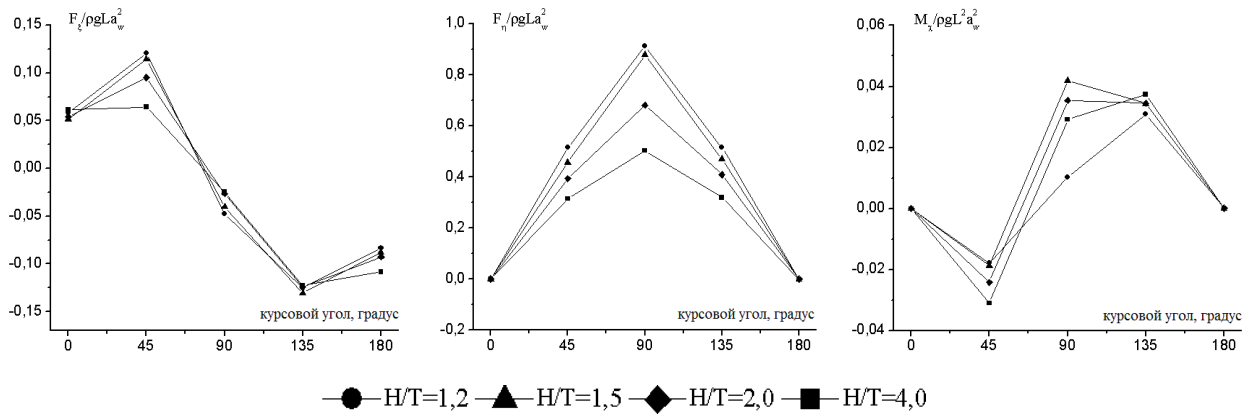


Рис. 18 – Зависимость безразмерных горизонтальных средних сил и момента волнового дрейфа, действующих на танкер на нерегулярном волнении ($H_s = 6,0$ м и $T_p = 12,4$ с) от курсового угла набегания волнения в условиях мелкой воды

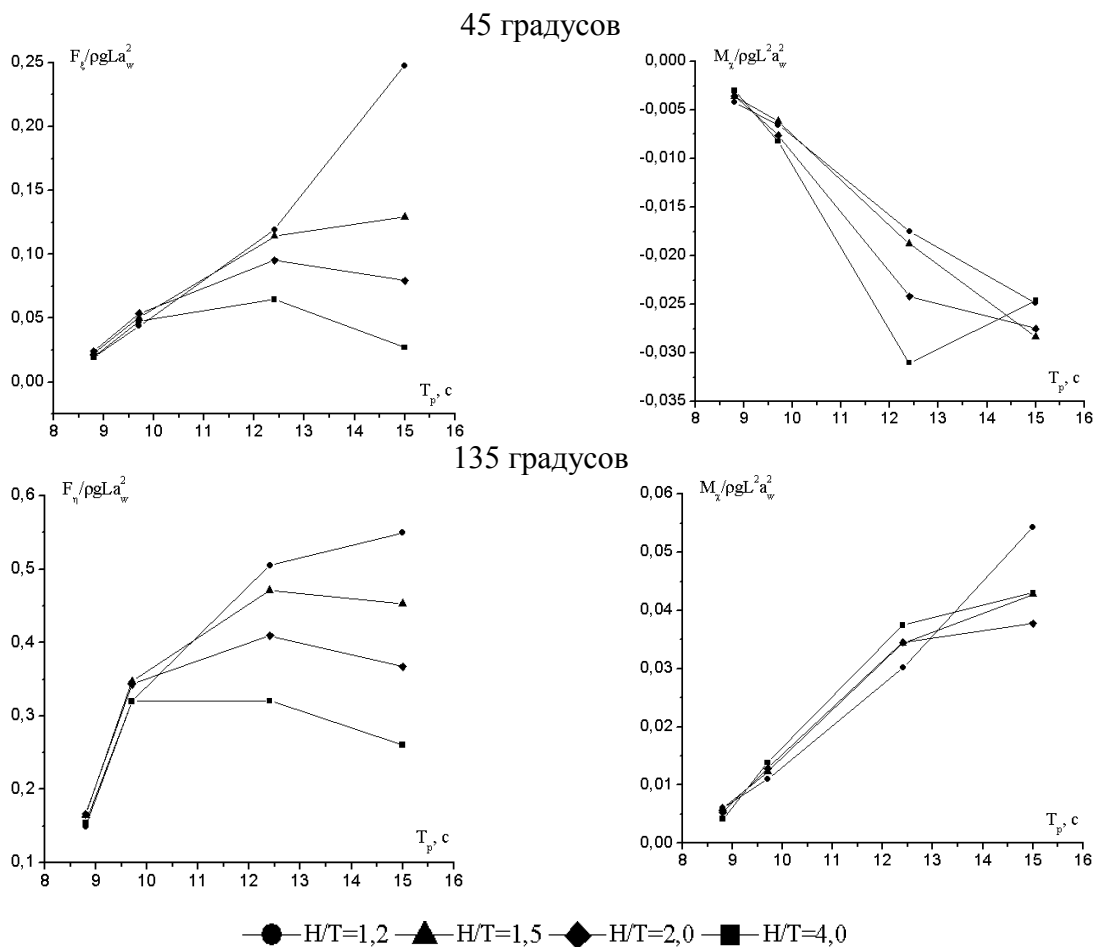


Рис.19 – Зависимости безразмерных горизонтальных средних СВД и разворачивающего момента, действующих на танкер на нерегулярном волнении при КУВ равном 45 и 135°, от периода пика на мелководье

Анализ проведенного исследования на нерегулярном волнении, позволил сделать следующие выводы:

- с уменьшением относительной глубины H/T и увеличением интенсивности волнения значения всех составляющих силы и момента волнового дрейфа, в целом, возрастают для всех объектов различной формы корпуса независимо от значения курсового угла, за исключением встречного и попутного волнения, для которых наблюдается обратный эффект: с уменьшением относительной глубины воды происходит уменьшение значений всех составляющих СВД и момента;
- возрастание значений СВД и момента при увеличении относительной глубины H/T связано с увеличением спектральной плотности. В этом случае значения составляющих волнового дрейфа становятся тем больше, чем больше глубина воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. **Разработан численный метод, соответствующие алгоритмы и программный комплекс**, учитывающий реальную форму корпуса судна вблизи свободной поверхности. Этот комплекс позволяет рассчитывать все **шесть составляющих сил волнового дрейфа** как в бесконечно-глубокой жидкости, так и на мелководье. В целях апробации произведены сравнения полученных результатов с экспериментальными и расчетными данными других авторов для ряда стандартных случаев.

2. **Проведены систематические расчеты сил волнового дрейфа**, на основании которых выполнено **исследование влияния изменения глубины**. Показано, что уменьшение относительной глубины воды приводит к возрастанию всех составляющих сил волнового дрейфа и к сдвигу их максимальных значений в область низких частот.

3. **Впервые выполнено исследование роли отдельных компонентов сил волнового дрейфа**. Показано, что в общем балансе сил преобладают компоненты, обусловленные влиянием изменения свободной поверхности и квадратичного члена Лагранжа-Коши. Неучет в целях упрощения задачи даже одной из этих компонент, приводит к грубым ошибкам при вычислении данных сил.

4. **Рассмотрены особенности влияния различных видов качки на силы волнового дрейфа**. Показано, что учет амплитуд всех шести видов колебаний приводит к качественному и количественному изменению величин сил волнового дрейфа по сравнению с неподвижным судном. Исключение из расчетов хотя бы одного вида качки может привести к существенным погрешностям.

5. **На основании предложенной методики впервые проведено исследование влияния развала бортов на силы волнового дрейфа**. Расчеты показали, что отсутствие корректного учета в численных расчетах величины, характеризующей непрямоугольность корпуса, приводит к значительному снижению значений сил волнового дрейфа в области средних и высоких частот. С уменьшением глубины влияние непрямоугольности корпуса увеличивается.

6. **Рассмотрены особенности расчета сил волнового дрейфа на нерегулярном волнении в условиях мелководья**. Показано, что с уменьшением относительной глубины и увеличением интенсивности волнения значения всех составляющих сил и моментов возрастают для всех типов судов, за исключением встречного и попутного волнений, для которых наблюдается обратный эффект. Уменьшение сил волнового дрейфа при уменьшении относительной глубины на нерегулярном волнении связаны с уменьшением интенсивности самого волнения.

Разработанный в настоящей диссертационной работе численный метод и соответствующий программный комплекс, предназначенный для определения сил волнового дрейфа, действующих на объект на регулярном и нерегулярном волнении в условиях мелкой и глубокой воды, обеспечивает необходимую точность получаемых результатов и может быть использован с целью повышения уровня качества проектирования систем позиционирования и обеспечения безопасности мореходности объектов различного типа и назначения при эксплуатации на волнении.

Список публикаций по теме диссертации:

В журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

- 1) **Щегорец С.В., Куликова А.Н.** Экспериментальное исследование сил волнового дрейфа, действующих на судно в условиях регулярного и нерегулярного волнения на глубокой воде и мелководье // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова – СПб. Выпуск 48(332), 2009, с. 31 – 40 (автор – 50%).
- 2) **Щегорец С.В., Тан Х.А.** О влиянии качки на дрейфовые силы, действующие на плавучее сооружение в условиях мелководья // Научно-технические ведомости СПбГПУ – СПб. Выпуск №1 (117), 2011, с.287 – 292 (автор – 50%).
- 3) **Щегорец С.В., Семенова В.Ю., Борисов Р.В.** Исследование влияния относительной глубины фарватера и курсового угла на силы волнового дрейфа при качке судна на мелководье // Морской Вестник – СПб. Специальный выпуск №2 (125), 2013, с.76 – 81 (автор – 50%).
- 4) **Щегорец С.В.** Оценка сил и моментов волнового дрейфа в условиях нерегулярного волнения // Морские интеллектуальные технологии – СПб. Выпуск №2 (24), 2014, (автор – 100%).

В других изданиях:

- 5) **Щегорец С.В.** Определение сил волнового дрейфа, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории // Труды 10-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO / CIS Offshore 2011) – СПб, 2011, ХИМИЗДАТ, с. 522 – 528 (автор – 100%).
- 6) **Щегорец С.В., Семенова В.Ю.** Применение трехмерной потенциальной теории для определения сил волнового дрейфа, действующих на судно при качке в условиях мелководья // Доклады научно-технической конференции / Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики и освоения шельфа («XLIV Крыловские чтения») – СПб., 2011, с. 69 – 71 (автор – 50%).
- 7) **Щегорец С.В., Семенова В.Ю.** Экспериментальное и теоретическое определение сил и моментов волнового дрейфа, возникающих при качке судов смешанного типа плавания // Доклады научно-технической конференции / Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики и освоения шельфа («XLV Крыловские чтения») – СПб., 2013, с. 95 – 97 (автор – 50%).