

УДК 629.12.073.243.4
EDN FOCKTX

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЕМПФИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАЧКИ ДЛЯ НАКЛЕННЫХ ШПАНГОУТНЫХ КОНТУРОВ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Д.А. Альбаев, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

А.И. Динцер, ассистент кафедры, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3, e-mail: cassraps19@gmail.com

В статье представлен численный подход (CFD) для определения коэффициентов демпфирования бортовой качки судового контура, находящегося в положении с начальным креном, что моделирует аварийную ситуацию. На основе гипотезы плоских сечений решаются осредненные уравнения Навье — Стокса (RANS) с моделью турбулентности $k-\omega$ SST и методом VOF для учета свободной поверхности. Численная реализация в пакете OpenFOAM использует динамическую сетку типа «Overset» для моделирования вынужденных колебаний двух характерных шпангоутных контуров в широком диапазоне частот. Ключевым результатом является демонстрация хорошего согласования рассчитанных безразмерных коэффициентов демпфирования (μ^*) с экспериментальными данными для прямого положения (0°). Полученные результаты подтверждают адекватность и практическую применимость предложенного CFD-метода для точного прогнозирования гидродинамических характеристик качки судов из кренованного положения, что критически важно для оценки устойчивости и безопасности в нештатных условиях.

Ключевые слова: качка судна, коэффициенты демпфирования, CFD, вынужденные колебания, шпангоутный контур, угол крена, бортовая качка.

Для цитирования: Альбаев Д.А. Определение коэффициентов демпфирования бортовой качки для наклоненных шпангоутных контуров численными методами / Д.А. Альбаев А.И. Динцер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 75 — 81. — EDN FOCKTX.

DETERMINATION OF DAMPING COEFFICIENTS OF ROLL FOR HEELED FRAME SECTIONS USING NUMERICAL METHODS

D.A. Al'baev, PhD, Associate Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

A.I. Dintser, Assistant Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: cassraps19@gmail.com

This paper presents a numerical (CFD) approach for determining roll damping coefficients of ship frame contours at an initial heel angle, modeling emergency scenarios. The method employs the strip theory hypothesis, solving Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) equations with the SST $k-\omega$ turbulence model and VOF method for free-surface tracking. Implemented in OpenFOAM using an Overset dynamic mesh, forced oscillations of two characteristic frame contours are simulated across a wide frequency range. Key results demonstrate good agreement between calculated dimensionless damping coefficients (μ^*) and experimental data for upright (0°) positions. The findings validate the proposed CFD method's adequacy and practical applicability for accurately predicting ship motion hydrodynamic characteristics from inclined positions — crucial for stability and safety assessment in off-design conditions.

Key words: ship roll motion, damping coefficients, CFD, forced oscillations, frame contour, heel angle, rolling.

For citation: Al'baev D.A., Dintser A.I. Determinations of damping coefficients of roll for heeled frame sections using numerical methods. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 75 — 81. EDN FOCKTX. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Точное определение коэффициентов демпфирования критически важно для прогнозирования устойчивости и безопасности судна в условиях морского волнения, особенно в нештатных ситуациях, таких как аварийный начальный крен. Хотя методы, основанные на потенциальной теории [1, 2], получили широкое распространение для расчета гидродинамических коэффициентов, их применимость к случаю судна с креном ограничена. Эти подходы недостаточно учитывают влияние значительного начального угла и демонстрируют погрешность, связанную с зависимостью от амплитуды качки. Например, экспериментально неоднократно подтверждалось, что линейная аппроксимация коэффициента демпфирования бортовой качки ошибочна. Значимость учета качки для безопасности и мореходности судна подчеркивается в работах, посвященных критериям мореходности [3].

Исследования демпфирования для положений с изначальным углом крена остаются недостаточно разработанными. Работы Я.М. Элиса [1, 2] систематизировали расчеты демпфирования для накрененных шпангоутов, но в рамках линейной постановки, что может не отражать реальную нелинейность аварийных сценариев. Расчет нелинейных дифракционных сил второго порядка для накрененных контуров, выполненный в [4], также указывает на существенную зависимость гидродинамических характеристик от угла крена. Исследования Н.Р. Piehl [5] с помощью CFD-симуляций подтвердили существенное влияние геометрии корпуса на вязкостное демпфирование, выявив ограничения как потенциальных, так и полуэмпирических методов. Однако расчеты вязкостного демпфирования для судов с начальным креном требуют дальнейшего углубленного изучения.

Перспективным направлением для учета сложных нелинейных эффектов, возникающих при начальном крене, являются численные методы, основанные на теории вязкой жидкости (CFD). Их ключевое преимущество перед потенциальными методами — прямой учет вязкости и турбулентности, что особенно важно для демпфирования. Методы CFD также успешно применяются для решения смежных задач, таких как оценка волнового сопротивления и картин волнообразования [6]. Например, в работе [7] с использованием CFD-кода MARIN ReFRESCO было проанализировано взаимодействие жидкости и корпуса при бортовой качке. Хотя исследование показало хорошее соответствие с экспериментами и данными CFX для различных амплитуд крена и периодов качки на симметричных контурах (с острой и закругленной скулой), оно не фокусировалось особо на влиянии начального (аварийного) крена на гидродинамические характеристики.

Таким образом, существует явная потребность в надежных методах расчета гидродинамических коэффициентов, прежде всего демпфирования, для реалистичного аварийного сценария — судна, совершающего бортовую качку из положения с начальным креном. Полученные данные могут быть использованы для последующего нелинейного анализа поведения судна на нерегулярном волнении, включая расчет ускорений в произвольных точках [8], что критически важно для оценки мореходности и безопасности. Целью настоящей работы является определение коэффициентов демпфирования бортовой качки при вынужденных колебаниях контура, имеющего начальный крен, с использованием современных методов CFD, и апробация полученных результатов.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

С целью снижения вычислительной сложности гидродинамические коэффициенты определяются в рамках гипотезы плоских сечений, предполагающей независимое рассмотрение обтекания характерных шпангоутов судна. В основе метода лежит система уравнений, основанная на подходе осреднения уравнений Навье — Стокса по Рейнольдсу (1) с использованием гипотезы Буссинеска (2).

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}); \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где F_i — массовые силы, включающие компоненту силы тяжести, зависимую от начального крена ($i = j = 1, 2$).

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j; \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (2)$$

Система замыкается с помощью модели турбулентности k - ω SST:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P + C_{\varepsilon 3} G) - (C_{\varepsilon 2} - 1) \omega^2 + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega k} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial k}{\partial x_j}; \\ \frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P + G - \varepsilon. \end{cases} \quad (3)$$

Для создания двухфазной жидкости применен метод «Volume of Fluid» (VOF):

$$\frac{\partial \alpha_m}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \alpha_m}{\partial x_j} = 0. \quad (4)$$

В начальный момент времени полагаются известными компоненты вектора скорости, давления, кинетическая энергия турбулентности и скорость диссипации турбулентной кинетической энергии. Свободная поверхность спокойна.

Условия на границах расчетной области, используемые для разрешения задачи, и более подробное описание расчетного метода приведены в работе [9].

Численный эксперимент проводился при вынужденных колебаниях двух плоских контуров (рис. 1) с помощью динамической сетки типа «Overset» [9] с геометрией, принятой в соответствии с экспериментом [9].

№ 1. $B=0,4$ м; $T=0,2$ м; $R=0,025$ м

№ 2. $B=0,5$ м; $T=0,3$ м; $H=0,5$ м

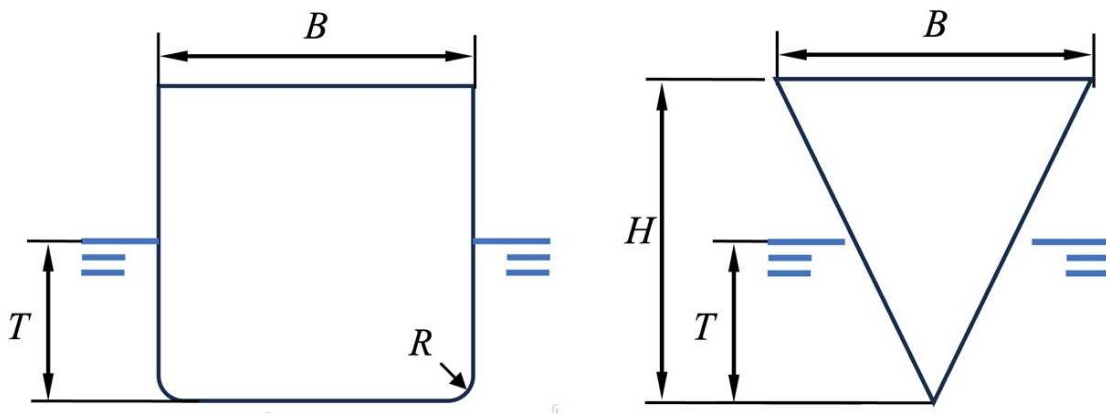


Рис. 1. Плоский контур, использующийся при расчете

На рис. 2 представлен окончательный вид расчетной сетки.

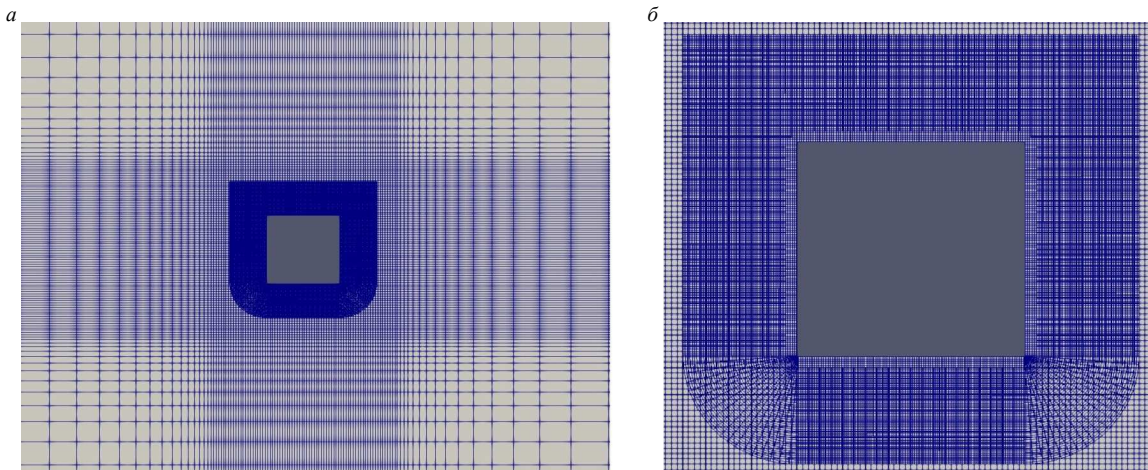


Рис. 2. Вид сетки, используемой при расчетах: а — расчетная область; б — область «Overset»

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчет бортовой качки был произведен при частотах вынужденных колебаний, приведенных в таблице:

№	ω , 1/с
1	0,5; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,4; 2,7; 3,1; 3,4
2	1,3; 1,6; 1,8; 2,1; 2,3; 2,6; 2,8; 3,1; 3,4; 3,6

Для четырех частот при 3 — 4 полных периодах колебаний приведены результаты момента, действующего на контуры, во временной области. Приведенные частоты аналогичны значениям из экспериментальных данных [9].

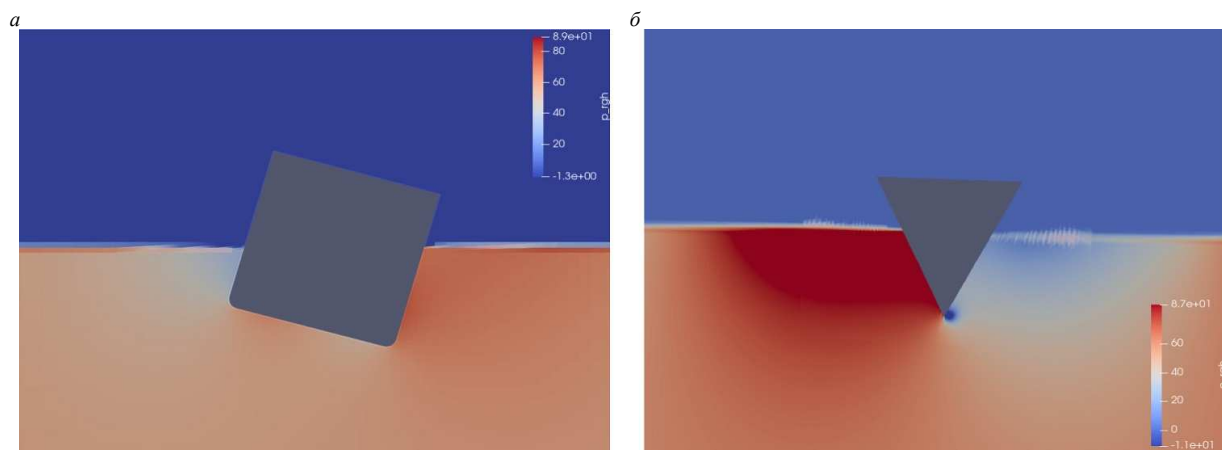


Рис. 3. Распределение давления вокруг контура: а — контур 1, $\theta=10^\circ$; б — контур 2, $\theta=0^\circ$

По этим данным построены графики. Анализ сигнала момента для каждой частоты включал сравнение его исходной записи с версией, обработанной методом дискретного преобразования Фурье (рис. 4).

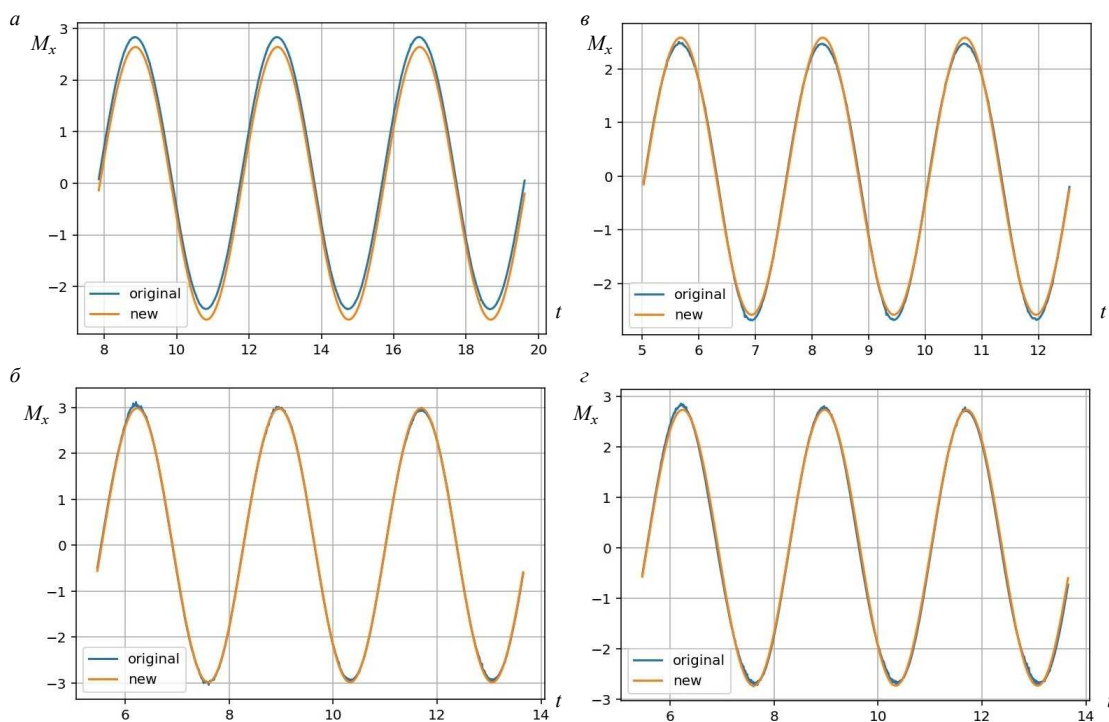


Рис. 4. Момент M_x , действующий на корпус при различных частотах:

а — $\omega=1,6$ 1/с, контур 1, $\theta=0^\circ$; б — $\omega=3,1$ 1/с, контур 2, $\theta=0^\circ$; в — $\omega=2,5$ 1/с, контур 1, $\theta=10^\circ$; г — $\omega=2,3$ 1/с, контур 2, $\theta=10^\circ$

По полученным амплитудам сил (моментов) M_x можно получить значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования, рассчитав их с помощью формул, описанных для экспериментальных методов, при этом преобразовав их для соответствующего вида колебаний:

$$\lambda_{44}\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + Dh_0\theta = M_A \sin(\omega t + \varepsilon); \quad (5)$$

$$\theta = \theta_A \sin(\omega t); \quad \dot{\theta} = \theta_A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t); \quad \ddot{\theta} = -\theta_A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t); \quad (6)$$

$$\theta_a \{ -\lambda_{44} \cdot \omega^2 + Dh_0 \} \sin(\omega t) + \theta_a \mu_{44} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = M_A \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin(\omega t) + M_A \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos(\omega t). \quad (7)$$

Из (7) при $\omega t = 0$:

$$\mu_{44} = \frac{M_A \cdot \sin \varepsilon}{\omega \theta_a}. \quad (8)$$

В данной работе результаты расчета гидродинамических сил и значения частот приведены в виде, аналогичной работе J. Vugts [10]:

$$\mu'_{44} = \frac{\mu_{44}}{\rho A B^2} \sqrt{B/2g}. \quad (9)$$

По формуле (9) рассчитываются гидродинамические коэффициенты и сравниваются с экспериментом на рис. 5.

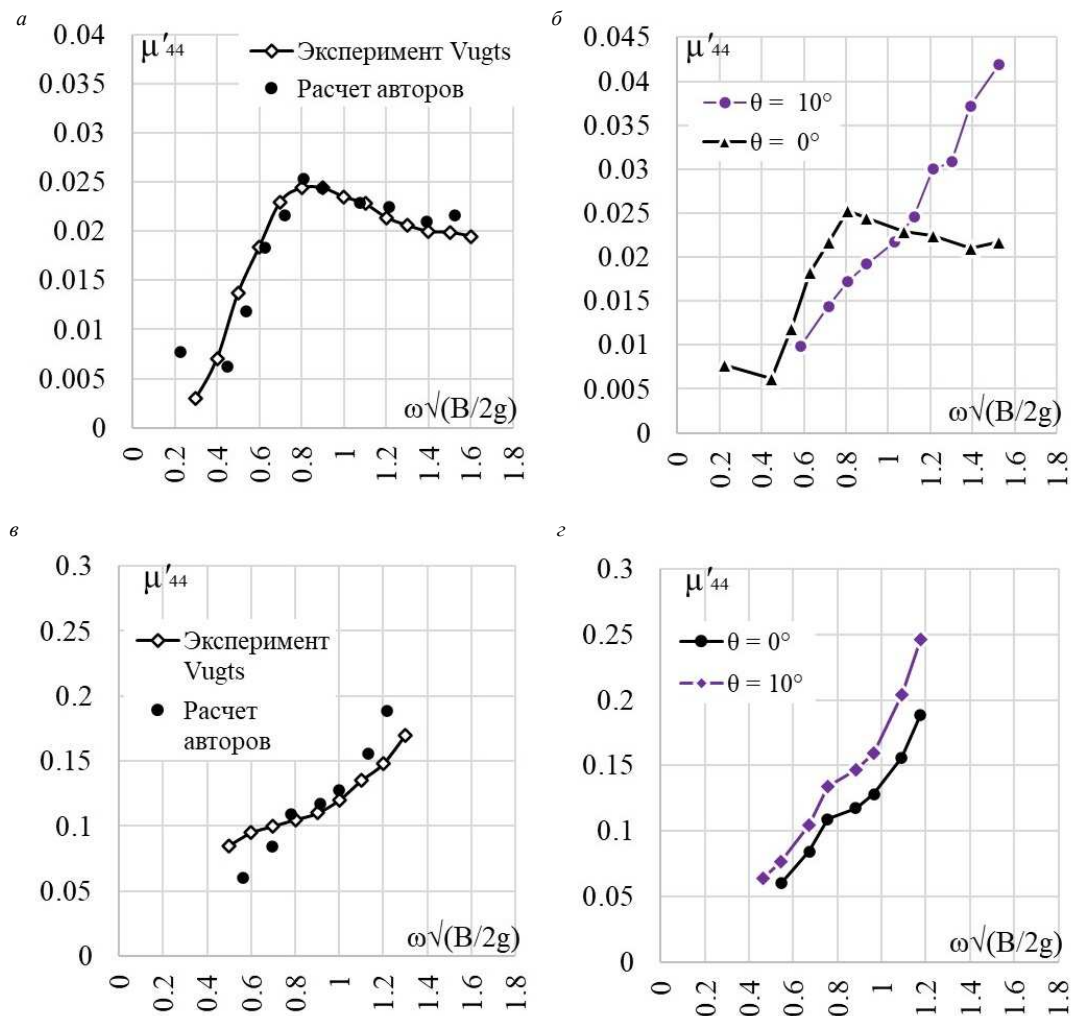


Рис. 5. Сравнение коэффициентов демпфирования: а — контур 1, $\theta = 0^\circ$; б — контур 1, расчеты авторов $\theta = 0, 10^\circ$; в — контур 2, $\theta = 0^\circ$; г — контур 2, расчеты авторов $\theta = 0, 10^\circ$

Для коэффициентов демпфирования в случае вынужденных бортовых колебаний (рис. 5а, в) наблюдается хорошее согласование с экспериментальными данными [5, 10].

В то же время наблюдается значительное влияние начального крена на величины коэффициентов демпфирования. Так, для прямоугольного контура (рис. 5б) происходит не только количественное изменение значений, но и качественное. Для треугольного контура (рис. 5г) наличие крена увеличивает коэффициент демпфирования на всем диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе успешно решена актуальная задача по определению коэффициентов демпфирования бортовой качки для судового контура, находящегося в положении с начальным (аварийным) креном, с использованием современных методов вычислительной гидродинамики (CFD). Применение двумерной постановки (гипотеза плоских сечений) в сочетании с решением осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS) и моделью турбулентности $k-\omega$ SST, а также методом VOF для учета свободной поверхности позволило достичь удовлетворительной точности при приемлемых вычислительных затратах. Численные эксперименты с вынужденными колебаниями двух характерных контуров при различных частотах продемонстрировали хорошее согласование расчетных значений коэффициента демпфирования μ'_{44} с известными экспериментальными данными [10]. Полученные коэффициенты демпфирования являются ключевым входным параметром для динамических моделей качки, используемых при оценке мореходности по критериям, аналогичным рассмотренным в [3]. Полученные результаты подтверждают эффективность и адекватность предложенного CFD-подхода для моделирования нелинейных гидродинамических эффектов, возникающих при бортовой качке из кренованного положения, что имеет ключевое значение для повышения точности прогнозирования остойчивости и безопасности судов в аварийных сценариях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элис Я.М. Присоединенные массы и демпфирование поперечных сечений накренонного судна / Я.М. Элис // Труды КТИРПиХ. 1980. Вып. 90.
2. Элис Я.М. Гидродинамические давления, присоединенные массы и коэффициенты демпфирования при продольной качке судна с креном / Я.М. Элис // Труды КТИРПиХ. 1978. Вып. 54.
3. Часовников Н.Ю. Краткий обзор критериев мореходности и результаты проверки удовлетворения некоторым из них проектами судов АО «ЦМКБ «АЛМАЗ» / Н.Ю. Часовников, М.О. Франк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 52 — 61. — EDN HVQQRH.
4. Семенова В.Ю. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на накренонные шпангоутные контура / В.Ю. Семенова, А.И. Динцер // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 51 — 61. — EDN AJDKJE.
5. Piehl H.P. Ship roll damping analysis: Doktors der Ingenieurwissenschaften / H.P. Piehl. — Universität Duisburg-Essen zur Erlangung, 2016.
6. Чебан Е.Ю. Оценка параметров волн при движении некоторых тел простой формы в свободном потоке численными методами / Е.Ю. Чебан, А.И. Кожевников, Д.В. Никущенко // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 39 — 51. — EDN GIZBFY.
7. Jaouen F. Predicting roll added mass and damping of a ship hull section using CFD / F. Jaouen, A. Koop, G. Vaz // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2011. — Vol. 44397. — P. 105 — 115.
8. Семенова В.Ю. Определение ускорений в произвольных точках судна на основании нелинейной теории в условиях нерегулярного волнения / В.Ю. Семенова, Д.А. Альбаев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 25 — 32. — EDN XIIMGW.
9. Альбаев Д.А. Вычисление гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при колебаниях шпангоутного контура численными методами / Д.А. Альбаев, Р.Р. Фахурдинов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3, ч. 1. — С. 200 — 209. — DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020.
10. Vugts J.H. The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface / J.H. Vugts. — Delft, 1968. (Technische Hogeschool Delft. Laboratorium voor Scheepsbouwkunde. Report no. 194.)

REFERENCES

1. Elis Ya.M. Prisoedinennye massy i dempfirovanie poperechnykh secheniy nakrenennogo sudna. [Added mass and damping of heeled ship cross-sections]. *Trudy KTIRPiKh*. 1980. Vyp. 90.
2. Elis Ya.M. Gidrodinamicheskie davleniya, prisoedinennye massy i koeffitsienty dempfirovaniya prirodol'noy kachke sudna s krenom [Hydrodynamic pressures, added masses and damping coefficients during longitudinal ship motions with list]. *Trudy KTIRPKh*. 1978. Vyp. 54.
3. Chasovnikov N.Yu., Frank M.O. A brief overview of the seakeeping criteria and the results of checking the satisfaction of some of them by the projects of the vessels of JSC CMDB ALMAZ. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 52 — 61. EDN HVQQRH. (In Russ.)
4. Semenova V.Yu., Dincer A.I. Calculation of second-order non-linear diffraction forces acting on heeled frame sections. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 77. P. 51 — 61. EDN AJDKJE. (In Russ.)
5. Piehl H.P. Ship roll damping analysis: Doktors der Ingenieurswissenschaften. Universität Duisburg-Essen zur Erlangung, 2016.
6. Cheban E.Yu., Kozhevnikov A.I., Nikushchenko D.V. A study of some simple-shape bodies wave generation during motion in the unrestricted flow. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 39 — 51. EDN GIZBFY. (In Russ.)
7. Jaouen F., Koop A., Vaz G. Predicting roll added mass and damping of a ship hull section using CFD. *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2011. Vol. 44397. P. 105 — 115.
8. Semenova V.Yu., Al'baev D.A. Determination of accelerations at arbitrary points of a ship based on nonlinear theory in irregular waves. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 25 — 32. EDN XIIMGW. (In Russ.)
9. Al'baev D.A., Fahuridinov R.R. Determination of hydrodynamic coefficients of added masses and damping due to motions of the frame contour by computational methods. *Marine Intellectual Technologies*. 2023. № 3 part 1. P. 200 — 209. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.020. (In Russ.)
10. Vugts J. H. The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface. Delft, 1968. (Technische Hogeschool Delft. Laboratorium voor Scheepsbouwkunde. Report no. 194.)