

УДК 629.12.073.243.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЙ В ПРОИЗВОЛЬНЫХ ТОЧКАХ СУДНА НА ОСНОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ В УСЛОВИЯХ РЕГУЛЯРНОГО ВОЛНЕНИЯ

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

Д.А. Альбаев, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

В статье рассматривается определение ускорений в различных точках судна от действия нелинейных сил второго порядка на основании трехмерной потенциальной теории на регулярном волнении. Для их определения используются методы интегральных уравнений и метод малого параметра. Проводится апробация расчетов ускорений по разработанным программам в сравнении с программами, основанными на использовании двумерных методов. Проводится исследование влияния на амплитуды ускорений изменения курсового угла и скорости хода. Расчеты ускорений приводятся для различных судов. Показано значительное влияние нелинейных сил на горизонтальные и вертикальные ускорения в зонах супергармонических резонансных режимов при расположении судна лагом и необходимость его учета.

Ключевые слова: супергармонический резонанс, ускорения, нелинейные силы, метод малого параметра, функция Грина, трехмерная потенциальная теория

DETERMINATION OF ACCELERATIONS AT ARBITRARY POINTS OF A SHIP BASED ON NONLINEAR THEORY IN REGULAR WAVES

V.Yu. Semenova, DSc, professor, St. Petersburg State Marine Technical University (SMTU), St. Petersburg, e-mail: sem_viktoria@mail.ru

D.A. Albaev, SMTU, St. Petersburg, e-mail: albaevdaniil@gmail.com

The article discusses the determination of accelerations at various points of the ship from the action of second-order nonlinear forces on the basis of three-dimensional potential theory in regular waves. To determine them, methods of integral equations and the small parameter method have been used. Acceleration calculations using the developed programs have been tested in comparison with programs based on the use of two-dimensional methods. A study of the influence of changes in heading angle and speed on acceleration amplitudes has also been carried out. Acceleration calculations have been provided for various ship types. The significant influence of nonlinear forces on horizontal and vertical accelerations in zones of superharmonic resonant modes in the beam waves and the need to take it into account have been shown.

Keywords: superharmonic resonance, accelerations, nonlinear forces, small parameter method, Green's function, three-dimensional potential theory

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных практических приложений расчетов нелинейной качки является определение соответствующих ускорений в произвольных точках судна, вызываемых действием нелинейных сил. В работе Со Чжо Ту [9, 10] были определены ускорения на основании нелинейной теории, но с использованием двумерного метода. В работах авторов [3 — 8] были определены различные категории нелинейных сил на основании применения трехмерной потенциальной теории и метода малого параметра. В настоящей работе проводится определение ускорений в произвольных точках судна с учетом данных нелинейных сил на регулярном волнении.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

Горизонтальные и вертикальные ускорения произвольной точки m определяются следующими выражениями [1]:

$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_m &= \ddot{\xi}_g - \ddot{\chi}y + \ddot{\psi}z + g\psi; \\ \ddot{\eta}_m &= \ddot{\eta}_g - \ddot{\theta}z + \ddot{\chi}x - g\theta; \\ \ddot{\zeta}_m &= \ddot{\zeta}_g - \ddot{\psi}x + \ddot{\theta}y,\end{aligned}\tag{1}$$

где

$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_g &= -\omega_k^2 \xi_g^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\xi^{(1)}) - \varepsilon_1 4\omega_k^2 \xi_g^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\xi^{(2)}); \\ \ddot{\eta}_g &= -\omega_k^2 \eta_g^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\eta^{(1)}) - \varepsilon_2 4\omega_k^2 \eta_g^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\eta^{(2)}); \\ \ddot{\zeta}_g &= -\omega_k^2 \zeta_g^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\zeta^{(1)}) - \varepsilon_3 4\omega_k^2 \zeta_g^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\zeta^{(2)}); \\ \ddot{\theta} &= -\omega_k^2 \theta^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\theta^{(1)}) - \varepsilon_4 4\omega_k^2 \theta^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\theta^{(2)}); \\ \ddot{\psi} &= -\omega_k^2 \psi^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\psi^{(1)}) - \varepsilon_5 4\omega_k^2 \psi^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\psi^{(2)}); \\ \ddot{\chi} &= -\omega_k^2 \chi^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\chi^{(1)}) - \varepsilon_6 4\omega_k^2 \chi^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\chi^{(2)}); \\ \theta &= \theta^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\theta^{(1)}) + \varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\theta^{(2)}); \\ \psi &= \psi^{(1)} \sin(\omega_k t + \delta_\psi^{(1)}) + \varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin(2\omega_k t + \delta_\psi^{(2)}).\end{aligned}\tag{2}$$

В конечном итоге формулы для определения амплитуд ускорений примут вид

$$\begin{aligned}\xi_{mA}^{(1)} &= \sqrt{\xi_{mA1}^{(1)2} + \xi_{mA2}^{(1)2}}; \\ \xi_{mA1}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\xi_g^{(1)} \cos \delta_\xi^{(1)} - y \chi^{(1)} \cos \delta_\chi^{(1)} + z \psi^{(1)} \cos \delta_\psi^{(1)}) + g \psi^{(1)} \cos \delta_\psi^{(1)}; \\ \xi_{mA2}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\xi_g^{(1)} \sin \delta_\xi^{(1)} - y \chi^{(1)} \sin \delta_\chi^{(1)} + z \psi^{(1)} \sin \delta_\psi^{(1)}) + g \psi^{(1)} \sin \delta_\psi^{(1)}; \\ \xi_{mA}^{(2)} &= \sqrt{\xi_{mA1}^{(2)2} + \xi_{mA2}^{(2)2}};\end{aligned}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}\xi_{mA1}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_1 \xi_g^{(2)} \cos \delta_\xi^{(2)} - y \varepsilon_6 \chi^{(2)} \cos \delta_\chi^{(2)} + z \varepsilon_5 \psi^{(2)} \cos \delta_\psi^{(2)}) + g \varepsilon_5 \psi^{(2)} \cos \delta_\psi^{(2)}; \\ \xi_{mA2}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_1 \xi_g^{(2)} \sin \delta_\xi^{(2)} - y \varepsilon_6 \chi^{(2)} \sin \delta_\chi^{(2)} + z \varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin \delta_\psi^{(2)}) + g \varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin \delta_\psi^{(2)}; \\ \eta_{mA}^{(1)} &= \sqrt{\eta_{mA1}^{(1)2} + \eta_{mA2}^{(1)2}}; \\ \eta_{mA1}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\eta_g^{(1)} \cos \delta_\eta^{(1)} - y \chi^{(1)} \cos \delta_\chi^{(1)} + z \theta^{(1)} \cos \delta_\theta^{(1)}) - g \theta^{(1)} \cos \delta_\theta^{(1)}; \\ \eta_{mA2}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\eta_g^{(1)} \sin \delta_\eta^{(1)} - y \chi^{(1)} \sin \delta_\chi^{(1)} + z \theta^{(1)} \sin \delta_\theta^{(1)}) - g \theta^{(1)} \sin \delta_\theta^{(1)}; \\ \eta_{mA}^{(2)} &= \sqrt{\eta_{mA1}^{(2)2} + \eta_{mA2}^{(2)2}}; \\ \eta_{mA1}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_2 \eta_g^{(2)} \cos \delta_\eta^{(2)} + x \varepsilon_6 \chi^{(2)} \cos \delta_\chi^{(2)} - z \varepsilon_5 \theta^{(2)} \cos \delta_\theta^{(2)}) - g \varepsilon_4 \theta^{(2)} \cos \delta_\theta^{(2)}; \\ \eta_{mA2}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_2 \eta_g^{(2)} \sin \delta_\eta^{(2)} + x \varepsilon_6 \chi^{(2)} \sin \delta_\chi^{(2)} - z \varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin \delta_\theta^{(2)}) - g \varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin \delta_\theta^{(2)}.\end{aligned}\tag{4}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{\zeta}_{mA}^{(1)} &= \sqrt{\ddot{\zeta}_{mA1}^{(1)2} + \ddot{\zeta}_{mA2}^{(1)2}}; \\
\ddot{\zeta}_{mA1}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\zeta_g^{(1)} \cos \delta_\zeta^{(1)} - x\psi^{(1)} \cos \delta_\psi^{(1)} - y\theta^{(1)} \cos \delta_\theta^{(1)}); \\
\ddot{\zeta}_{mA2}^{(1)} &= -\omega_k^2 (\zeta_g^{(1)} \sin \delta_\zeta^{(1)} - x\psi^{(1)} \sin \delta_\psi^{(1)} - y\theta^{(1)} \sin \delta_\theta^{(1)}); \\
\ddot{\zeta}_{mA}^{(2)} &= \sqrt{\ddot{\zeta}_{mA1}^{(2)2} + \ddot{\zeta}_{mA2}^{(2)2}}; \\
\ddot{\zeta}_{mA1}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_3 \zeta_g^{(2)} \cos \delta_\zeta^{(2)} - x\varepsilon_5 \psi^{(2)} \cos \delta_\psi^{(2)} - y\varepsilon_4 \theta^{(2)} \cos \delta_\theta^{(2)}); \\
\ddot{\zeta}_{mA2}^{(2)} &= -4\omega_k^2 (\varepsilon_3 \zeta_g^{(2)} \sin \delta_\zeta^{(2)} - x\varepsilon_5 \psi^{(2)} \sin \delta_\psi^{(2)} - y\varepsilon_4 \theta^{(2)} \sin \delta_\theta^{(2)}).
\end{aligned} \tag{5}$$

Здесь $\varepsilon_1 = \frac{\xi_g}{B/2}$; $\varepsilon_2 = \frac{\eta_g}{B/2}$; $\varepsilon_3 = \frac{\zeta_g}{B/2}$; $\varepsilon_4 = \frac{\theta}{1\text{rad}}$; $\varepsilon_5 = \frac{\psi}{1\text{rad}}$; $\varepsilon_6 = \frac{\chi}{1\text{rad}}$;

Амплитуды второго порядка различных видов качки определяются на основании решения системы дифференциальных уравнений (6).

$$\begin{cases}
(M + \lambda_{11}^{(2)})\ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{13}^{(2)}\ddot{\psi}^{(2)} + \lambda_{15}^{(2)}\ddot{\theta}^{(2)} + \mu_{11}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{13}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} + \mu_{15}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} = F_X^{(2)}e^{-2j\omega_k t}, \\
(M + \lambda_{22}^{(2)})\ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{24}^{(2)}\ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{26}^{(2)}\ddot{\chi}^{(2)} + \mu_{22}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{24}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} + \mu_{26}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} = F_Y^{(2)}e^{-2j\omega_k t}, \\
(M + \lambda_{33}^{(2)})\ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{31}^{(2)}\ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{35}^{(2)}\ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{33}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{31}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{35}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} + \rho g S \zeta_g^{(2)} - \rho g S X_f \psi^{(2)} = F_Z^{(2)}e^{-2j\omega_k t}, \\
(J_{xx} + \lambda_{44}^{(2)})\ddot{\theta}^{(2)} + \lambda_{42}^{(2)}\ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{46}^{(2)}\ddot{\chi}^{(2)} + \mu_{44}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} + \mu_{42}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{46}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} + D h_0 \theta^{(2)} = M_X^{(2)}e^{-2j\omega_k t}, \\
(J_{yy} + \lambda_{55}^{(2)})\ddot{\psi}^{(2)} + \lambda_{51}^{(2)}\ddot{\zeta}_g^{(2)} + \lambda_{53}^{(2)}\ddot{\psi}^{(2)} + \mu_{55}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} + \mu_{51}^{(2)}\dot{\zeta}_g^{(2)} + \mu_{53}^{(2)}\dot{\psi}^{(2)} + D h_0 \psi^{(2)} - \rho g S X_f \zeta_g^{(2)} = M_Y^{(2)}e^{-2j\omega_k t}, \\
(J_{zz} + \lambda_{66}^{(2)})\ddot{\chi}^{(2)} + \lambda_{62}^{(2)}\ddot{\eta}_g^{(2)} + \lambda_{64}^{(2)}\ddot{\theta}^{(2)} + \mu_{66}^{(2)}\dot{\chi}^{(2)} + \mu_{62}^{(2)}\dot{\eta}_g^{(2)} + \mu_{64}^{(2)}\dot{\theta}^{(2)} = M_Z^{(2)}e^{-2j\omega_k t}.
\end{cases} \tag{6}$$

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основании изложенного метода была разработана программа, реализующая определение ускорений на регулярном волнении.

Все расчеты нелинейных сил проводились для четырех судов, основные характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики судов

Тип/Название судна	L	B	T	δ	α	h_0	Q^*
Лихтеровоз «Алексей Косыгин»	232	32	10,6	0,57	0,82	3,99	970
Балкер «Капитан Панфилов»	134	20,6	9,4	0,78	0,88	1,45	766
Лесовоз «Николай Новиков»	140	21	8,68	0,74	0,83	2,31	998
Сухогруз «Новгород»	138	20,6	9	0,68	0,79	1,00	952

* Q — количество панелей разбиения судна.

3.1. Апробация расчетного метода

В качестве апробации разработанного метода расчета, расчеты амплитуд первых, вторых гармоник поперечных видов качки, а также их суммарных амплитуд, при расположении судна лагом и без хода были сопоставлены с аналогичными расчетами, выполненными по двумерной теории [2]. Сопоставления приведены для балкера «Капитан Панфилов» на рис. 1 — 9. Из приведенных результатов видно, практически полное согласование амплитуд первых гармоник поперечно-горизонтальной, вертикальной и бортовой качки (см. рис. 1 — 3). Амплитуды вторых гармоник вертикальной и бортовой качки убедительно совпадают в зонах супергармонических резонансных режимов. Безразмерные суммарные амплитуды, также хорошо совпадают между собой.

Также были сопоставлены расчеты поперечных и вертикальных кинематических составляющих ускорения по линейной и нелинейной теориям по разработанному методу с аналогичными расчетами по двумерной теории [10] для сухогруза Новгород при качке лагом в точке на правом борту (см. рис. 10 и 11). Из приведенных на графиках сопоставлений видно их хорошее согласование.

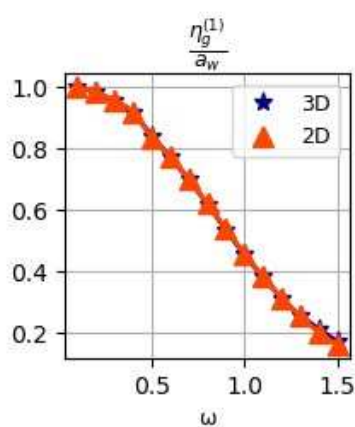


Рис. 1 АЧХ первого порядка поперечно-горизонтальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

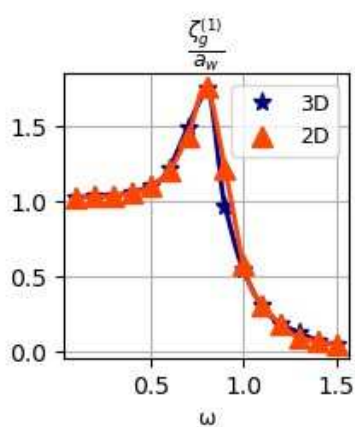


Рис. 2 АЧХ первого порядка вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

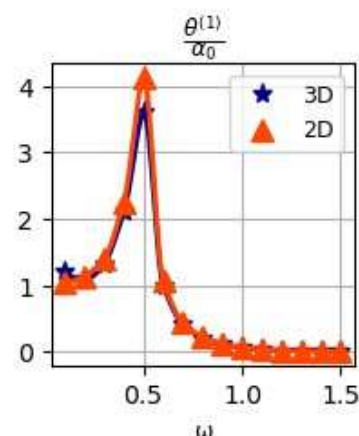


Рис. 3 АЧХ первого порядка бортовой качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

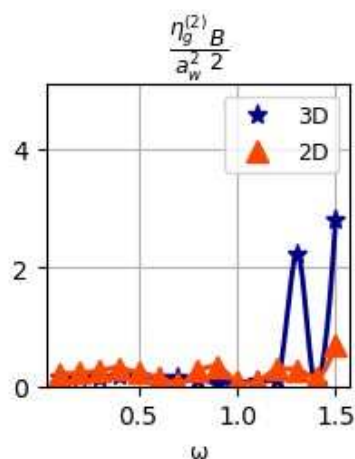


Рис. 4 АЧХ второго порядка поперечно-горизонтальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

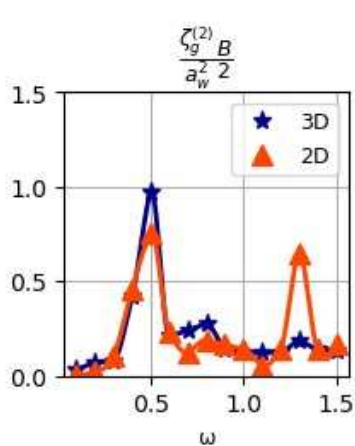


Рис. 5 АЧХ второго порядка вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

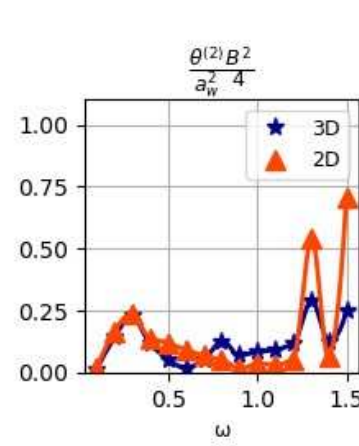


Рис. 6 АЧХ второго порядка бортовой качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

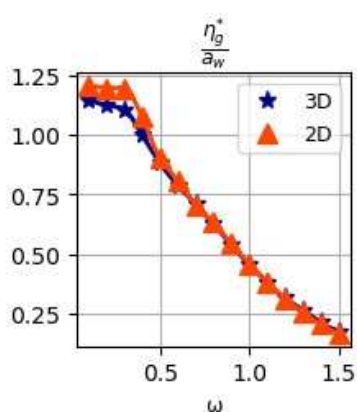


Рис. 7 Суммарная АЧХ поперечно горизонтальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta=90^\circ$, $u_s=0$)

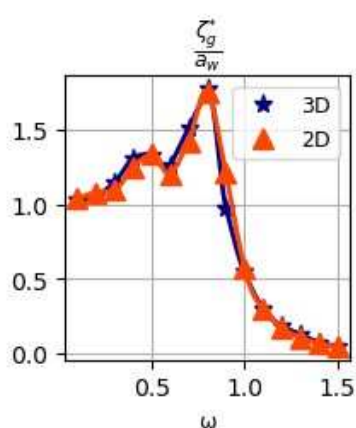


Рис. 8 Суммарная АЧХ вертикальной качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta=90^\circ$, $u_s=0$)

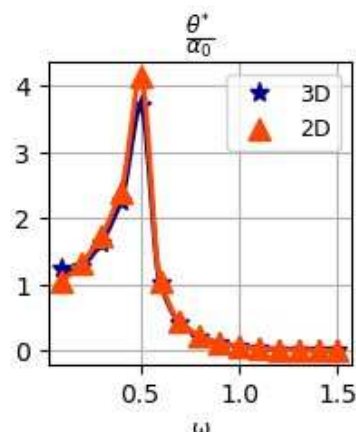


Рис. 9 Суммарная АЧХ бортовой качки для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta=90^\circ$, $u_s=0$)

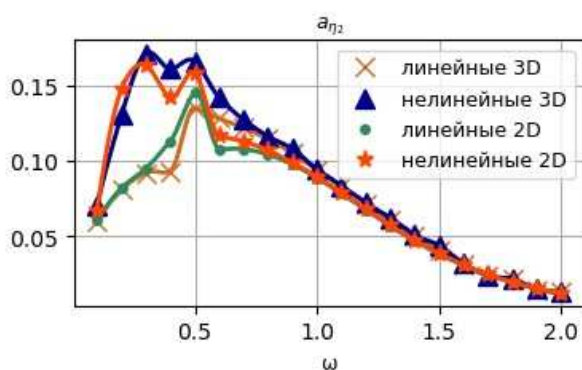


Рис. 10 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» по различным теориям ($\beta=90^\circ$, $u_s=0$)

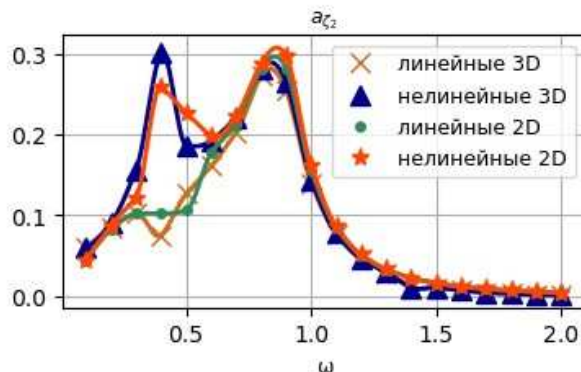


Рис. 11 Вертикальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» по различным теориям ($\beta=90^\circ$, $u_s=0$)

3.2 Анализ результатов расчета ускорений на регулярном волнении

Расчеты ускорений на регулярном волнении выполнялись для трех точек каждого судна: на носовом перпендикуляре ($L/2$; 0; Н-Т), на правом борту (0; $B/2$; Н-Т) и в точке предполагаемого расположения рубки ($L/4$; $B/4$; Н-Т). Расчеты для каждого судна выполнялись для четырех курсовых углов: 60° , 90° , 135° , 180° и двух скоростей: нулевой и расчетной. На рис. 12 — 44 приведены результаты расчетов трех составляющих ускорений в долях от ускорения g в зависимости от частоты волнения.

При качке судов на косом попутном угле 60° и отсутствии скорости хода максимальные значения продольных составляющих ускорений не превышают $0,125g$. При этом для всех судов наблюдается совпадение расчетов по линейной и нелинейной теориям. Максимальные значения данных ускорений практически одинаковы для всех трех точек, что связано с влиянием составляющей $g\psi$, не зависящей от координат точки.

Поперечные составляющие ускорения составляют от $0,4g$ до $0,6g$. Их максимумы находятся в зоне частот $\omega < 0,7$ и обусловлены резонансом бортовой качки. Для всех трех точек значения данных ускорений не сильно отличаются из-за влияния гравитационной составляющей $g\theta$. Отмечается влияние нелинейных факторов на поперечные ускорения в зоне низких частот, которое не превышает 10 %.

Вертикальные составляющие ускорения составляют от $0,15g$ до $0,5g$. Максимальные значения данных составляющих зависят от расчетной точки. Наибольшие значения вертикальных ускорений для курсового угла 60° для всех 4 судов отмечены в точке на носовом перпендикуляре. Наибольшее влияние нелинейных сил отмечается именно на вертикальные составляющие ускорений. Для всех судов оно имеет место в зоне частот $\omega < 0,5$. Наибольшее влияние нелинейных сил имеет место в точке на правом борту. Здесь оно может составлять от 50 до 100 % от линейной составляющей и обусловлено влиянием амплитуд вторых гармоник

бортовой качки. Наименьшее влияние нелинейных сил имеет место в точке на носовом перпендикуляре и составляет от 10 до 40 %.

Результаты расчетов ускорений для случая курсового угла $\beta = 90^\circ$ и $u_s = 0$ приведены на рис. 12 — 20. Для всех судов отмечаются ничтожно малые значения продольных составляющих ускорений. Поперечные составляющие ускорений составляют от 0,5g до 0,6g в различных точках. Увеличивается влияние нелинейных факторов, которое может достигать 60 — 100 % и имеет место в зонах супергармонических резонансов бортовой качки (см. рис. 13, 16 и 19). При этом данное влияние одинаково для всех точек, что обусловлено гравитационной составляющей, не зависящей от координат точки.

Вертикальные составляющие ускорения составляют от 0,2g до 0,4g. При расположении судна лагом и без скорости имеет место наибольшее влияние нелинейных факторов, которое в ряде случаев может быть больше 100 % (см. рис. 14, 17 и 20). Данное влияние имеет место в зонах супергармонических резонансов. Так, для сухогруза Новгород графики зависимости вертикальной составляющей ускорения от частоты имеют по два «горба». Первый «горб» имеет место в зоне низких частот и обусловлен исключительно нелинейными факторами. Значения ускорений в этих максимумах сопоставимы со значениями вторых максимумов.

При качке на косом встречном курсовом угле $\beta = 135^\circ$ и отсутствии скорости хода продольные составляющие ускорений составляют от 0,15g до 0,18g. Расчеты данных ускорений в различных точках по линейной и нелинейной теориям совпадают. Поперечные составляющие ускорений составляют от 0,15g до 0,3g. Влияние нелинейных сил не превосходит 10 %. При этом наибольшее их влияние отмечено для балкера «Капитан Панфилов». Вертикальные составляющие ускорений составляют от 0,15g до 0,4g для различных типов судов. Максимальное влияние нелинейных сил отмечается в точках на правом борту и в точке расположения рубки и может достигать в ряде случаев 60 — 70 % от значений, полученных по линейной теории (см. рис. 26 и 29).

Результаты расчетов для случая встречного волнения $\beta = 180^\circ$ и отсутствия скорости хода показали, что продольные составляющие ускорения составляют от 0,2g до 0,25g для всех судов. Как и для всех других курсовых углов, расчеты по нелинейной теории совпадают с расчетами по линейной. Поперечные составляющие ускорений на встречном волнении отсутствуют из-за симметрии судна относительно диаметральной плоскости.

Вертикальные составляющие ускорения составляют от 0,1g до 0,3g. Наибольшие вертикальные ускорения имеют место в точках на носовых перпендикулярах всех судов. Влияние нелинейных сил не превышает 25 % и отличается в точках на правом борту и в месте расположения рубки. На носовом перпендикуляре влияние нелинейности незначительно.

На рис. 27 — 44 приведены результаты расчетов ускорений на различных курсовых углах при движении каждого судна с его заданной расчетной скоростью.

При курсовом угле 60° максимальные значения продольных составляющих ускорения не превышают 0,125g. При этом расчеты, выполненные по нелинейной теории, практически полностью совпадают с расчетами по линейной теории.

Поперечные составляющие ускорения уменьшаются при наличии скорости хода и не превышают 0,3g. При этом значительно проявляется влияние нелинейных сил в зоне низких частот и может достигать 30 % (см. рис. 29 и 30). Вертикальные составляющие ускорения также значительно уменьшаются по сравнению с отсутствием скорости и не превышают 0,1g. Влияние нелинейных сил имеет место в зоне низких частот и достигает до 20 % практически для всех рассмотренных судов.

Результаты расчетов при расположении судов лагом показали, что в этом случае наблюдается пренебрежимо малые значения продольных составляющих ускорения, не превышающих 0,04g. Поперечные составляющие ускорения меньше, чем при отсутствии скорости хода, что связано с уменьшением влияния бортовой качки. Максимальные значения имеют место в зоне частот $\omega < 0,6$ и не превосходят 0,5g. Отмечается значительное влияние нелинейных сил, которое может достигать 30 — 50 %.

Вертикальные составляющие ускорения при наличии скорости хода также меньше, чем при ее отсутствии. Их максимальные значения не превышают 0,25g. Однако, при вычислении данных составляющих отмечается наибольшее влияние нелинейных сил. Для всех судов оно имеет место в зоне частот $\omega < 0,6$ и может достигать от 50 до 150 %.

В зоне частот $\omega > 0,6$ расчеты поперечных и вертикальных составляющих ускорений, выполненных по нелинейной теории, совпадают с расчетами по линейной теории.

Анализ расчетов ускорений для сочетаний встречного косого угла $\beta = 135^\circ$ и различных скоростей показал увеличение продольных составляющих ускорений по сравнению с расчетами для нулевой скорости. Максимальные значения не превышают 0,25g. Расчеты по нелинейной теории совпадают с расчетами по линейной.

Поперечные составляющие ускорений уменьшаются по сравнению со случаем нулевой скорости. Их максимальные значения не превышают $0,25g$. Значительно уменьшается влияние нелинейных сил по сравнению со случаем расположения судна лагом и не превышает 10 %. Вертикальные составляющие ускорения значительно больше, чем при отсутствии скорости хода и могут составлять $1g$. Наибольшие значения имеют место в точках на носовых перпендикулярах всех судов, что обусловлено увеличением амплитуд килевой качки при наличии скорости. Влияние нелинейных сил проявляется в точках на правом борту и в точке расположения рубки и может достигать 20 — 25 %.

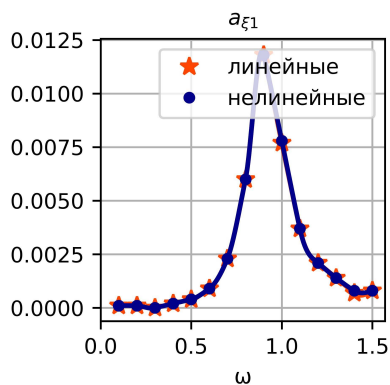


Рис. 12 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

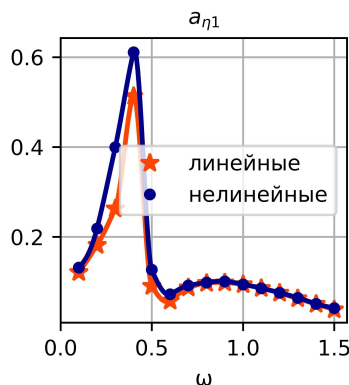


Рис. 13 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

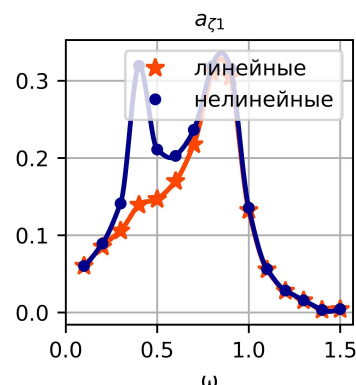


Рис. 14 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

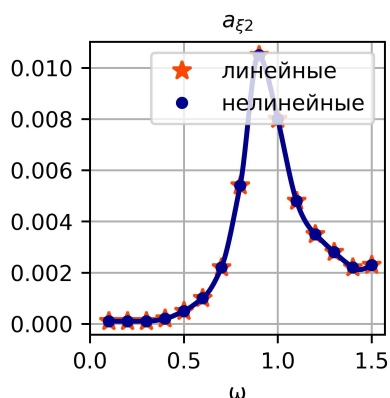


Рис. 15 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

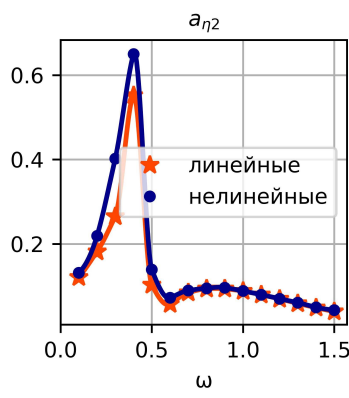


Рис. 16 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

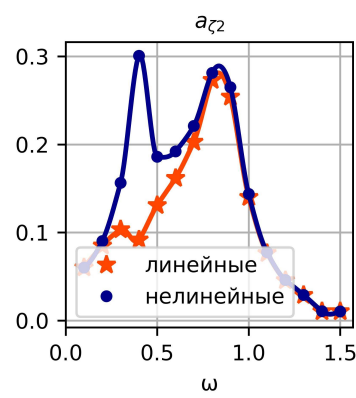


Рис. 17 Вертикальные ускорения на правом борту для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

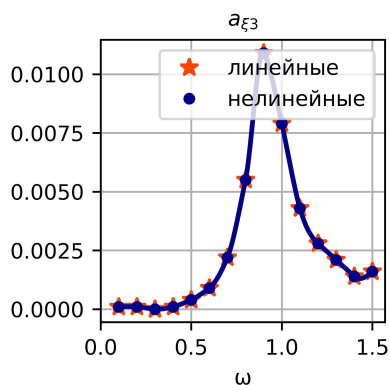


Рис. 18 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

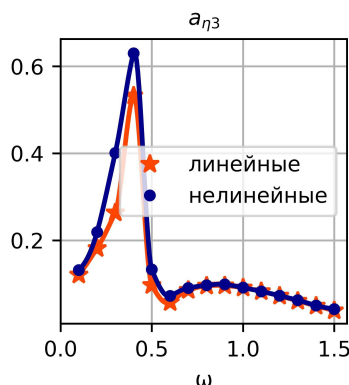


Рис. 19 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

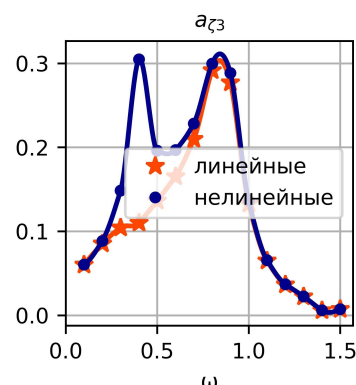


Рис. 20 Вертикальные ускорения на рубке для сухогруза «Новгород» ($\beta = 90^\circ$, $u_s = 0$)

При качке на встречном регулярном волнении и наличии скорости хода отмечаются наибольшие продольные составляющие ускорений. Их максимальные значения могут составлять $0,4g$. Вертикальные составляющие также имеют наибольшие значения и могут составлять $1,5g$, особенно в точке на носовом перпендикуляре. Влияние нелинейных сил в ряде случаев может достигать 20 %, особенно в точке на правом борту.

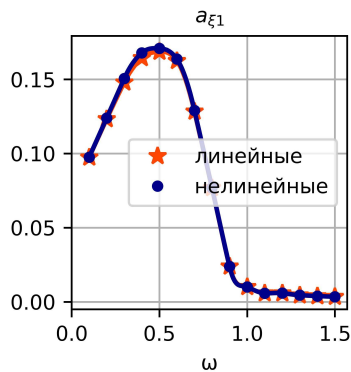


Рис. 21 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

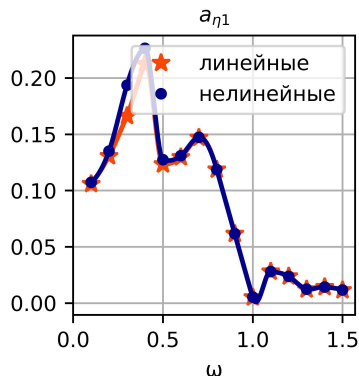


Рис. 22 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

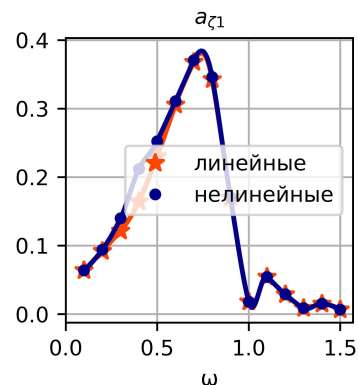


Рис. 23 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

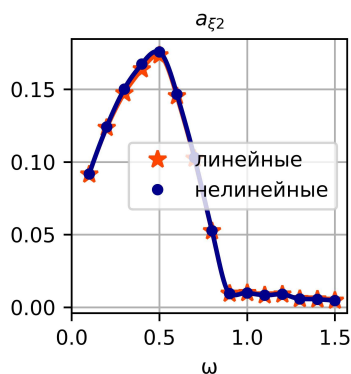


Рис. 24 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

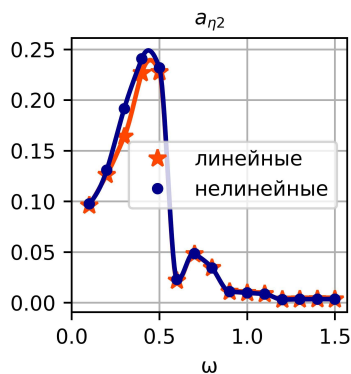


Рис. 25 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

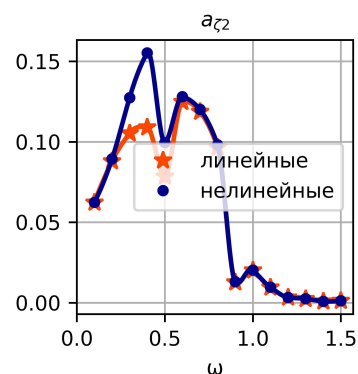


Рис. 26 Вертикальные ускорения на правом борту для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

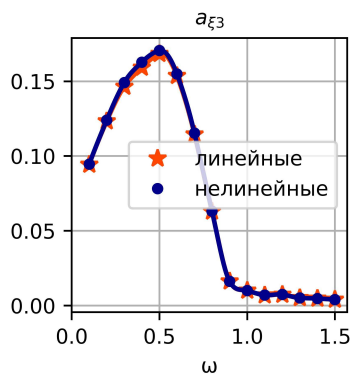


Рис. 27 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

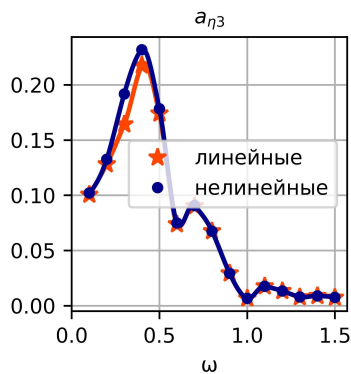


Рис. 28 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

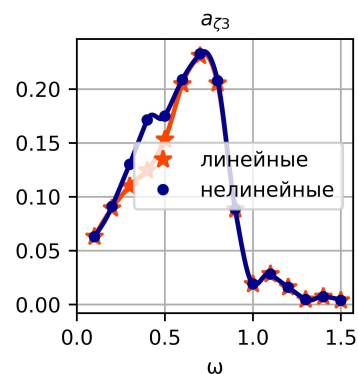


Рис. 29 Вертикальные ускорения на рубке для балкера «Капитан Панфилов» ($\beta = 135^\circ$, $u_s = 0$)

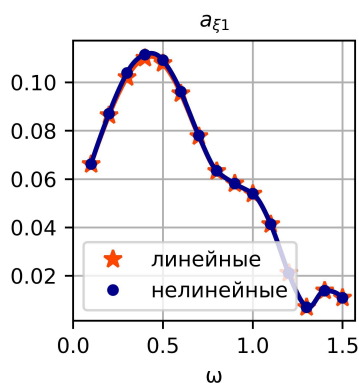


Рис. 30 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

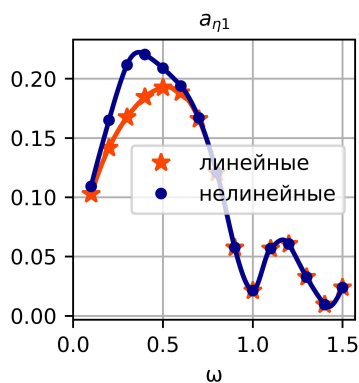


Рис. 31 Поперечно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

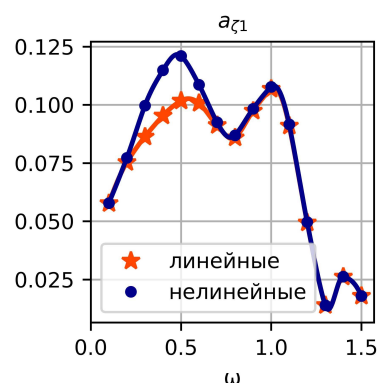


Рис. 32 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)



Рис. 33 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

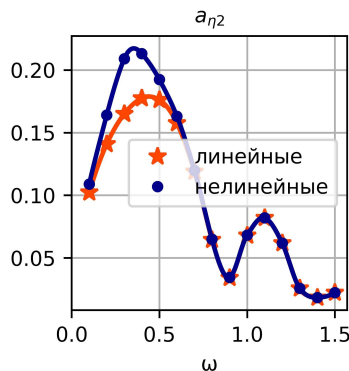


Рис. 34 Поперечно-горизонтальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

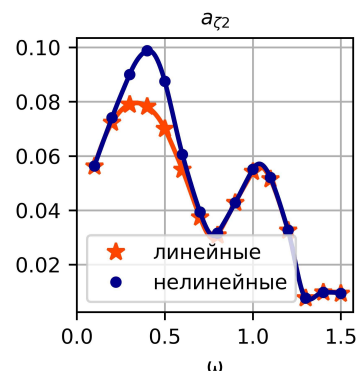


Рис. 35 Вертикальные ускорения на правом борту для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)



Рис. 36 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

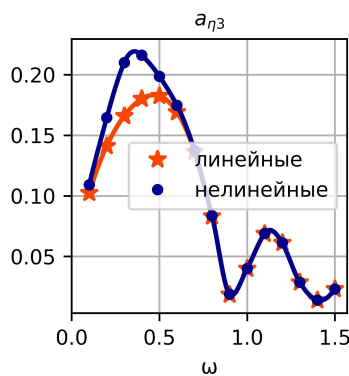


Рис. 37 Поперечно-горизонтальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

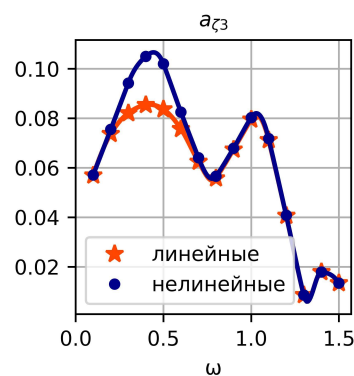


Рис. 38 Вертикальные ускорения на рубке для лесовоза «Николай Новиков» ($\beta = 60^\circ$, $u_s = 15,5^\circ$)

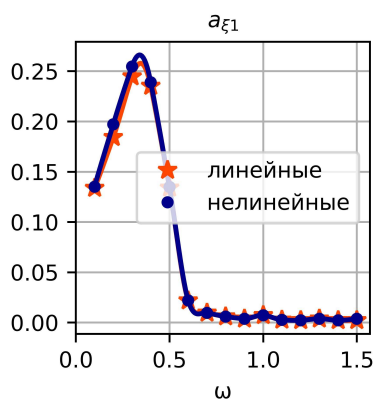


Рис. 39 Продольно-горизонтальные ускорения на носовом перпендикуляре для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($\beta = 180^\circ$, $u_s = 20,3$)

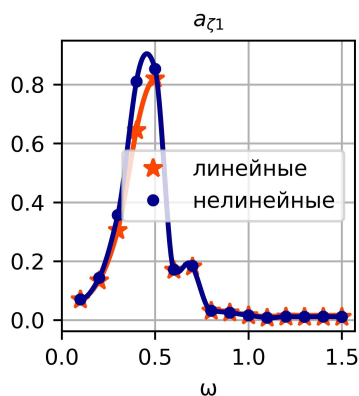


Рис. 40 Вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($\beta = 180^\circ$, $u_s = 20,3$)

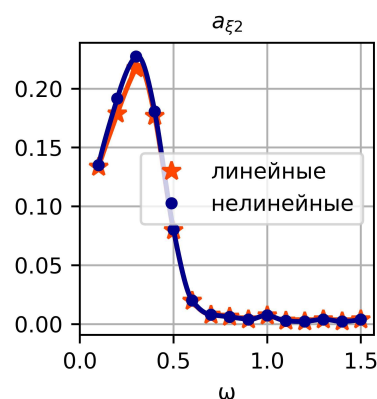


Рис. 41 Продольно-горизонтальные ускорения на правом борту для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($\beta = 180^\circ$, $u_s = 20,3$)

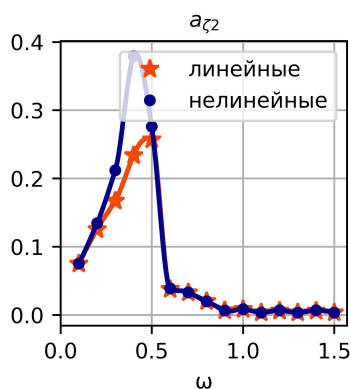


Рис. 42 Вертикальные ускорения на правом борту для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($\beta = 180^\circ$, $u_s = 20,3$)

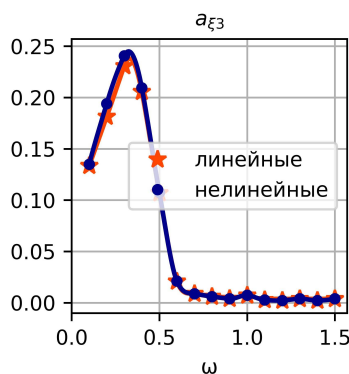


Рис. 43 Продольно-горизонтальные ускорения на рубке для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($\beta = 180^\circ$, $u_s = 20,3$)

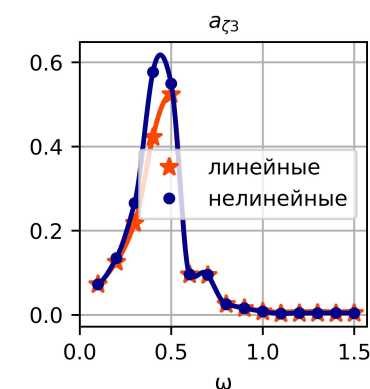


Рис. 44 Вертикальные ускорения на рубке для лихтеровоза «Алексей Косыгин» ($\beta = 180^\circ$, $u_s = 20,3$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Применение трехмерных методов позволяет проводить расчеты ускорений при любых значениях курсовых углов и скоростей.
2. Наибольшие амплитуды поперечных и вертикальных составляющих ускорения имеют место при расположении судна лагом без скорости хода в точках на борту и в зоне расположения рубки.
3. Наибольшие продольные составляющие ускорения имеют место на встречном волнении при наличии скорости хода в точках на носовом и кормовом перпендикулярах.
4. Наибольшее влияние нелинейных сил проявляется на поперечные и вертикальные составляющие ускорений и имеет место в зонах супергармонических резонансных режимов бортовой качки и может в ряде случаев достигать 100 %. Наименьшее влияние нелинейных сил имеет место на продольные составляющие ускорений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луговский В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля Л., Судостроение, 1966.
2. Семенова В. Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов //Дисс. на соиск. уч. степени д. т. н. Библиотека СПбГМТУ, 2005.
3. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А.. Определение инерционно-демпфирующих сил второго порядка малости, возникающих при качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории//Морские интеллектуальные технологии, № 2(44), т. 1, с. 36 — 44, 2019.
4. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при вертикальной качке судна, на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 4-1 (40), с. 63 — 69, 2019.
5. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при поперечно-горизонтальных и бортовых колебаниях судов на основании трехмерной потенциальной теории. Морские интеллектуальные технологии. № 2-2 (48), 2020.
6. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных дифракционных сил второго порядка, действующих на судно, на основании трехмерной теории. Морские интеллектуальные технологии, № 2, т. 3, с. 20 — 28, 2021.
7. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии волнения и отдельных видов качки судна. Морские интеллектуальные технологии. № 4, т. 2, с. 21 — 31, 2021.
8. Семенова В.Ю., Альбаев Д.А. Численное определение нелинейных сил второго порядка, возникающих при взаимодействии отдельных видов качки судна на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. № 2, ч. 2, с. 125 — 133, 2022.
9. Со Чжо Ту Разработка метода расчета нелинейных сил второго порядка, возникающих при качке судна на мелководье // Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Библиотека СПбГМТУ, 2014.
10. Со Чжо Ту, Семенова В.Ю. Расчет ускорений, возникающих при поперечной качке судна на мелководье с учетом нелинейных сил второго порядка // Морской Вестник, 2014, № 2 (50), 2014, с. 99 — 101.

REFERENCES

1. Lugovskiy V.V. *Nelineynye zadachi morekhodnosti korablya* [Non-linear tasks of ship's seaworthiness], L., Sudostroenie, 1966.
2. Semenova V.Yu. *Razrabotka metoda rascheta nelineynoy kachki sudov sudov* [Development of a method for calculating the non-linear motions of ships] // DSc thesis, Biblioteka SPBGMTU, 2005.
3. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye inertsionno-dempfiruyushchikh sil vtorogo poryadka malosti, voznikayushchikh pri kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of the second order inertial-damping forces arising during the oscillations of the ship based on the three-dimensional potential theory] //Marine Intellectual Technologies, No. 2(44), vol. 1, pp. 36 — 44, 2019.
4. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vertikalnoy kachke sudna, na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of nonlinear forces of the second order arising during the heaving of a ship, based on three-dimensional potential theory]. Marine intellectual technologies, No. 4-1 (40). pp. 63 — 69, 2019.
5. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri poperechno-gorizontalnykh i bortovykh kolebaniyakh sudov na osnovanii trekhmernoy potentsialnoy teorii* [Determination of nonlinear second-order forces arising from horizontal and rolling motions of ships based on three-dimensional potential theory]. Marine intellectual technologies, No. 2-2 (48), pp. 11 — 18, 2020.
6. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh difraktsionnykh sil vtorogo poryadka, deystviyushchikh na sudno, na osnovanii trekhmernoy teorii* [The determination of nonlinear second-order diffraction forces acting on a ship based on three-dimensional theory]. Marine intellectual technologies, No. 2, vol. 3, pp. 20 — 28, 2021.
7. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii volneniya i otdelnykh vidov kachki sudna* [Determination of nonlinear forces of the second order arising from the interaction of waves and certain types of ship's motions]. Marine intellectual technologies No. 4, vol. 2, pp. 21 — 31, 2021.
8. Semenova V.Yu., Albayev D.A. *Chislennoye opredeleniye nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri vzaimodeystvii otdelnykh vidov kachki sudna na regulyarnom volnenii* [Numerical determination of nonlinear forces of the second-order arising from the interaction of certain types of ship's motions in regular waves] Marine intellectual technologies, No. 2, Pt. 2, pp. 125 — 133, 2022.
9. So Chzho Tu *Razrabotka metoda rascheta nelineynykh sil vtorogo poryadka, voznikayushchikh pri kachke sudna na melkovodye* [Development of the method for calculating second-order nonlinear forces due to ship's motions in shallow water] // PhD thesis, Biblioteka SPBGMTU, 2014.
10. So Chzho Tu, Semenova V.Yu. *Raschet uskoreniy, voznikayushchikh pri poperechnoy kachke sudna na melkovodye s uchetom nelineynykh sil vtorogo poryadka* [The calculation of the accelerations occurring during cross rolling of the ship in shallow waters with non-linear forces of the second order]. Morskoy Vestnik No. 2 (50), pp. 99 — 101, 2014.