

УДК 629.122/123

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СУДОВ СМЕШАННОГО ПЛАВАНИЯ

Э.П. Лукаш, М.И. Парголога

Работа посвящена анализу динамических характеристик судов смешанного плавания.

Рассматриваются особенности расчетного моделирования корпусов судов смешанного плавания при действии динамических нагрузок, обусловленных волновой вибрацией. Подчеркивается целесообразность использования уточненного расчетного анализа на базе балочной аппроксимации корпуса судна и реализации алгоритма Папковича П.Ф.

Ключевые слова: динамические волновые нагрузки, корпусные конструкции.

Работа посвящена аналізу динамічних характеристик суден змішаного плавання. Розглядаються особливості розрахункового моделювання корпусів суден змішаного плавання при дії динамічних навантажень, обумовлених хвильовою вібрацією.

Підкреслюється доцільність використання уточненого розрахункового аналізу на базі балочної апроксимації корпусу судна і реалізації алгоритму Папковича П.Ф.

Ключові слова: динамічні хвильові навантаження, корпусні конструкції.

Work is devoted analysis of the dynamic characteristics of mixed vessels.

It are considered the features of the computational modeling of the hulls of mixed vessels under the action of dynamic loads caused by wave vibration. The expediency of using the improved computational analysis based on the beam hull approximation and the implementation of Papkovich P.F. algorithm is emphasized.

Keywords: dynamic wave loads, hull structures.

Введение. В настоящее время наблюдается относительный рост объемов усталостных повреждений корпусных конструкций, особенно скоростных судов и судов смешанного река-море плавания (СПП). Скоростные суда в период эксплуатации испытывают значительные ударные нагрузки, а сравнительно гибкие суда СПП подвержены действию дополнительных динамических изгибающих моментов, соизмеримых по величине с амплитудой квазистатических волновых моментов.

Приближение срока эксплуатации судов к предельному способствует повышению вероятности усталостных отказов конструкций, что

подчеркивает целесообразность разработки более совершенных методов расчетного анализа динамических параметров судовых конструкций [1].

На основе общепринятой модели балки Тимошенко решен ряд важных задач, связанных с оценкой и прогнозированием экстремальных и эксплуатационных волновых нагрузок на корпус судна, разработана общая схема учета динамической и квазистатической составляющих нагрузки [2-7].

При плавании на волнении корпус судна подвержен действию волновой нагрузки, которая вызывает его вертикальные колебания. Соответствующие инерционные нагрузки обуславливают появление дополнительных (резонансных) изгибающих моментов, достигающих значительной величины в том случае, когда собственная частота первого тона сравнительно гибкого СПП близка к кажущейся частоте волнения. Для морских судов эта ситуация не характерна, так как для более жестких судов резонансные явления возможны лишь на высокочастотном волнении с относительно низким энергетическим потенциалом.

Резонансные изгибающие моменты при общей вибрации корпуса можно получить путем интегрирования инерционной нагрузки

$$M_p(x) = \int_0^x \int_0^x q_i(x) dx^2. \quad (1)$$

Здесь $q_i(x)$ – инерционная нагрузка, определяемая по формуле

$$q_i(x) = m(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

где $m(x)$ – погонная масса судна с учетом присоединенной массы жидкости.

Таким образом, для определения резонансного момента необходимо:

- определить изменяющиеся во времени периодические нагрузки, действующие на корпус судна;
- определить упругие перемещения от этих нагрузок;
- определить интенсивность инерционных сил $q_i(x)$;
- путем двукратного интегрирования по формуле (1) найти функцию резонансного момента.

Интенсивность вертикальной нагрузки при плавании на волнении определяется следующей формулой:

$$q(x,t) = r_0 k [\gamma b(x) - k_d m(x) \omega_0^2] \cos(vx + \omega_\epsilon t), \quad (3)$$

Здесь $0 \leq k_d \leq 1$ – коэффициент, зависящий от $L/\lambda = \lambda_{отн}$, который определяется формулой, полученной на основании обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов

$$k_d = 0,022 \lambda_{отн}^2 - 0,33 \lambda_{отн} + 1,58, \quad (4)$$

где $\omega_\epsilon = \omega_0 + vV \cos \varphi$ – кажущаяся частота волнения;

$\nu = \omega_0^2 / g$ – частота форми волни;

$\tilde{n} = g / \omega_0 = 1,25 \sqrt{\lambda}$ – скорость распространения прогрессивных волн;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}$ – частота волны длиной λ ;

$\tau = 0,8 \sqrt{\lambda}$ – период волны;

$\hat{e} = \frac{\sin[0,5\nu b(x)\sin\varphi]}{0,5\nu b(x)\sin\varphi}$ – коэффициент;

r_0 – амплитуда волны.

Упругие вертикальные перемещения корпуса судна можно представить в виде разложения в ряд по формам свободных колебаний

$$w(x, t) = \sum_i f_i(x) p_i(t) \quad (5)$$

Здесь формы свободных колебаний $f_i(x)$ определяются из условий уравновешенности судна [4].

При оценке параметров волновой вибрации основной вклад в суммарную энергию колебаний дает первая форма, поэтому без особой потери точности ряд (5) можно ограничить первым членом ($i=1$), и соответствующая обобщенная функция времени определится из дифференциального уравнения движения системы с одной степенью свободы

$$\ddot{p}(t) + 2\mu\dot{p}(t) + \sigma^2 p(t) = Q/M, \quad (6)$$

где μ – коэффициент внутреннего сопротивления;

σ – первая собственная частота колебаний судна;

$Q = \int_0^L q(x, t) f(x) dx$ – обобщенная нагрузка;

$M = \int_0^L m(x) f^2(x) dx$ – обобщенная масса судна.

Решение дифференциального уравнения (6) имеет вид

$$p(t) = p_0(t) \alpha_A \sin(\omega t + \delta), \quad (7)$$

где $\delta = \arctg \frac{2\mu\omega}{\sigma^2 - \omega^2}$,

$\alpha_A = [(1 - z^2) + 4\mu^2 z^2]^{-2}$ – коэффициент динамичности;

$z = \omega / \sigma$ – отношение частот;

p_0 – обобщенное статическое перемещение системы.

Повидимому, для отыскания решения (6) необходимо решить задачу свободных колебаний судна. Для этого можно воспользоваться

известными приближенными энергетическими методами, либо уточненными методами типа МКЭ. Ниже приведен пример расчета свободных колебаний гибкого судна энергетическим методом.

1. Технические характеристики судна

| | |
|--|-------|
| Длина расчетная L_{pp} , м | 106 |
| Ширина по КВЛВ, м | 16,80 |
| Осадка по КВЛ, м | 7,00 |
| Скорость хода при 90 %, МДМ, узл. | 15,0 |
| Весовое водоизмещение, т | 9020 |
| Момент инерции площади миделевого сечения корпуса судна относительно горизонтальной оси I_y , м ⁴ | 7,85 |

2. Расчет общей вибрации судна

Расчет общей вибрации судна включает определение параметров общих вертикальных колебаний корпуса судна для расчетных случаев нагрузки судна для минимального и максимального эксплуатационных случаев загрузки.

Расчет выполнен методом Папковича П.Ф. с учетом деформаций сдвига, инерции вращения сечений и присоединенной массы воды для расчетного варианта загрузки судна.

Таблица 1

Итоговое распределение веса по длине судна

| Номера теор. шпаций | X_n от миделя, м | X_k от миделя, м | Масса, т | | Погонная масса, т/м | |
|---------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| | | | вариант № 1 | вариант № 1 | загрузка вариант № 1 | загрузка вариант № 1 |
| 1 | 53 | 47,7 | 200 | 200 | 37,74 | 37,74 |
| 2 | 47,7 | 42,4 | 250 | 250 | 47,17 | 47,17 |
| 3 | 42,4 | 37,1 | 250 | 250 | 47,17 | 47,17 |
| 4 | 37,1 | 31,8 | 300 | 300 | 56,60 | 56,60 |
| 5 | 31,8 | 26,5 | 320 | 320 | 60,38 | 60,38 |
| 6 | 26,5 | 21,2 | 600 | 600 | 113,21 | 113,21 |
| 7 | 21,2 | 15,9 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 8 | 15,9 | 10,6 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 9 | 10,6 | 5,3 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 10 | 5,3 | 0 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 11 | 0 | -5,3 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 12 | -5,3 | -10,6 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 13 | -10,6 | -15,9 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 14 | -15,9 | -21,2 | 650 | 650 | 122,64 | 122,64 |
| 15 | -21,2 | -26,5 | 500 | 500 | 94,34 | 94,34 |
| 16 | -26,5 | -31,8 | 380 | 380 | 71,70 | 71,70 |
| 17 | -31,8 | -37,1 | 300 | 300 | 56,60 | 56,60 |
| 18 | -37,1 | -42,4 | 250 | 250 | 47,17 | 47,17 |
| 19 | -42,4 | -47,7 | 240 | 240 | 45,28 | 45,28 |
| 20 | -47,7 | -53 | 230 | 230 | 43,40 | 43,40 |

Для определения присоединенных масс жидкости при колебаниях по двум первым формам ($i=1,2$) используем формулу Локквуд-Тейлора [6].

$$r_i = 0,5\pi\gamma k_i C_v b^2 \quad (8)$$

где $\gamma = 1025 \text{ кг/м}^3$, $C_v = (\lambda - \alpha)(\lambda - \alpha + 1) + 1$, $\lambda = 2d/b$

$$\alpha = 1.5(1 + \lambda) - 0.5\sqrt{1 + 10\lambda + \lambda^2 - \frac{32\lambda\beta}{\pi}}$$

b – ширина судна в рассматриваемом сечении;
 k_i – коэффициент, принятый по таблице 15 [4];
 d – углубление рассматриваемого сечения.

Расчет выполнен в табличной форме для расчетного варианта загрузки судна.

Таблица 2

Вычисление присоединенных масс жидкости

| Номер | $k*\gamma$ | β | B | r (т/м) | M=r*S | M*n | S | Сухой вес | Общий |
|-------|------------|---------|------|---------|--------|--------|------|-----------|--------|
| 1 | 0,75 | 0 | 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,30 | 37,74 | 37,74 |
| 2 | 0,75 | 0,83 | 12 | 22,41 | 118,77 | 237,55 | 5,30 | 47,17 | 69,58 |
| 3 | 0,75 | 0,83 | 16 | 39,84 | 211,15 | 633,46 | 5,30 | 47,17 | 87,01 |
| 4 | 0,75 | 0,87 | 16,8 | 46,04 | 244,01 | 976,06 | 5,30 | 56,60 | 102,64 |
| 5 | 0,75 | 0,95 | 16,8 | 50,27 | 266,45 | 1332,3 | 5,30 | 60,38 | 110,65 |
| 6 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 1649,2 | 5,30 | 113,21 | 165,07 |
| 7 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 1924,0 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 8 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 2198,9 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 9 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 2473,8 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 10 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 2748,6 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 11 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 3023,5 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 12 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 3298,4 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 13 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 3573,2 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 14 | 0,75 | 0,98 | 16,8 | 51,86 | 274,87 | 3848,1 | 5,30 | 122,64 | 174,50 |
| 15 | 0,75 | 0,95 | 16,8 | 50,27 | 266,45 | 3996,7 | 5,30 | 94,34 | 144,61 |
| 16 | 0,75 | 0,95 | 16,8 | 50,27 | 266,45 | 4263,2 | 5,30 | 71,70 | 121,97 |
| 17 | 0,75 | 0,95 | 16,8 | 50,27 | 266,45 | 4529,7 | 5,30 | 56,60 | 106,87 |
| 18 | 0,75 | 0,93 | 14 | 34,18 | 181,14 | 3260,5 | 5,30 | 47,17 | 81,35 |
| 19 | 0,75 | 0,89 | 12 | 24,03 | 127,36 | 2419,8 | 5,30 | 45,28 | 69,31 |
| 20 | 0,75 | 0 | 6 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,30 | 43,40 | 43,40 |

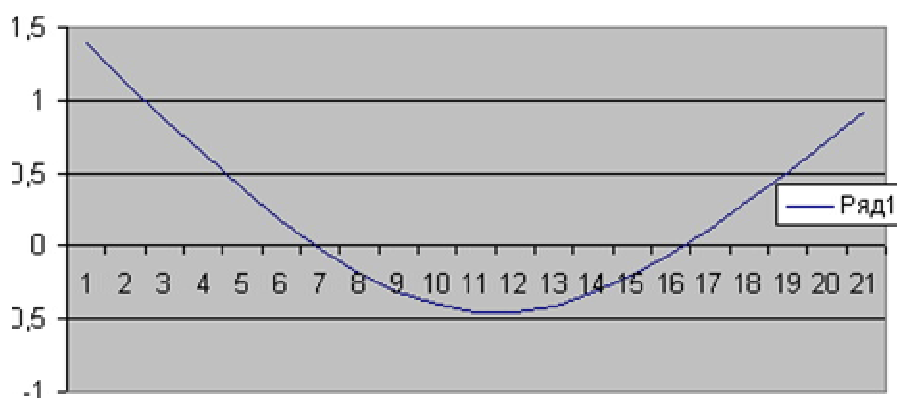


Рис. 1. Первая двухузловая форма колебаний $\varphi_1(\xi)$

Таблица 3

Вычисление фундаментальной функции $\varphi_1(\xi)$

| Теор. шп. | r_1 | r_1 | p/p_0 | $20^*(x/L-0,5)$ | $f_1(x/L)$ | (3)*(4) | (3)*(5) | (6)*(4) | (7)*(4) | $\beta^*(4)$ | $\varphi_1(\xi)$ |
|-----------|-------|-------|---------|-----------------|------------|---------|---------|---------|---------|--------------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10,0 | 11,0 |
| 0,0 | 37,7 | 0,0 | 0,3 | 10,0 | 1,0 | 0,0 | 0,3 | 0,0 | 3,1 | -0,1 | 1,1 |
| 1,0 | 47,2 | 22,4 | 0,6 | 9,0 | 0,8 | 5,1 | 0,4 | 46,0 | 3,9 | -0,1 | 0,9 |
| 2,0 | 47,2 | 39,8 | 0,7 | 8,0 | 0,5 | 5,7 | 0,4 | 45,4 | 3,0 | -0,1 | 0,6 |
| 3,0 | 56,6 | 46,0 | 0,8 | 7,0 | 0,3 | 5,9 | 0,3 | 41,0 | 1,8 | -0,1 | 0,4 |
| 4,0 | 60,4 | 50,3 | 0,9 | 6,0 | 0,1 | 5,4 | 0,1 | 32,5 | 0,5 | -0,1 | 0,2 |
| 5,0 | 113,2 | 51,9 | 1,3 | 5,0 | -0,1 | 6,7 | -0,1 | 33,7 | -0,7 | -0,1 | 0,0 |
| 6,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | 4,0 | -0,3 | 5,7 | -0,4 | 22,8 | -1,5 | 0,0 | -0,1 |
| 7,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | 3,0 | -0,4 | 4,3 | -0,6 | 12,8 | -1,8 | 0,0 | -0,3 |
| 8,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | 2,0 | -0,5 | 2,8 | -0,7 | 5,7 | -1,5 | 0,0 | -0,4 |
| 9,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | 1,0 | -0,6 | 1,4 | -0,8 | 1,4 | -0,8 | 0,0 | -0,4 |
| 10,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | 0,0 | -0,6 | 0,0 | -0,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,4 |
| 11,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | -1,0 | -0,6 | -1,4 | -0,8 | 1,4 | 0,8 | 0,0 | -0,4 |
| 12,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | -2,0 | -0,5 | -2,8 | -0,7 | 5,7 | 1,5 | 0,0 | -0,3 |
| 13,0 | 122,6 | 51,9 | 1,4 | -3,0 | -0,4 | -4,3 | -0,6 | 12,8 | 1,8 | 0,0 | -0,2 |
| 14,0 | 94,3 | 50,3 | 1,2 | -4,0 | -0,3 | -4,7 | -0,3 | 18,9 | 1,3 | 0,0 | -0,1 |
| 15,0 | 71,7 | 50,3 | 1,0 | -5,0 | -0,1 | -5,0 | -0,1 | 24,9 | 0,5 | 0,1 | 0,1 |
| 16,0 | 56,6 | 50,3 | 0,9 | -6,0 | 0,1 | -5,2 | 0,1 | 31,4 | -0,5 | 0,1 | 0,3 |
| 17,0 | 47,2 | 34,2 | 0,7 | -7,0 | 0,3 | -4,6 | 0,2 | 32,5 | -1,5 | 0,1 | 0,6 |
| 18,0 | 45,3 | 24,0 | 0,6 | -8,0 | 0,5 | -4,5 | 0,3 | 36,2 | -2,4 | 0,1 | 0,8 |
| 19,0 | 43,4 | 0,0 | 0,4 | -9,0 | 0,8 | -3,2 | 0,3 | 28,7 | -2,4 | 0,1 | 1,0 |
| 20,0 | 37,7 | 0,0 | 0,3 | -10,0 | 1,0 | -3,1 | 0,3 | 30,8 | -3,1 | 0,1 | 1,3 |
| Суммы | | | 21,0 | | | 4,1 | -3,5 | | 2,1 | Alfa= | -0,6 |
| Испр.сум | | | 20,8 | | | 6,5 | -3,6 | | 3,6 | Beta= | 2,3 |

В таблице 4 вычислена частота свободных колебаний судна для расчетного варианта загрузки, в качестве исходной информации приняты безразмерные величины погонной суммарной массы, моментов инерции и площадей стенок сечений корпуса судна p/p_0 J/J_0 f/f_0 , отнесенных к соответствующим значениям этих величин на миделе.

Таблиця 4

Расчет первой частоты колебаний судна

| Теор. шп. | ρ/ρ_0 | J/J_0 | $\varphi_1(\xi)$ | φ_1'' | $(1)*(3)^2$ | $(2)*(4)^2$ | f/f_0 | $\varphi_1'(\xi)$ | $(8)^2$ | $(7)*(9)$ |
|-----------|---------------|---------|------------------|---------------|--------------|-------------|-----------------|-------------------|---------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 | 0,3 | 0 | 1,1 | 0 | 0,36 | 0 | 0 | -4,65 | 21,62 | 0,00 |
| 1 | 0,6 | 0,45 | 0,9 | 0,58 | 0,49 | 0 | 0,5 | -4,64 | 21,53 | 10,76 |
| 2 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 2,12 | 0,25 | 3 | 0,6 | -4,57 | 20,88 | 12,53 |
| 3 | 0,8 | 0,75 | 0,4 | 4,31 | 0,13 | 14 | 0,8 | -4,42 | 19,54 | 15,63 |
| 4 | 0,9 | 0,8 | 0,2 | 6,95 | 0,04 | 39 | 0,9 | -4,14 | 17,14 | 15,43 |
| 5 | 1,3 | 1 | 0 | 9,67 | 0,00 | 94 | 1 | -3,71 | 13,76 | 13,76 |
| 6 | 1,4 | 1 | -0,1 | 12,2 | 0,01 | 149 | 1 | -3,16 | 9,99 | 9,99 |
| 7 | 1,4 | 1 | -0,3 | 14,9 | 0,13 | 222 | 1 | -2,49 | 6,20 | 6,20 |
| 8 | 1,4 | 1 | -0,4 | 16,3 | 0,22 | 266 | 1 | -1,72 | 2,96 | 2,96 |
| 9 | 1,4 | 1 | -0,4 | 17,4 | 0,22 | 303 | 1 | -0,87 | 0,76 | 0,76 |
| 10 | 1,4 | 1 | -0,4 | 17,8 | 0,22 | 317 | 1 | 0 | 0,00 | 0,00 |
| 11 | 1,4 | 1 | -0,4 | 17,4 | 0,22 | 303 | 1 | 0,87 | 0,76 | 0,76 |
| 12 | 1,4 | 1 | -0,3 | 16,3 | 0,13 | 266 | 1 | 1,72 | 2,96 | 2,96 |
| 13 | 1,4 | 1 | -0,2 | 14,9 | 0,06 | 222 | 1 | 2,49 | 6,20 | 6,20 |
| 14 | 1,2 | 1 | -0,1 | 12,2 | 0,01 | 149 | 1 | 3,16 | 9,99 | 9,99 |
| 15 | 1 | 1 | 0,1 | 9,67 | 0,01 | 94 | 1 | 3,71 | 13,76 | 13,76 |
| 16 | 0,9 | 1 | 0,3 | 6,95 | 0,08 | 48 | 1 | 4,14 | 17,14 | 17,14 |
| 17 | 0,7 | 0,75 | 0,6 | 4,31 | 0,25 | 14 | 0,9 | 4,42 | 19,54 | 17,58 |
| 18 | 0,6 | 0,65 | 0,8 | 2,12 | 0,38 | 3 | 0,8 | 4,57 | 20,88 | 16,71 |
| 19 | 0,4 | 0,55 | 1 | 0,58 | 0,40 | 0 | 0,7 | 4,64 | 21,53 | 15,07 |
| 20 | 0,3 | 0 | 1,3 | 0 | 0,51 | 0 | 0,6 | 4,65 | 21,62 | 12,97 |
| Суммы | | | | | 4,13 | 2504 | | | 268,76 | 201,16 |
| Испр. сум | | | | | 3,88 | 2477 | | | 247,13 | 194,67 |
| | | | | | $\sigma_0 =$ | 10,59 | рад/с | $k_1 =$ | 0,048 | |
| | | | | | $\sigma =$ | 10,34 | с ⁻¹ | | | |

Заклучение. Изложенный алгоритм оценки динамических характеристик может быть использован в качестве инструментария оперативного прогнозирования прочности судов смешанного плавания при действии волновых нагрузок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Егоров Г.В. Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска. [Текст] / Г.В. Егоров. – СПб.: Судостроение, 2007. – 384 с.
2. Бельгова М.А. Изгибающие моменты для судов внутреннего плавания. – СПб.: Судостроение, 1966. – 206 с.
3. Давыдов В.В. Динамические расчеты прочности судовых конструкций. [Текст] / В.В. Давыдов, Н.В. Маттес. – СПб.: Судостроение, 1974. – 336 с.
4. Постнов В.А. Вибрация корабля: Учебник. [Текст] / В.А. Постнов, В.С. Калинин, Д.М. Ростовцев. – СПб.: Судостроение, 1983. – 248 с.

5. Сулов С.В. Об учете динамических деформаций при определении волновых нагрузок на корпус судна [Текст] / С.В. Сулов, А.В. Чечель // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2006. – № 3 (408). – С. 18-24.
6. Екимов В.В. Приложение методов теории вероятностей к проблеме общей прочности корабля. – СПб.: Труды НТО СП. – Т.7. – Вып.2. – 1957.
7. Ochi M. Prediction of slamming characteristics and hull responses for ship design / M. Ochi, L. Motter // Transactions of The Society of Naval Architects and Marine Engineers. – New York: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1973. – № 81. – P. 144-76.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2017

Рецензенти:

кандидат технічних наук, професор Одеського національного морського університету **О.Б. Ляшенко**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теоретична та прикладна механіка» Одеського національного морського університету **В.В. Олейніков**