

УДК 621.6-7

А.Н. Соболенко

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФУНДАМЕНТНОЙ РАМЫ ВДГ 6NVD48A2 НА Т/Х «ПРОЛИВ ЛАПЕРУЗА»

На приемно-транспортных рефрижераторах типа «Пролив Лаперуза» установлено четыре дизель-генератора 6NVD48-A2 в машинно-котельном отделении, расположенном в кормовой части судна. В эксплуатации были зафиксированы повреждения фундаментных рам ВДГ.

Был выполнен динамический расчет для определения частот колебаний основного (первого) тона свободных колебаний фундамента ВДГ, т.е. частот первого тона свободных колебаний соответствующей системы перекрестных связей.

Цель расчета – убедиться в отсутствии резонанса этого колебания с действующей на перекрытие известной возмущающей силой, вызванной неуравновешенными поступательно-движущимися массами при работе дизель-генератора.

Определение частоты колебаний первого порядка производилось методом Рэлея. Одновременно выполнялся расчет по формулам Российского Морского Регистра судоходства.

Сравнение результатов расчета свободных колебаний и вынужденных колебаний элементов фундамента показывает, что ни одна из частот не совпадает, что позволяет говорить об отсутствии возможности резонанса колебаний, который мог бы быть причиной повреждения фундаментных рам ВДГ.

Ключевые слова: фундаментная рама, повреждения, свободные колебания, вынужденные колебания, резонанс колебаний.

A.N. Sobolenko

THE DINAMIC CALCULATION OF THE BED FRAME OF 6NVD48A2 AUXILIARY ENGINE ON «LAPERUZA STRAIT» M/S

There are four diesel generators in the engine room of «Laperuza Strait» m/s. The engine room is on the aft end of the ship. Damages of the bed frame took place in operation of 6NVD48A2 auxiliary engine.

Dynamic calculations were made to determine vibration frequencies of main (first) tone of the bed plait free vibrations, i.e. vibration frequencies of main (first) tone of the adequate system of cross ties,

The calculation goal – to be confirmed that there is no vibration resonance these vibrations with known disturbed force, which is result action of unbalanced reciprocating mass during engine operation.

The calculation of the vibration frequencies of first order was made by Relay method. At the same time the calculation was made with using formulas of Russia Marine Register of Seagoing.

Comparison of results shows that free vibrations not coincide with forced vibrations. So we can argue that there is no opportunity of vibration resonance, which could be the reason of bed plate damage.

Key words: bed frame, damages, plait free vibrations, forced vibrations, vibration resonance.

На приемно-транспортных рефрижераторах типа «Пролив Лаперуза» установлено четыре дизель-генератора 6NVD48A2 в машинно-котельном отделении, расположенном в кормовой части судна. В эксплуатации было зафиксированы случаи повреждения фундаментных рам ВДГ.

Одним из отрицательных факторов, влияющих на надежность работы фундаментных рам и рамовых подшипников, является вибрация фундаментной рамы. Опыт работы на судне «Пролив Лаперуза» свидетельствует о значительной вибрации кормовой оконечности, особенно при следовании судна в балласте.

Динамический расчет производился для определения частот колебаний основного (первого) тона свободных колебаний фундамента ВДГ, т.е. частот первого тона свободных колебаний соответствующей системы перекрестных связей.

Цель расчета – убедиться в отсутствии резонанса этого колебания с действующей на перекрытие известной возмущающей силой, вызванной неуравновешенными поступательно-движущимися массами при работе дизель-генератора.

Определение частоты колебаний первого порядка можно с достаточной для практики точностью произвести, пользуясь методом Рэлея [1].

Общее выражение для частоты главных колебаний перекрытия:

$$p^2 = \frac{K_{np}}{M_{np}}. \quad (1)$$

Рассматривая перекрытие как систему перекрестных связей, будем иметь следующее:

- для приведенного коэффициента жесткости

$$K_{np} = E \cdot \sum_1^k \left(\int_0^L I (\eta_1'')^2 dx + \right) E \sum_1^n \left(\int_0^L i (\eta_2'')^2 dy \right); \quad (2)$$

- для приведенной жесткости

$$M_{np} = \sum_1^k \left(\int_0^L M \eta_1^2 dx + \right) \sum_1^n \left(\int_0^l m \eta_2^2 dy \right), \quad (3)$$

где $\eta_1 = f(x, y_k)$ – форма колебаний перекрестных связей; $\eta_2 = f(x_n, y)$ – форма колебаний балок главного направления; I, i – момент инерции сечений и балок главного направления; M, m – массы перекрестных балок и балок главного направления; L – длина перекрытия; l – ширина перекрытия; k, n – число перекрестных балок и балок главного направления.

Перекрытие размером 1000×4000×10, расположенное между шпангоутами 182÷180, представлено на рис. 1.

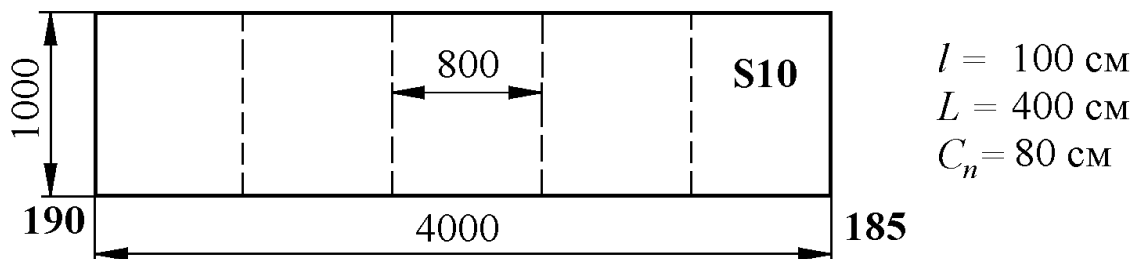


Рис. 1. Эскиз перекрытия, расположенного между шпангоутами 182÷180

Fig. 1. Draft of floor, located between 182÷180 bends

$$K_{np} = E \cdot I \cdot \frac{\pi^4}{2 \cdot l^3} \sum_{n=1}^4 \sin^2 \frac{\pi \cdot C_n}{L}; \quad (4)$$

$$K_{np} = 2 \cdot 10^6 \cdot 11813 \cdot \frac{3,14^4}{2 \cdot 100^3} \sum_{n=1}^4 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{400} = 15856 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1};$$

$$M_{np} = \frac{M \cdot l}{2} \sum_1^4 \sin^2 \frac{\pi \cdot C_n}{L}; \tag{5}$$

$$M_{np} = \frac{0,96 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{2} \sum_1^4 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{400} = 6,63 \text{ кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$P = \sqrt{\frac{K_{np}}{M_{np}}} = \sqrt{\frac{158560000}{6,63}} = 4890 \text{ с}^{-1}.$$

Перекрытие размером 5400×240×10, расположенное между шпангоутами 185÷182, представлено на рис. 2.

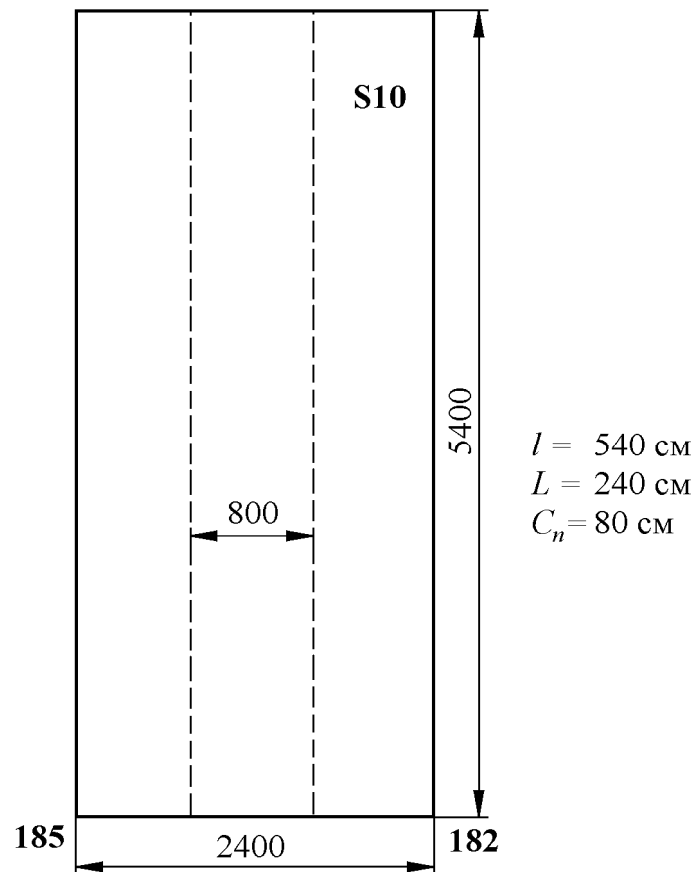


Рис. 2. Эскиз перекрытия, расположенного между шпангоутами 185÷182
 Fig. 2. Draft of floor, located between 185÷182 bends

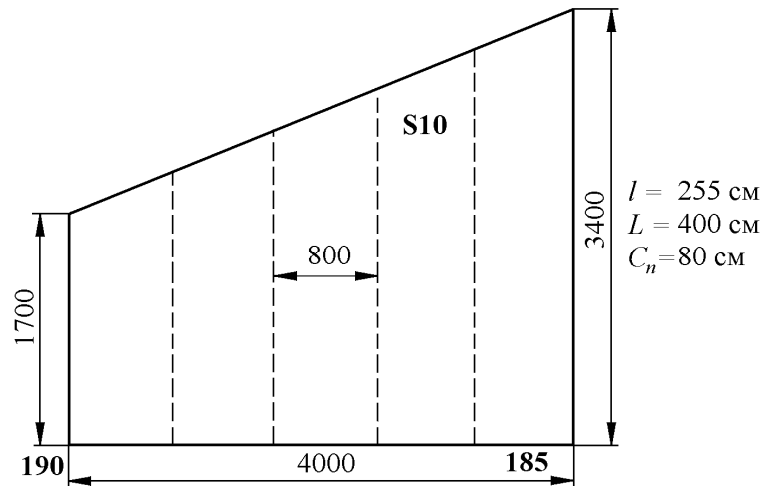
$$K_{np} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 11813 \cdot 3,14^4}{2 \cdot 540^3} \sum_1^2 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{240} = 1093200 \text{ кг/м};$$

$$M_{np} = \frac{0,96 \cdot 10^{-3} \cdot 540}{2} \sum_1^2 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{240} = 38,9 \text{ кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$P = \sqrt{\frac{1093200}{38,9}} = 167,6 \text{ с}^{-1}.$$

Перекрытие размером 2550×400×10, расположенное между шпангоутами 190÷185, представлено на рис. 3.

Рис. 3. Эскиз перекрытия,
расположенного
между шпангоутами 190÷185
Fig. 3. Draft of floor, located
between 190÷185 bends



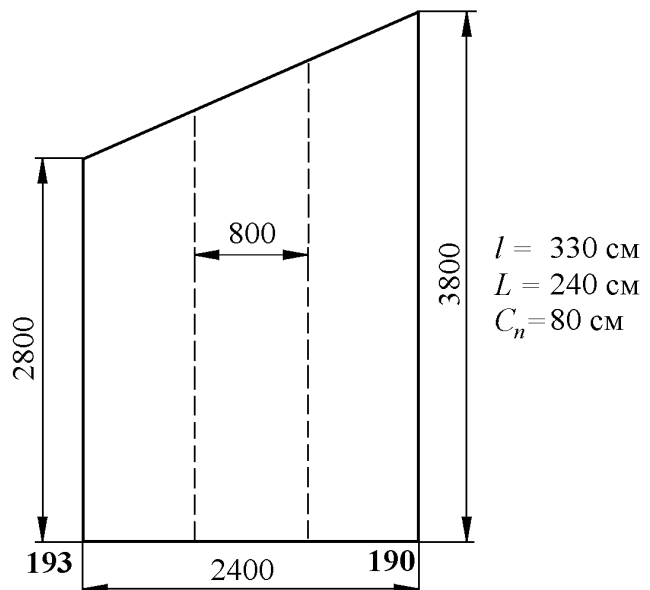
$$K_{np} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 11813 \cdot 3,14^4}{2 \cdot 255^3} \sum_1^4 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{400} = 9562300 \text{ кг/м};$$

$$M_{np} = \frac{0,95 \cdot 10^{-3} \cdot 255}{2} \sum_1^4 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{400} = 16,9 \text{ кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$P = \sqrt{\frac{9562300}{16,9}} = 752 \text{ с}^{-1}.$$

Перекрытие размером 3300×2400×10, расположенное между шпангоутами 193÷190, представлено на рис. 4.

Рис. 4. Эскиз перекрытия,
расположенного
между шпангоутами 193÷190
Fig. 4. Draft of floor, located
between 193÷190 bends



$$K_{np} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 11813 \cdot 3,14^4}{2 \cdot 330^3} \sum_1^2 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{240} = 4790200 \text{ кг/м};$$

$$M_{np} = \frac{0,95 \cdot 10^{-3} \cdot 330}{2} \sum_1^2 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{240} = 23,7 \text{ кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$P = \sqrt{\frac{4790200}{23,7}} = 449,6 \text{ с}^{-1}.$$

Перекрытие размером 2000×400×10, расположенное между шпангоутами 197÷193, представлено на рис. 5.

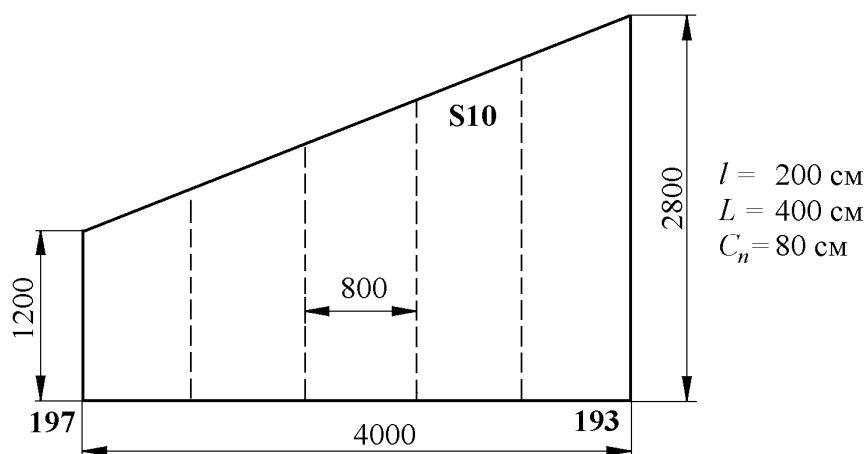


Рис. 5. Эскиз перекрытия, расположенного между шпангоутами 197 ÷ 193
Fig. 5. Draft of floor, located between 197 ÷ 193 bends

$$K_{np} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 11813 \cdot 3,14^4}{2 \cdot 200^3} \sum_1^4 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{400} = 19817000 \text{ кг/м};$$

$$M_{np} = \frac{0,95 \cdot 10^{-3} \cdot 200}{2} \sum_1^4 \sin^2 \frac{3,14 \cdot 80}{400} = 13,2 \text{ кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1};$$

$$P = \sqrt{\frac{19817000}{13,2}} = 1225 \text{ с}^{-1}.$$

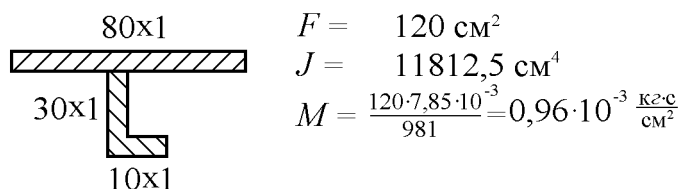


Рис. 6. Эскиз бимса с присоединенным пояском
Fig. 6. Draft of beam, with attached band

Оценка частот колебаний перекрытий по правилам Российского Регистра [2] выполнена ниже.

Частота первого тона свободных колебаний стальных пластин в воздухе, Гц

$$N_1 = 0,25 \alpha^2 \frac{S}{a^2}, \tag{6}$$

где α – коэффициент, зависящий от условий заделки кромок пластины, жестко заделанной по всему контуру

$$\alpha^2 = 22,37 \sqrt{1 + 0,605 \left(\frac{a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^4}, \quad (7)$$

где a – короткая сторона пластины, м; b – длинная сторона пластины, м; S – толщина пластины, м.

Частота первого тона свободных колебаний балок набора в воздухе в предположении свободного опирания концов балки, Гц

$$N_2 = \frac{78,5}{l} \sqrt{\frac{I_2}{F_2}}, \quad (8)$$

где l – длина ребра, м; I_2 – геометрический момент инерции поперечного сечения балки с присоединенным пояском, м⁴; F_2 – площадь поперечного сечения балки с присоединенным пояском, см².

Перекрытие размером 1000×4000×10, расположенное между шпангоутами 182÷180, представлено на рис. 1.

$$\begin{aligned} a &= 0,8 \text{ м}; \\ b &= 1,0 \text{ м}; \\ S &= 10 \text{ мм}; \\ I_2 &= 11812,5 \text{ м}^4; \\ F_2 &= 120 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

$$\alpha^2 = 22,37 \sqrt{1 + 0,605 \left(\frac{0,8}{1,0}\right)^2 + \left(\frac{0,8}{1,0}\right)^4} = 29,27;$$

$$N_1 = 0,25 \cdot 29,27 \frac{10}{0,8^2} = 117,05 \text{ Гц};$$

$$N_2 = \frac{78,5}{1,0} \sqrt{\frac{11812,5}{120}} = 778,8 \text{ Гц}.$$

Пластина $N_1 = 117$ Гц.

Ребра жесткости $N_2 = 778,8$ Гц.

Перекрытие размером 5400×2400×10, расположенное между шпангоутами 185÷182, представлено на рис. 2.

$$\begin{aligned} a &= 0,8 \text{ м}; \\ b &= 5,4 \text{ м}; \\ S &= 10 \text{ мм}; \\ l &= 5,4 \text{ м}; \\ I_2 &= 11812,5 \text{ м}^4; \\ F_2 &= 120 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

$$\alpha^2 = 22,37 \sqrt{1 + 0,605 \left(\frac{0,8}{5,4}\right)^2 + \left(\frac{0,8}{5,4}\right)^4} = 22,5;$$

$$N_1 = 0,25 \cdot 22,5 \frac{10}{0,8^2} = 87,9 \text{ Гц};$$

$$N_2 = \frac{78,5}{5,4} \sqrt{\frac{11812,5}{120}} = 144,2 \text{ Гц.}$$

Пластина $N_1 = 87,9$ Гц.

Ребра жесткости $N_2 = 144,2$ Гц.

Перекрытие размером $2550 \times 4000 \times 10$, расположенное между шпангоутами 190÷185, представлено на рис. 3.

$a = 0,8$ м;

$b = 2,55$ м;

$S = 10$ мм;

$l = 2,55$ м;

$I_2 = 11812,5 \text{ м}^4$;

$F_2 = 120 \text{ см}^2$.

$$\alpha^2 = 22,37 \sqrt{1 + 0,605 \left(\frac{0,8}{2,55} \right)^2 + \left(\frac{0,8}{2,55} \right)^4} = 23,04 ;$$

$$N_1 = 0,25 \cdot 23,04 \frac{10}{0,8^2} = 90,0 \text{ Гц};$$

$$N_2 = \frac{78,5}{2,55} \sqrt{\frac{11812,5}{120}} = 303,7 \text{ Гц.}$$

Пластина $N_1 = 90,0$ Гц.

Ребра жесткости $N_2 = 303,7$ Гц.

Перекрытие размером $3300 \times 2400 \times 10$, расположенное между шпангоутами 193÷190, представлено на рис. 4.

$a = 0,8$ м;

$b = 3,3$ м;

$S = 10$ мм;

$l = 3,3$ м;

$I_2 = 11812,5 \text{ м}^4$;

$F_2 = 120 \text{ см}^2$.

$$\alpha^2 = 22,37 \sqrt{1 + 0,605 \left(\frac{0,8}{3,3} \right)^2 + \left(\frac{0,8}{3,3} \right)^4} = 22,82 ;$$

$$N_1 = 0,25 \cdot 22,82 \frac{10}{0,8^2} = 89,13 \text{ Гц};$$

$$N_2 = \frac{78,5}{3,3} \sqrt{\frac{11812,5}{120}} = 236,0 \text{ Гц.}$$

Пластина $N_1 = 89,13$ Гц.

Ребра жесткости $N_2 = 236,0$ Гц.

Перекрытие размером $2000 \times 4000 \times 10$, расположенное между шпангоутами 197÷193, представлено на рис. 5.

$a = 0,8$ м;

$b = 2,0$ м;

$S = 10$ мм;

$l = 2,0$ м;

$I_2 = 11812,5 \text{ м}^4$;

$F_2 = 120 \text{ см}^2$.

$$\alpha^2 = 22,37 \sqrt{1 + 0,605 \left(\frac{0,8}{2,0}\right)^2 + \left(\frac{0,8}{2,0}\right)^4} = 23,71;$$

$$N_1 = 0,25 \cdot 23,71 \frac{10}{0,8^2} = 92,6 \text{ Гц};$$

$$N_2 = \frac{78,5}{2,0} \sqrt{\frac{11812,5}{120}} = 389,4 \text{ Гц}.$$

Пластина $N_1 = 92,6$ Гц.

Ребра жесткости $N_2 = 389,4$ Гц.

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Частота вынужденных колебаний при работе на номинальном режиме ВДГ кратна частоте вращения $n = 428 \text{ мин}^{-1} = 7,143 \text{ с}^{-1}$.

Порядки частот вынужденных колебаний приведены в табл. 2.

Сравнение табл. 1 и 2 показывает, что ни одна из частот не совпадает, что позволяет говорить об отсутствии возможности резонанса колебаний.

Таблица 1

Сводные результаты частот собственных колебаний элементов набора корпуса судна

Table 1

Summary results of free vibrations of components of the ship framing

Размеры перекрытий, мм	Номера шпангоутов	Частоты собственных колебаний, Гц		
		Перекрытия	Пластина	Ребра жесткости
1000×4000×10	182÷180	4890	117	782
5400×2400×10	185÷182	168	88	27
2550×4000×10	190÷185	752	90	120
3300×2400×10	193÷190	450	89	72
2000×4000×10	197÷193	1225	92	195

Таблица 2

Связь между порядком и частотой вынужденных колебаний

Table 2

The connection between degrees and force free vibrations

Порядок колебаний	Частота колебаний, Гц	Порядок колебаний	Частота колебаний, Гц
1	7,133	5	35,67
2	14,27	6	42,80
3	21,40	7	49,93
4	28,53		

Список литературы

1. Шиманский, Ю.А. Динамический расчет судовых конструкций / Ю.А. Шиманский. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 380 с.

2. Вибрация морских судов. Вибрационная прочность и нормы вибрации. Правила классификации и постройки морских судов Российского Регистра. – М.: Транспорт, 1999. – 502 с.

Сведения об авторе: Соболенко Анатолий Николаевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: sobolenko_a@mail.ru.