

**Расчет вибрации конструкции корпуса судна
проекта ПКС-40 «Сура»**

Н.Новгород, 2009 г.

1 Введение

Данный расчет содержит оценки общей и местной вибрации конструкции корпуса судна проекта ПКС-40 «Сура», выполненные в соответствии с требованиями Правил классификации и постройки судов внутреннего плавания (далее Правил РРР). В расчете проверены общие вертикальные колебания корпуса первых двух тонов при состоянии судна в грузу, и местные колебания первого тона пластин и ребер жесткости наружной обшивки и стенок топливной цистерны. Отсутствие резонансов проверено путем сравнения частот собственных колебаний с частотами возмущающих сил, вызванных работой дизелей и гребных колес.

Для конструкции платформы КДРК проведен расчет напряженно-деформированного состояния с учетом коэффициента динамичности.

2 Расчет общей вибрации

2.1 Частоты возмущающих нагрузок равны следующим величинам:

2.1.1 Частота вращения гребного колеса:

$$n_{ГК} = 0.5 \text{ Гц};$$

2.1.2 Частоты колебаний платформы КДРК

2.1.2.1 Частота колебаний платформы КДРК рассчитывается при вращении гребных колес и с учетом амортизации. Расчеты производятся численно, методом конечных элементов с применением САПР I-DEAS 10.

2.1.2.2 Расчетная модель платформы КДРК представляет собой конечно-элементную модель с наложенными условиями закрепления и нагружения (рисунок 2.1). Для моделирования элементов конструкции платформы использовались плоские четырехугольники первого порядка с шестью степенями свободы в узлах. Механические характеристики материала конструкции:

- модуль упругости первого рода $E = 2.06 \cdot 10^{11}$ Па;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0.3$;
- плотность $\rho = 7850$ кг/м³;
- предел текучести $\sigma_t = 235$ МПа.

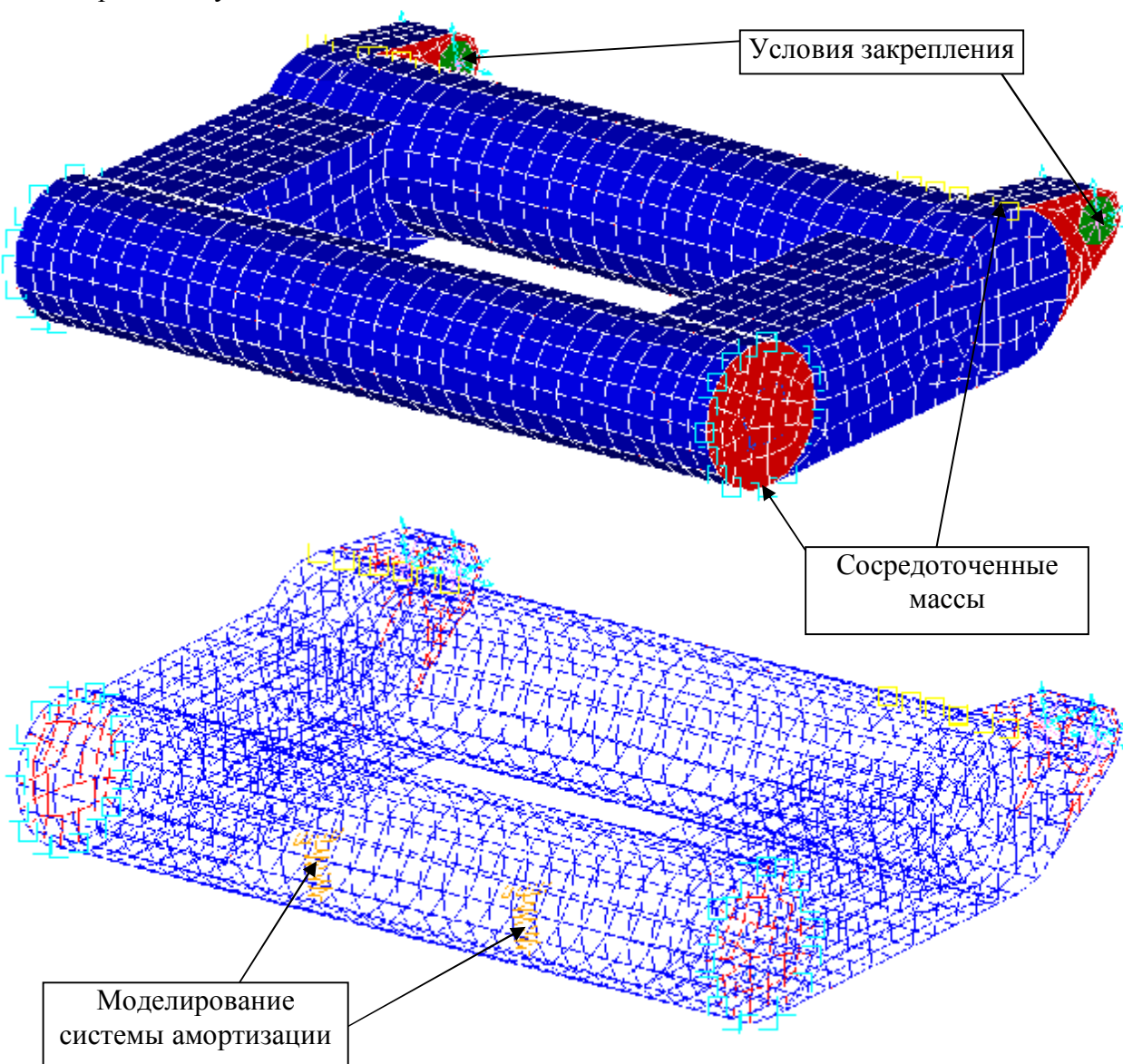


Рисунок 2.1 – Расчетная модель платформы КДРК

2.1.2.3 Вес двигателей и двигателей учитывается путем ввода сосредоточенной массы в соответствующие узлы конечных элементов.

2.1.2.4 Демпфирование учитывается путем ввода специальных конечных элементов с заданными жесткостными характеристиками (коэффициент жесткости k) системы амортизации платформы КДРК (рисунок 2.2).

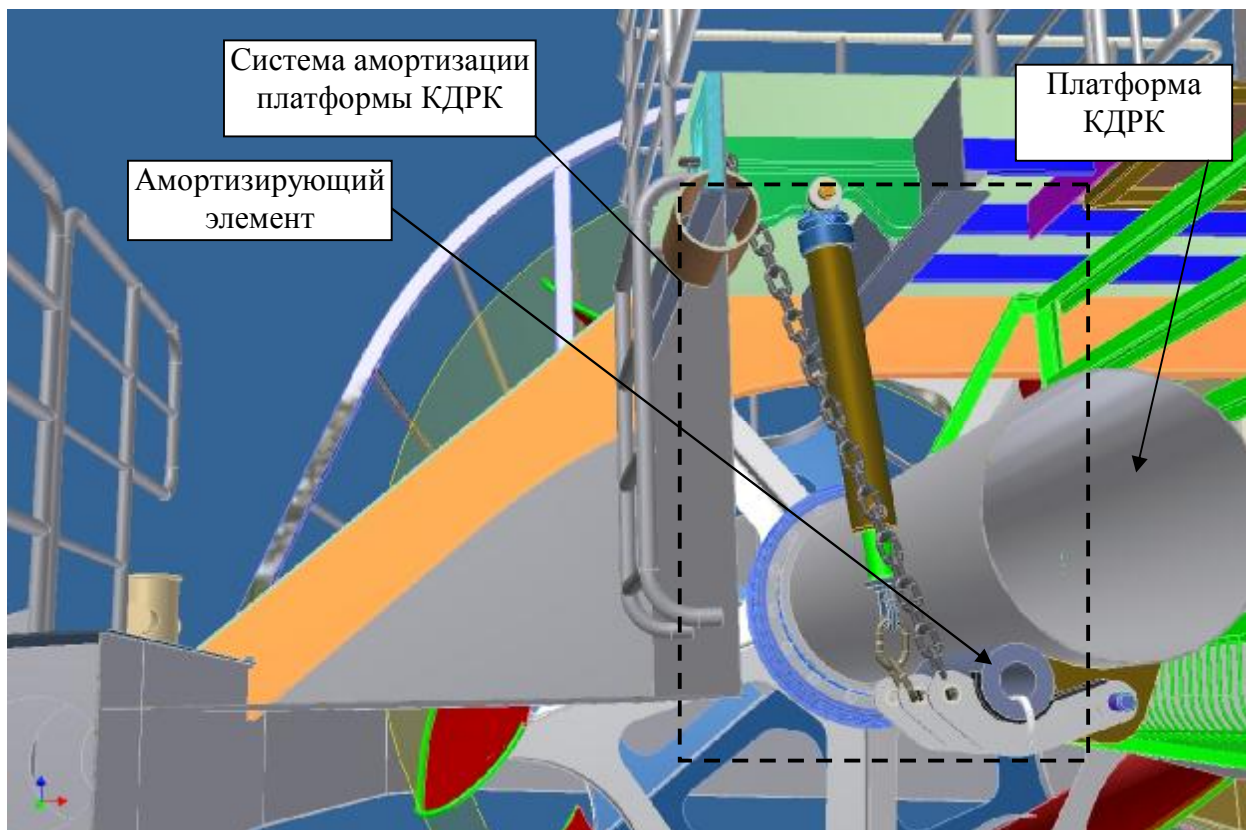


Рисунок 2.2 – Общий вид системы амортизации платформы КДРК

2.1.2.5 При определении жесткостных характеристик системы амортизации платформы КДРК рассматривается случай закрепления цепями, без учета амортизирующего элемента (допущение в безопасную сторону). Параметры цепи: калибр 14 без распорок, длина 1250 мм (ТУ 3148-014-00165735-2002). Механические характеристики материала цепи соответствуют характеристикам материала платформы КДРК. Коэффициент жесткости цепи при растяжении рассчитывается следующим образом:

$$k = P/\epsilon = 1000/1.73 \cdot 10^{-4} = 5.78 \cdot 10^6 \text{ Н/м,}$$

где P – растягивающая нагрузка;

ϵ – величина деформации цепи.

2.1.2.6 Расчет величины деформации цепи ϵ при заданной растягивающей нагрузке производится методом конечных элементов с применением САПР I-DEAS 10. Расчетная модель показана на рисунке 2.3. Результаты расчета приведены на рисунке 2.4

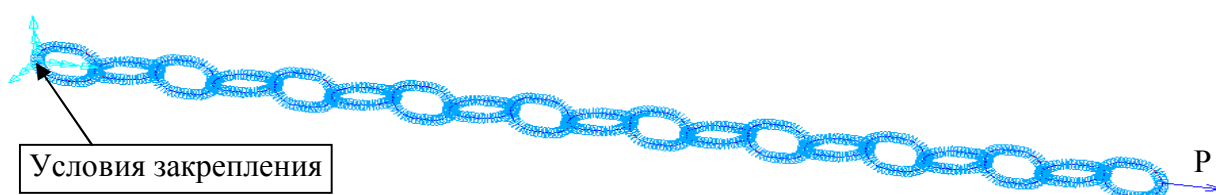


Рисунок 2.3

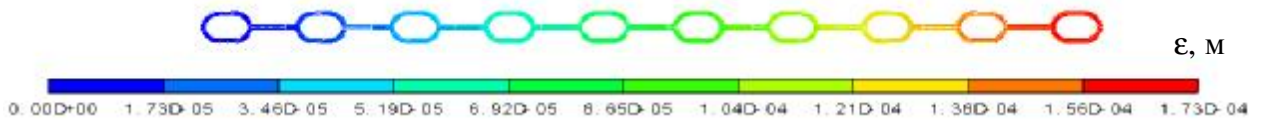
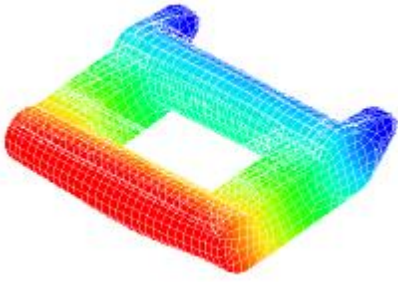
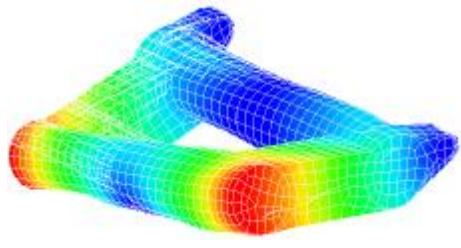


Рисунок 2.4

2.1.2.7 Результаты расчета частот колебаний платформы КДРК приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1

Тон вибрации	Форма колебаний платформы КДРК	Значение частоты колебаний $n_{КДРК}$, Гц
1		8.0
2		22.2

min max

2.1.3 Частота вращения коленчатого вала дизель-генератора:

$$n_{дг} = 25 \text{ Гц};$$

2.1.4 Частота вращения коленчатого вала дизель-генератора, умноженная на число рабочих циклов за один оборот коленчатого вала:

$$n_{дгц} = n_{дг} \cdot P_H,$$

где $P_H = k \cdot i$ – число рабочих циклов за один оборот коленчатого вала;

$k = 0.5$ – коэффициент для четырехтактного двигателя;

i – число цилиндров дизеля.

Результаты расчета $n_{дгц}$ приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Число цилиндров дизеля i	Число рабочих циклов за один оборот коленчатого вала P_H	$n_{дгц}$, Гц
8	4	100
6	3	75

Примечание – Дизель-генераторы имеют двухкаскадную амортизацию.

2.2 Частоты свободных вертикальных колебаний корпуса

2.2.1 Частота свободных вертикальных колебаний первого тона:

$$N_1 = 5.92 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{\frac{I}{\left(1.2 + \frac{B}{3 \cdot T}\right) \cdot D \cdot L^3}},$$

где $I = 0.0294 \text{ м}^4$ – момент инерции площади миделевого сечения корпуса;

$B = 9.5 \text{ м}$ – ширина судна;

T – осадка судна на миделе;

D – водоизмещение судна;

L – длина судна по действующей ватерлинии.

2.2.2 Частота свободных вертикальных колебаний второго тона:

$$N_2 = 2.3 \cdot N_1.$$

2.2.3 Результаты расчета N_1 и N_2 приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Осадка судна на миделе T , м	Водоизмещение судна D , т	Длина судна по действующей ватерлинии L , м	N_1 , Гц	N_2 , Гц
0.62	137	27.75	2.36	5.43
0.68	151	27.90	2.32	5.34

2.3 При общей вибрации корпуса резонанс исключен, поскольку требования п. 2.6.6 Правил РРР по частотам выполнены (таблица 2.4).

Таблица 2.4

Тон общей вибрации j	Частота общей вибрации N_j , Гц	Частота возмущающей нагрузки n_i , Гц	$0.15n_i$, Гц	$0.2n_i$, Гц	Требования п. 2.6.6 Правил РРР		
					$ N_j - n_i > 0.15n_i$, Гц	$ N_j - n_i > 0.2n_i$, Гц	
$T=0.62 \text{ м}, D=137 \text{ т}, L=27.75 \text{ м}$	1	2.40	0.5	0.075	-	$1.9 > 0.075$	-
		8.0	1.2	-	-	$5.6 > 1.2$	-
		22.2	3.33	-	-	$19.8 > 3.33$	-
		25	3.750	-	-	$22.6 > 3.750$	-
		75	11.250	-	-	$72.6 > 11.250$	-
	100	15.000	-	-	$97.6 > 15.000$	-	
	2	5.52	0.5	-	0.1	-	$5.02 > 0.1$
		8.0	-	-	1.6	-	$2.48 > 1.6$
		22.2	-	-	4.44	-	$16.68 > 4.44$
		25	-	-	5	-	$19.48 > 5.0$
75		-	-	15	-	$69.48 > 15.0$	
100	-	-	20	-	$94.48 > 20.0$		
$T=0.68 \text{ м}, D=151 \text{ т}, L=27.90 \text{ м}$	1	2.32	0.5	0.075	-	$1.075 > 0.075$	-
		8.0	1.2	-	-	$5.68 > 1.2$	-
		22.2	3.33	-	-	$19.88 > 3.33$	-
		25	3.750	-	-	$22.68 > 3.750$	-
		75	11.250	-	-	$72.68 > 11.250$	-
	100	15.000	-	-	$97.68 > 15.000$	-	
	2	5.34	0.5	-	0.1	-	$4.84 > 0.1$
		8.0	-	-	1.6	-	$2.66 > 1.6$
		22.2	-	-	4.44	-	$16.86 > 4.44$
		25	-	-	5	-	$19.66 > 5.0$
75		-	-	15	-	$69.48 > 15.0$	
100	-	-	20	-	$94.48 > 20.0$		

3 Расчет местной вибрации

3.1 Расчет элементов днища

3.1.1 Частота свободных колебаний первого тона пластины днища, опертой на рамный набор и подкрепленной ребрами жесткости, определяется по формуле:

$$N_{II} = \frac{p}{2c^2} \left(1 + \frac{c^2}{l^2} \right) \sqrt{\frac{Et^2}{12r(1-m^2)}} = \frac{3.1415}{2 \cdot 0.45^2} \left(1 + \frac{0.45^2}{1.68^2} \right) \sqrt{\frac{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.004^2}{12 \cdot 7850 \cdot (1-0.3^2)}} = 51.5 \text{ Гц},$$

где $E = 2.06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости первого рода материала пластины;

$m = 0.3$ – коэффициент Пуассона материала пластины;

$r = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала пластины;

$c = 0.45$ м – короткая стороны ячейки пластины, образованная рамным и холостым набором;

$l = 1.68$ м – длинная сторона ячейки пластины;

$t = 0.004$ м – толщина пластины.

3.1.2 Коэффициент влияния присоединенных масс жидкости, омывающей пластину с одной стороны:

$$k_{II} = 1 + ar_{ж}c / rt = 1 + 0.67 \cdot 1000 \cdot 0.45 / 7850 \cdot 0.004 = 10.6,$$

где $t = 0.004$ м – толщина пластины;

$c = 0.45$ м – короткая стороны ячейки пластины;

$r = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала пластины;

$r_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкости;

$a = 0.67$ – коэффициент, определяемый по таблице 2.6.12 Правил РРР в зависимости от отношения сторон пластины c/l .

3.1.3 С учетом присоединенных масс жидкости частота свободных колебаний первого тона пластины днища, опертой на рамный набор и подкрепленной ребрами жесткости определяется по формуле:

$$N_{II}^* = \frac{N_{II}}{\sqrt{k_{II}}} = \frac{51.5}{\sqrt{10.6}} = 15.8 \text{ Гц}.$$

3.1.4 Согласно п. 2.6.10 Правил РРР, необходимый запас по частотам для пластины днища выдерживается:

$$N_{II}^* - n_{КДРК} = 15.8 - 8 = 7.8 \text{ Гц} > 0.5n_{КДРК} = 0.5 \cdot 8 = 4 \text{ Гц}.$$

3.1.5 Частота свободных колебаний первого тона ребра жесткости днища определяется по формуле:

$$N_P = K \sqrt{Ei/m_p l^4} = 3.56 \sqrt{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 245 \cdot 10^{-8} / 20.9 \cdot 1.68^4} = 196 \text{ Гц},$$

где $K = 3.56$ – при жестко заделанных концах профиля;

$E = 2.06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости первого рода материала ребра жесткости;

$i = 245 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ – момент инерции поперечного сечения ребра с присоединенным пояском обшивки $c_1 = 200$ мм;

$m_p = r(f + ct) = 7850(8.63 \cdot 10^{-4} + 0.45 \cdot 0.004) = 20.9 \text{ Кг/м}$;

$f = 8.63 \cdot 10^{-4}$ – площадь поперечного сечения ребра жесткости;

$c = 0.45$ м – короткая стороны ячейки пластины обшивки, образованная рамным и холостым набором;

$t = 0.004$ м – толщина пластины обшивки;

$l = 1.68$ м – длина ребра жесткости.

3.1.6 Коэффициент влияния присоединенных масс жидкости, омывающей конструкцию с одной стороны:

$$k_P = 1 + \frac{ar_{ж}a}{rt_{пп}} = 1 + \frac{0.46 \cdot 1000 \cdot 1.68}{7850 \cdot 0.00592} = 17.6,$$

где $a = 0.46$ – коэффициент, определяемый по таблице 2.6.12 Правил РРР в зависимости от отношения сторон пластины a/b ;

$r_{жс} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкости;

$r = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала пластины;

$a = 1.68 \text{ м}$ – меньший размер пластины;

$b = 2.25 \text{ м}$ – больший размер пластины;

$t_{ПР} = t + f/c = 0.004 + 8.63 \cdot 10^{-4} / 0.45 = 0.00592 \text{ м}$ – приведенная толщина пластины с ребром;

$t = 0.004 \text{ м}$ – толщина пластины обшивки;

$f = 8.63 \cdot 10^{-4}$ – площадь поперечного сечения ребра жесткости;

$c = 0.45 \text{ м}$ – короткая стороны ячейки пластины.

3.1.7 С учетом присоединенных масс жидкости частота свободных колебаний первого тона ребра жесткости днища определяется по формуле:

$$N_P^* = \frac{N_P}{\sqrt{k_P}} = \frac{196}{\sqrt{17.6}} = 46.7 \text{ Гц.}$$

3.1.8 Согласно п. 2.6.10 Правил РРР, необходимый запас по частотам для ребра жесткости днища выдерживается:

$$N_P^* - n_{КДРК} = 46.7 - 8 = 38.7 \text{ Гц} > 0.3n_{КДРК} = 0.3 \cdot 8 = 2.4 \text{ Гц.}$$

3.1.9 Соотношение частоты свободных колебаний ребра жесткости и пластины днища удовлетворяет условию п. 2.6.17 Правил РРР:

$$\frac{N_P^*}{N_{II}^*} = \frac{46.7}{15.8} = 2.96 > 2.0.$$

3.2 Расчет элементов топливной цистерны

3.2.1 Частота свободных колебаний ячеек пластин топливной цистерны, подкрепленных ребрами жесткости, определяется по формуле:

$$N_{II} = \frac{1.13p}{c^2} \sqrt{1 + 0.605 \frac{c^2}{l^2} + \frac{c^4}{l^4}} \times \sqrt{\frac{Et^2}{12r(1-m^2)}} =$$

$$= \frac{1.13 \cdot 3.1415}{0.45^2} \sqrt{1 + 0.605 \frac{0.45^2}{1.4^2} + \frac{0.45^4}{1.4^4}} \times \sqrt{\frac{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.004^2}{12 \cdot 7850 \cdot (1 - 0.3^2)}} = 51.6 \text{ Гц,}$$

где $c = 0.45 \text{ м}$ – короткая стороны ячейки пластины;

$l = 1.4 \text{ м}$ – длинная сторона ячейки пластины;

$t = 0.004 \text{ м}$ – толщина пластины;

$E = 2.06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ – модуль упругости первого рода материала пластины;

$m = 0.3$ – коэффициент Пуассона материала пластины;

$r = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала пластины;

3.2.2 Коэффициент влияния присоединенных масс жидкости, омывающей пластину с одной стороны:

$$k_{II} = 1 + ar_{жс}c / rt = 1 + 1.1 \cdot 900 \cdot 0.45 / 7850 \cdot 0.004 = 15.2,$$

где $t = 0.004 \text{ м}$ – толщина пластины;

$c = 0.45 \text{ м}$ – короткая стороны ячейки пластины;

$r = 7850 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала пластины;

$r_{жс} = 900 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкости;

$a = 1.1$ – коэффициент, определяемый по рисунку 2.6.19 Правил РРР в зависимости от отношения сторон ячейки пластины c/l по кривой соответствующей числу ячеек пластины $n=4$.

3.2.3 С учетом присоединенных масс жидкости частота свободных колебаний ячеек пластин топливной цистерны, подкрепленных ребрами жесткости, определяется по формуле:

$$N_{\Pi}^* = \frac{N_{\Pi}}{\sqrt{k_{\Pi}}} = \frac{51.6}{\sqrt{15.2}} = 13.2 \text{ Гц.}$$

3.2.4 Согласно п. 2.6.10 Правил РРР, необходимый запас по частотам для пластины топливной цистерны выдерживается:

$$N_{\Pi}^* - n_{\text{КДРК}} = 13.2 - 8 = 5.2 \text{ Гц} > 0.5n_{\text{КДРК}} = 0.5 \cdot 8 = 4 \text{ Гц.}$$

3.2.5 Частота свободных колебаний первого тона ребра жесткости пластины топливной цистерны определяется по формуле:

$$N_P = K \sqrt{Ei/m_p l^4} = 2.46 \sqrt{2.06 \cdot 10^{11} \cdot 130 \cdot 10^{-8} / 18.7 \cdot 1.4^4} = 146 \text{ Гц,}$$

где $K = 2.46$ – при свободно опертом одном конце профиля и жестко заделанном другом конце;

$E = 2.06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости первого рода материала ребра жесткости;

$i = 130 \cdot 10^{-8}$ м⁴ – момент инерции поперечного сечения ребра с присоединенным пояском обшивки $c_1 = 200$ мм;

$m_p = r(f + ct) = 7850(5.84 \cdot 10^{-4} + 0.45 \cdot 0.004) = 18.7$ Кг/м;

$f = 5.84 \cdot 10^{-4}$ – площадь поперечного сечения ребра жесткости;

$c = 0.45$ м – короткая стороны ячейки пластины обшивки;

$t = 0.004$ м – толщина пластины обшивки;

$l = 1.4$ м – длина ребра жесткости.

3.2.6 Коэффициент влияния присоединенных масс жидкости, омывающей конструкцию с одной стороны:

$$k_P = 1 + \frac{ar_{ж}a}{rt_{\text{ПР}}} = 1 + \frac{0.502 \cdot 900 \cdot 1.4}{7850 \cdot 0.0053} = 16.2,$$

где $a = 0.502$ – коэффициент, определяемый по таблице 2.6.12 Правил РРР в зависимости от отношения сторон пластины a/b ;

$r_{ж} = 900$ кг/м³ – плотность жидкости;

$r = 7850$ кг/м³ – плотность материала пластины;

$a = 1.68$ м – меньший размер пластины;

$b = 2.25$ м – больший размер пластины;

$t_{\text{ПР}} = t + f/c = 0.004 + 5.84 \cdot 10^{-4} / 0.45 = 0.0053$ м – приведенная толщина пластины с ребром;

$t = 0.004$ м – толщина пластины обшивки;

$f = 5.84 \cdot 10^{-4}$ – площадь поперечного сечения ребра жесткости;

$c = 0.45$ м – короткая стороны ячейки пластины.

3.2.7 С учетом присоединенных масс жидкости частота свободных колебаний первого тона ребра жесткости пластины топливной цистерны определяется по формуле:

$$N_P^* = \frac{N_P}{\sqrt{k_P}} = \frac{146}{\sqrt{16.2}} = 36.3 \text{ Гц.}$$

3.2.8 Согласно п. 2.6.10 Правил РРР, необходимый запас по частотам для ребра жесткости днища выдерживается:

$$N_P^* - n_{\text{КДРК}} = 36.3 - 8 = 28.3 \text{ Гц} > 0.3n_{\text{КДРК}} = 0.3 \cdot 8 = 2.4 \text{ Гц.}$$

3.2.9 Соотношение частоты свободных колебаний ребра жесткости и пластины топливной цистерны удовлетворяет условию п. 2.6.17 Правил РРР:

$$\frac{N_P^*}{N_{\Pi}^*} = \frac{36.3}{13.2} = 2.75 > 2.0.$$

4 Расчет вибрационной прочности конструкции платформы КДРК

4.1 Определение коэффициента динамичности

4.1.1 Определение коэффициента динамичности производится путем анализа динамических откликов модели конструкции платформы КДРК в вертикальном направлении (ось Y модели), в контрольных узлах (рисунок 4.1). Контрольные узлы выбраны в местах крепления движителей, в области шарнирного крепления платформы КДРК и в местах экстремума формы колебаний (таблица 2.1).

4.1.2 Расчеты динамических откликов производятся численно, методом конечных элементов с применением САПР I-DEAS 10. При расчете динамических откликов учитываются демпфирующие свойства конструкции платформы КДРК. Результаты расчета приведены на рисунке 4.2.

4.1.3 В качестве коэффициента динамичности K_d принимается максимальное значение отклика конструкции платформы КДРК для колебаний первого тона при воздействии единичной синусоидальной вибрационной функции на частотном диапазоне от 0 до 100 Гц. Принимаем $K_d = 2.4$ (рисунок 4.2).

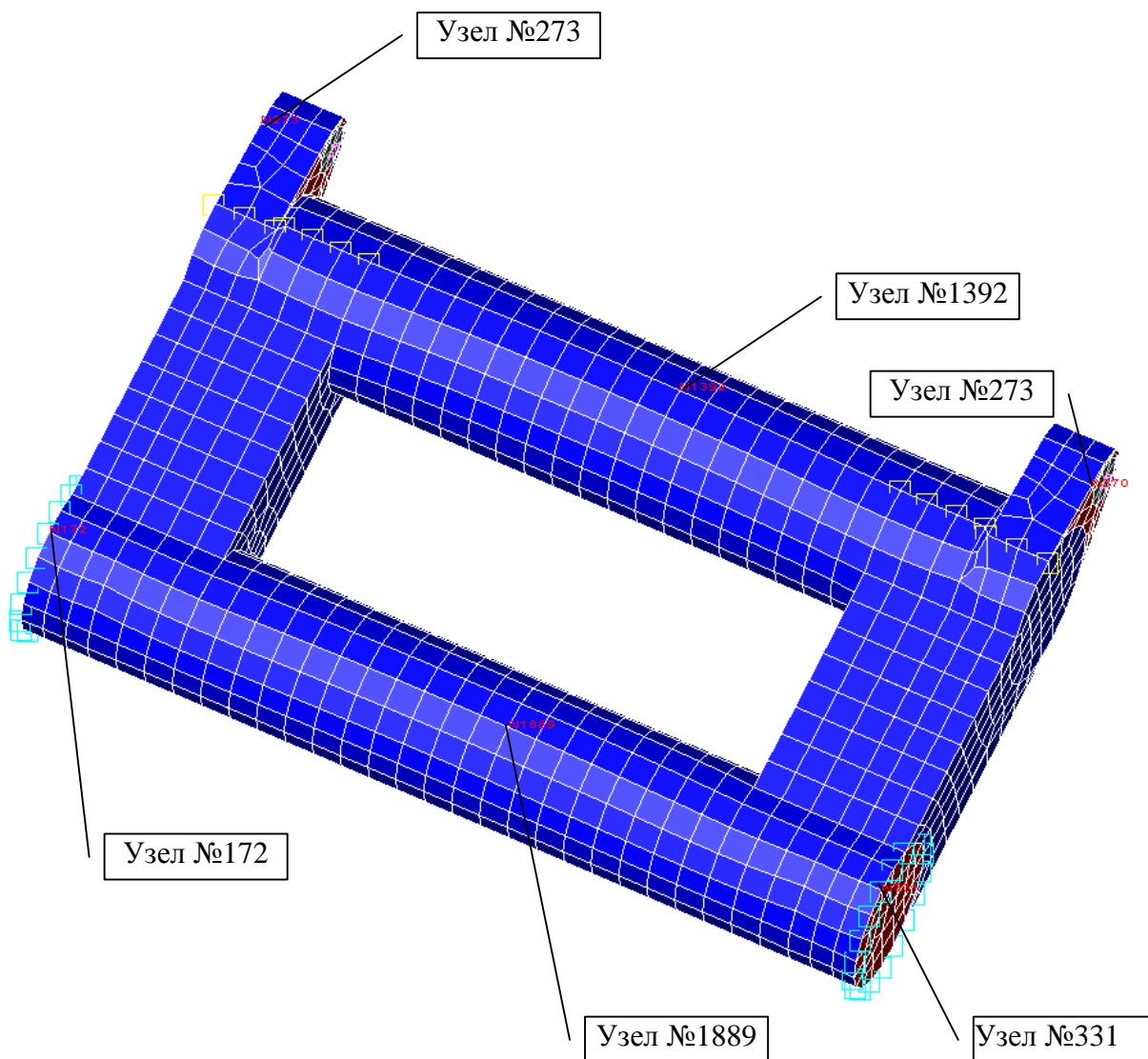


Рисунок 4.1

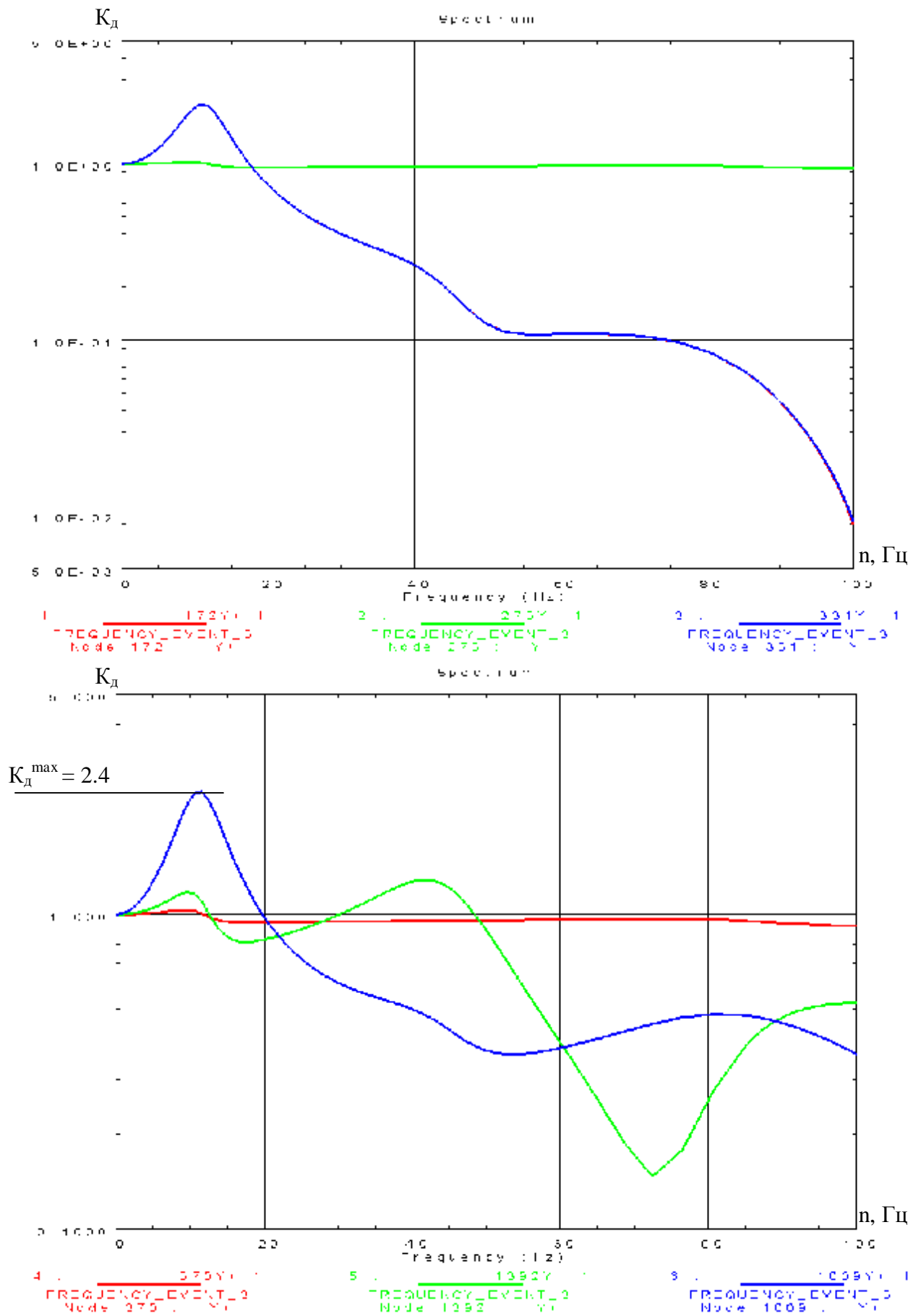


Рисунок 4.2

4.2 Расчет напряженно-деформированного состояния

4.2.1 Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции платформы КДРК производится в статической постановке с учетом коэффициента динамичности $K_d^{\max} = 2.4$. Расчет проводится методом конечных элементов с применением САПР I-DEAS 10.

4.2.2 Результаты расчета приведены на рисунках 4.3-4.4. Коэффициент запаса прочности конструкции платформы КДРК:

$$h = s_T / s_s = 235 / 102 = 2.3 .$$

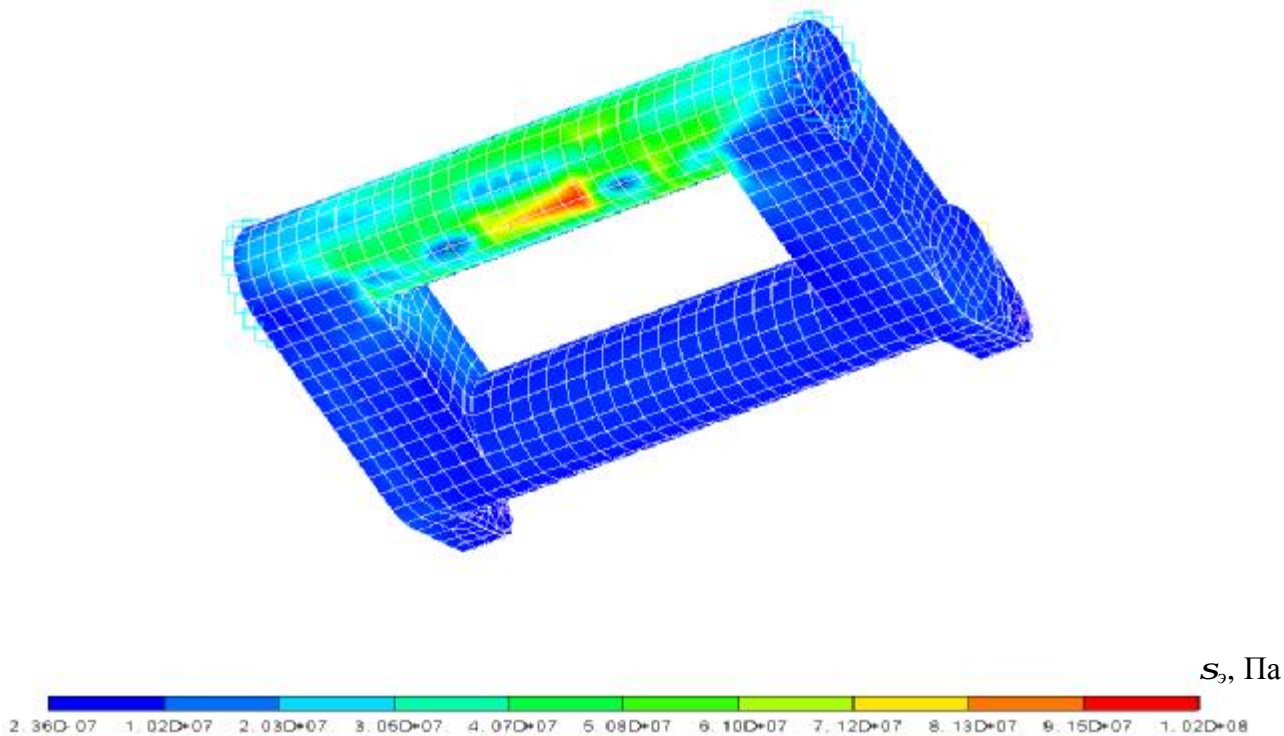


Рисунок 4.3 – Напряженное состояние

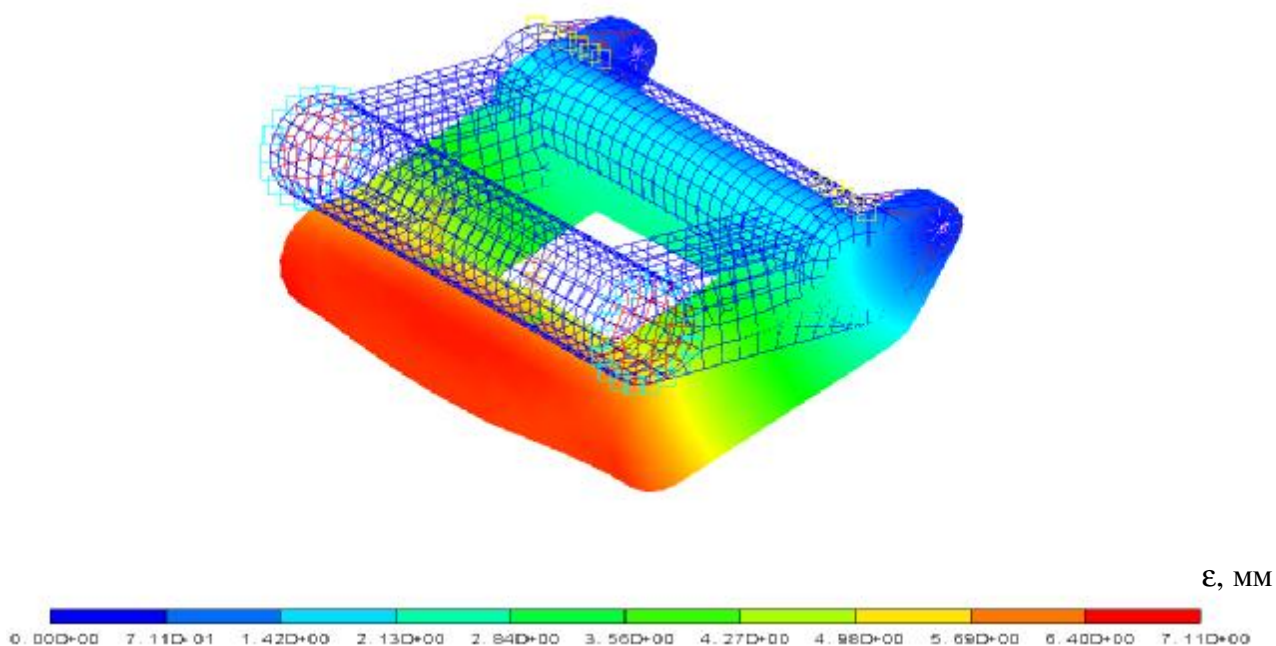


Рисунок 4.4 – Деформированное состояние

5 Заключение

Выполненные оценки вибрационной прочности корпуса судна проекта ПКС-40 «Сура» показали отсутствие резонансов общей вибрации корпуса и достаточные запасы по частотам вибрации корпуса и его элементов набора по требованиям Правил РРР.