

Нижегородский государственный технический университет

им. Р. Е. Алексева

Институт транспортных систем

Кафедра «Аэро-гидродинамика, прочность машин
и сопротивление материалов»

Курсовая работа

по дисциплине «Конструкционная прочность»

«Расчет общей прочности корпуса судна»

Выполнил: студент гр. _____

Проверил: _____

Нижний Новгород

20__ г.

| | | | | |
|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. | Име. № дубл. | Подп. и дата |
|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|

| | | | | |
|------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
|------|------|----------|-------|------|

КР-НГТУ-000000-ХХ-ДП-00-00

Лист

1

Задание

Для судна, спроектированного в рамках курса «Тонкостенные конструкции», используя данные прототипа, рассчитать статьи масс и распределить их по длине судна. Рассмотреть два расчётных случая: в балласте со 100% запасов и в грузу с 10% запасов. Произвести удифферентовку с использованием программного обеспечения «Udif.exe», оценить соответствие невязок и осадок нормативным, определить опасный случай нагружения. Выполнить оценку общей прочности корпуса судна по допускаемым напряжениям, а также оценку прочности по предельному моменту. Оценить местную прочность заданных связей.

Исходные данные

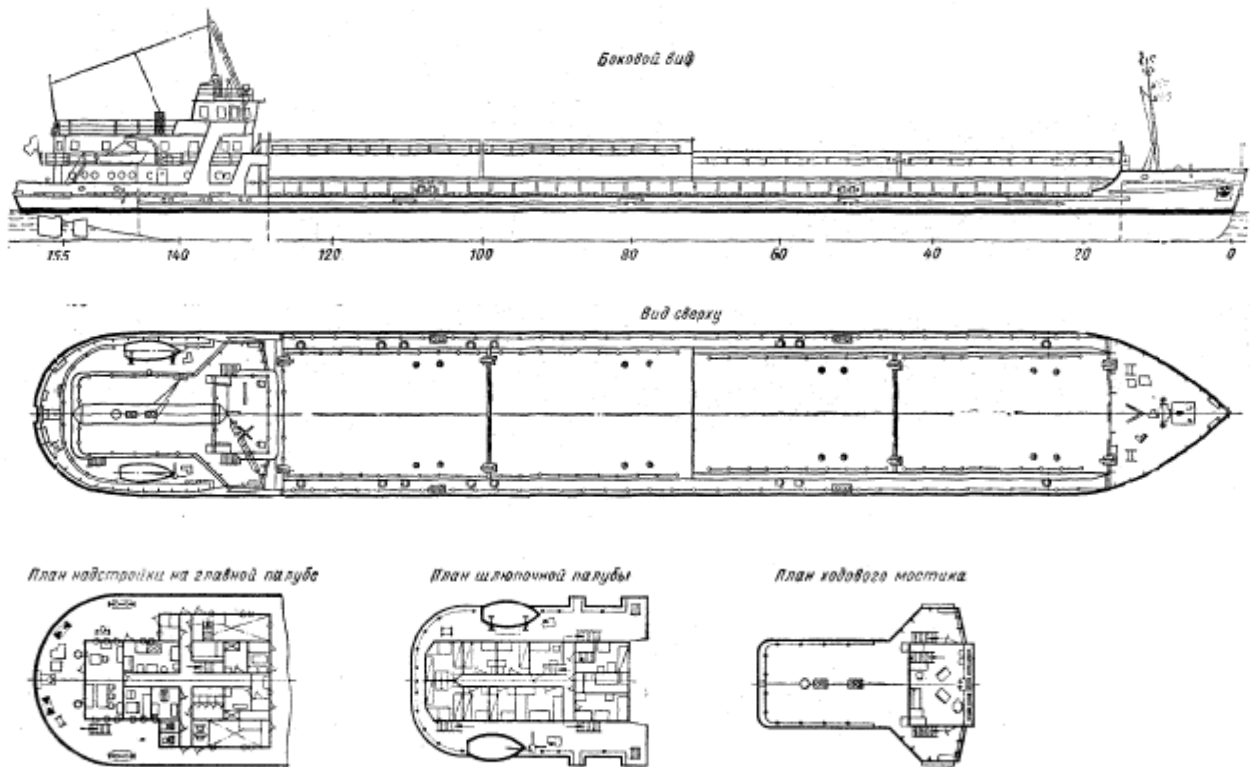


Рисунок 1 – Конструктивный чертёж судна

Тип судна

Однопалубный сухогрузный двухвинтовой теплоход грузоподъемностью 1800 т. мощностью 1156 э.л.с. Класс "О".

Назначение судна

Перевозка генеральных, сыпучих, навалочных грузов, контейнеров и промышленного оборудования.

| | | | | |
|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. | Име. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | | | |
|------|------|----------|-------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |
| | | | | |

КР-НГТУ-000000-ХХ-ДП-00-00

Таблица 1 – Характеристики судна и прототипа

| Основные характеристики | Проект | Прототип |
|-----------------------------|------------|----------|
| Класс РРР | О | О |
| Длина судна L , м | 96 | 96 |
| Ширина судна B , м | 12,5 | 12,5 |
| Высота борта H , м | 3,4 | 3,4 |
| Грузоподъемность, т | 1800 | 1800 |
| Мощность N , кВт | 2×495 | 2×495 |
| Скорость судна V , км/ч | 19,7 | 19,7 |
| Автономность n_A , сутки | 15 | 15 |
| Экипаж $n_{Э}$, человек | 11 | 11 |
| Осадка средняя T_C , м | (2,44)* | 2,44 |
| Водоизмещение в грузу, т | (2434,64)* | 2463 |
| Водоизмещение в балласте, т | (1038,75)* | 606 |
| Коэффициент k_K | - | 0,133 |
| Коэффициент k_M | - | 0,075 |

* данные, полученные при выполнении расчетов в п.п.2-4.

| | | | | | | |
|----------------------------|--------------|------------|--------------|--------------|--------------|------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. | Име. № дубл. | Подп. и дата | Име. № подл. | Лист |
| | | | | | | |
| КР-НГТУ-000000-ХХ-ДП-00-00 | | | | | | 3 |

2 Определение статей масс судна.

2.1 Определение массы оборудованного корпуса [1, с.6].

$$m'_K = k_K \cdot LBH.$$

$$m'_K = 0,133 \cdot 96 \cdot 12,5 \cdot 3,4 = 542,64 \text{ (т)}.$$

2.2 Определение массы надстройки [1, с.7].

$$m_H = 0,13V_H.$$

$V_H = 19,9 \cdot 12,5 \cdot 8,26 = 2054,675 \text{ (м}^3\text{)}$ - объём кормовой надстройки рассчитанный по чертежу общего расположения.

$$m_H = 0,13 \cdot 2054,675 = 277,769 \text{ (т)}.$$

2.3 Масса корпуса без надстройки.

$$m''_K = m'_K - m_H;$$

$$m''_K = 542,64 - 267,108 = 264,871 \text{ (т)}.$$

2.4 Определение массы команды и пассажиров с багажом [1, с.9].

$$m_{K\Pi} = (0,1 \div 0,15)m_{\text{Э}} = 0,125 \cdot n_{\text{Э}};$$

$$m_{K\Pi} = 0,125 \cdot 11 = 1,375 \text{ (т)}.$$

2.5 Определение массы провизии и питьевой воды [1, с.10].

$$m_{MB} = n_{\text{Э}} n_A r_B \cdot 10^{-3};$$

$$r_B = 30 \left(\frac{\text{л}}{\text{чел}} \cdot \text{сут} \right);$$
 - суточная норма запасов воды на 1 человека

$$m_{MB} = 11 \cdot 15 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 4,95 \text{ (т)};$$

$$m_{\Pi} = n_{\text{Э}} n_A r_{\Pi} \cdot 10^{-3};$$

$$r_{\Pi} = 4 \left(\frac{\text{кг}}{\text{чел}} \cdot \text{сут} \right);$$
 - суточная норма запасов продуктов на одного человека.

$$m_{\Pi} = 11 \cdot 15 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,66 \text{ (т)};$$

$$m_{\text{TB}} = m_{MB} + m_{\Pi} = 4,95 + 0,66 = 5,61 \text{ (т)};$$

2.6 Определение массы механизмов [1, с. 8].

$$m_M = k_M N;$$

$$m_M = 0,075 \cdot 425 \cdot 2 = 63,75 \text{ (т)}.$$

2.7 Определение топлива, воды, масла [1, с.10].

$$m_{\text{TBM}} = m_T + m'_B + m'_M;$$

$$m_T = k q_T n_A \cdot 24N \cdot 10^{-6};$$

$k = 1$ - коэффициент запаса для судов внутреннего плавания;

$$q_T = 258 \left(\frac{\text{г}}{\text{кВт}} \cdot \text{час} \right);$$

$$m_T = 1 \cdot 258 \cdot 15 \cdot 24 \cdot 495 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 78,948 \text{ (т)};$$

| | | | | | | |
|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|----------------------------|------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. | Име. № дубл. | Подп. и дата | КР-НГТУ-000000-ХХ-ДП-00-00 | Лист |
| | | | | | | 4 |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | | |

$$m'_B = 0,05m_T;$$

$$m'_B = 0,05 \cdot 78,948 = 3,947 \text{ (т);}$$

$$m'_M = 0,05 \cdot m_T;$$

$$m'_M = 0,05 \cdot 78,948 = 3,947 \text{ (т);}$$

$$m_{ТВМ} = 78,948 + 3,947 + 3,947 = 86,843 \text{ (т).}$$

2.8 Определение массы запаса водоизмещения.

$$m_{ЗВ} = 3\% m_{ПОР};$$

$$m_{ПОР} = \frac{m'_K + m_M}{0,97};$$

$$m_{ПОР} = \frac{542,64 + 63,75}{0,97} = 625,144 \text{ (т);}$$

$$m_{ЗВ} = 0,03 \cdot 625,144 = 18,754 \text{ (т).}$$

2.9 Расчёт массы балласта [1, с. 9].

$$\frac{m_{БП}}{m} = 1 - \frac{\alpha}{\delta} \left(1 - \frac{T_{СБ}}{T_{ГР}} \right) + 0,5 \left(\frac{\alpha}{\delta} - 1 \right) \left(1 - \frac{T_{СБ}}{T_{ГР}} \right)^2;$$

$m_{БП}$ - массовое водоизмещение в балластном переходе;

$m = 2463$ (т) – водоизмещение в грузу;

$\alpha = 0,935$ – коэффициент полноты ватерлинии;

$\delta = 0,996$ – коэффициент полноты водоизмещения;

$T_{БК} = 1,1 D_B$;

$D_B = 1,2$ (м) - диаметр винта;

$T_{БК} = 1,1 \cdot 1,2 = 1,32$ (м);

$T_{БН} = 1,5\% L$;

$T_{БН} = 0,015 \cdot 96 = 1,44$ (м);

Поэтому выбираем

$T_{СБ} = 1,38$ (м) - осадка в балласте;

$T_{ГР} = 2,44$ (м) - осадка в грузу;

$m_B = A \cdot m$;

$$A = 1 - \frac{0,935}{0,996} \left(1 - \frac{0,88}{2,44} \right) + 0,5 \left(\frac{0,935}{0,996} - 1 \right) \left(1 - \frac{0,88}{2,44} \right)^2 = 0,387;$$

$m_{БП} = 0,387 \cdot 2463 = 953,908$ (т);

$m_B = m_{БП} - m_{ПОР}$;

$m_B = 953,908 - 625,144 = 328,763$ (т).

| | | | | |
|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Разм. инст. | Име. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

3 Распределение статей масс по длине судна.

3.1 Судно в балласт с 100% запасов

а) $\bar{m}_{3B} = \frac{m_{3B}}{L};$

$$\bar{m}_{3B} = \frac{18,754}{96} = 0,195 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

б) $m''_{К}$ - по диаграмме Байлса;

$$\bar{a} = 0,72 \frac{m''_{К}}{L}; \bar{a} = 0,72 \cdot \frac{264,871}{96} = 1,987 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

$$\bar{b} = 1,17 \frac{m''_{К}}{L}; \bar{b} = 1,17 \cdot \frac{264,871}{96} = 3,228 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

$$\bar{c} = 0,60 \frac{m''_{К}}{L}; \bar{c} = 0,60 \cdot \frac{264,871}{96} = 1,655 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right).$$

в) m_H - масса надстройки;

$$\bar{m}_H = \frac{m_H}{l_H};$$

$$\bar{m}_H = \frac{277,769}{19,9} = 13,422 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

г) m_M - масса механизмов;

$$\bar{m}_M = \frac{m_M}{l_{MO}};$$

$$\bar{m}_M = \frac{63,75}{10,05} = 6,34 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

д) $m_{ПВ}$ - масса провизии и воды;

$$\bar{m}_{ПВ} = \frac{m_{ПВ}}{l_H};$$

$$\bar{m}_{ПВ} = \frac{5,61}{20,11} = 0,279 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

е) $m_{ТВМ} - l_{МС};$

$$\bar{m}_{ТВМ} = \frac{m_{ТВМ}}{l_{MO}};$$

$$\bar{m}_{ТВМ} = \frac{86,843}{10,05} = 8,641 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

ж) $m_{КП} - l_H;$

$$\bar{m}_{КП} = \frac{m_{КП}}{l_H};$$

$$\bar{m}_{КП} = \frac{1,375}{20,11} = 0,068 \left(\frac{\text{Т}}{\text{М}} \right);$$

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Разм. и инв. | Име. № дубл. | Подп. и дата |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|

| | | | | |
|------|------|----------|------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Дата | Дата |
|------|------|----------|------|------|

$$з) m_B - l_B;$$

$$\bar{m}_B = \frac{m_B}{l_B};$$

$$\bar{m}_B = \frac{328,763}{14,4} = 22,8 \left(\frac{T}{M} \right);$$

3.2 Судно с 10% запасов.

Все массы соответствуют найденным в п. 3.1, за исключением запасов, которые равны 10% от пункта 3.1.

$$а) m'_{ТБ} = 0,1m_{ТБ};$$

$$m'_{ТБ} = 0,1 \cdot 5,61 = 0,561 (T);$$

$$\bar{m}'_{ТБ} = \frac{m'_{ТБ}}{l_H};$$

$$\bar{m}'_{ТБ} = \frac{0,561}{20,11} = 0,028 \left(\frac{T}{M} \right);$$

$$m'_{ТБМ} = 0,1m_{ТБМ};$$

$$m'_{ТБМ} = 0,1 \cdot 86,843 = 8,684 (T);$$

$$\bar{m}'_{ТБМ} = \frac{m'_{ТБМ}}{l_{MO}};$$

$$\bar{m}'_{ТБМ} = \frac{8,684}{10,05} = 0,864 \left(\frac{T}{M} \right);$$

$$б) m_{ТР} = 1800 (T) - \text{по ТЗ};$$

$$\bar{m}_{ТР} = \frac{m_{ТР}}{l_{ТР}} - \text{в пределах цилиндрической части.}$$

$$\bar{m}_{ТР} = \frac{1800}{67,19} = 26,79 \left(\frac{T}{M} \right).$$

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Име. № подл. | Подп. и дата | Разм. и инд. | Име. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |
| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата |

4 Удифферентовка.

Исходными данными для удифферентовки являются найденные выше массы судна и таблица ординат теоретических шпангоутов.

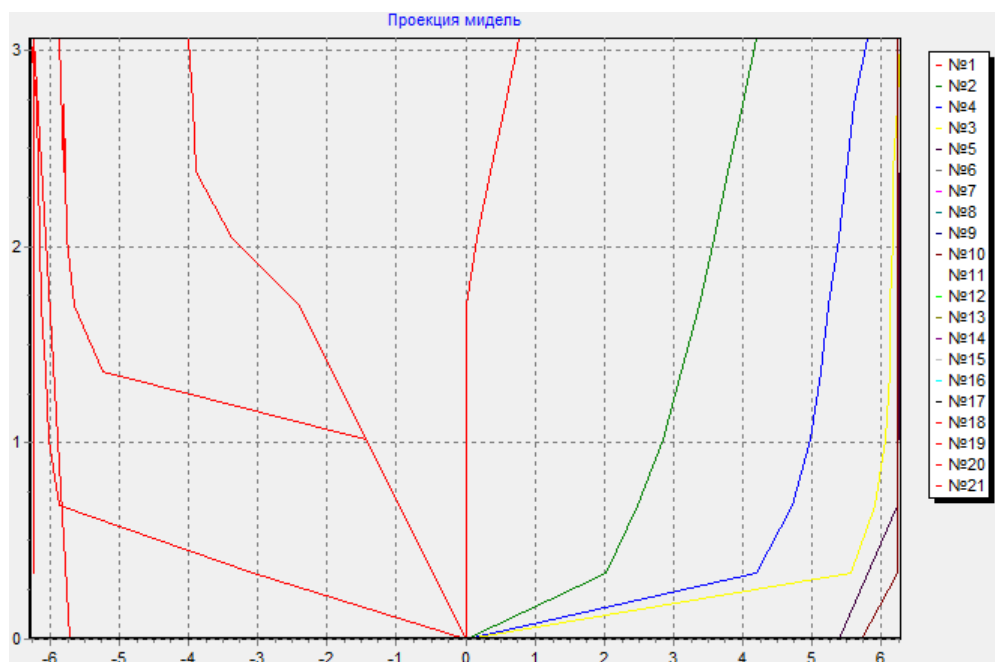


Рисунок 2 – Теоретические шпангоуты (из программы udif.exe)

Таблица 2 – Ординаты теоретических шпангоутов

| Теоретические шп | Ватерлинии | | | | | | | | | |
|------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 шп | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,156 | 0,364 | 0,572 | 0,780 |
| 1 шп | 0 | 2,028 | 2,496 | 2,860 | 3,120 | 3,38 | 3,588 | 3,796 | 4,004 | 4,212 |
| 2 шп | 0 | 4,212 | 4,732 | 4,992 | 5,148 | 5,252 | 5,408 | 5,512 | 5,616 | 5,824 |
| 3 шп | 0 | 5,564 | 5,928 | 6,084 | 6,136 | 6,136 | 6,188 | 6,188 | 6,24 | 6,292 |
| 4 шп | 5,408 | 6,292 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 5 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 6 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 7 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 8 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 9 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 10 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 11 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 12 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 13 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 14 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 15 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 16 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 17 шп | 5,72 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 | 6,25 |
| 18 шп | 0 | 3,068 | 5,876 | 6,032 | 6,084 | 6,136 | 6,162 | 6,188 | 6,214 | 6,292 |
| 19 шп | 0 | 0 | 0 | 1,456 | 5,252 | 5,668 | 5,772 | 5,824 | 5,824 | 5,876 |
| 20 шп | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,392 | 3,38 | 3,9 | 3,952 | 4,004 |

КР-НГТУ-000000-ХХ-ДП-00-00

Лист

8

Изм. Лист № докум. Подп. Дата

| | | | | |
|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взам. инв. | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | | | |
|------|------|----------|------|
| Изм. | Лист | № докум. | Лист |
| | | | |
| | | | |

Таблица 3 – Расчёт весовой нагрузки судна в балласте 100%

| № статей | Статьи | Масса статей | 20-19 | 19-18 | 18-17 | 17-16 | 16-15 | 15-14 | 14-13 | 13-12 | 12-11 | 11-10 | 10-9 | 9-8 | 8-7 | 7-6 | 6-5 | 5-4 | 4-3 | 3-2 | 2-1 | 1-0 |
|----------|-----------------------------|--------------|--------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | Корпус судна без надстройки | 264,84 | 9,53 | 10,92 | 11,40 | 12,42 | 13,12 | 14,62 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 15,50 | 14,44 | 13,12 | 12,75 | 10,12 | 9,27 | 8,94 |
| 2 | Механизм | 63,75 | 0 | 0 | 31,875 | 31,875 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Надстройка | 277,77 | 46,7 | 68,74 | 68,74 | 93,59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Запас водоизмещения | 18,75 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |
| 5 | Масса провизии и воды | 5,61 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Топливо, вода, масло | 86,84 | 21,7 | 21,7 | 21,7 | 21,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Команда и пассажиры | 1,38 | 0,344 | 0,344 | 0,344 | 0,344 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Балласт | 328,76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 120 | 100 |
| Суммы | | 1038,75 | 80,614 | 104,044 | 136,399 | 162,269 | 14,06 | 15,56 | 16,44 | 16,44 | 16,44 | 16,44 | 16,44 | 16,44 | 16,44 | 16,44 | 15,38 | 14,06 | 13,69 | 111,06 | 130,21 | 109,88 |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

| | | | | |
|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взвешивание | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № док-м. | |
| Лист | |
| Лист | |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

| | |
|------|----|
| Лист | 10 |
|------|----|

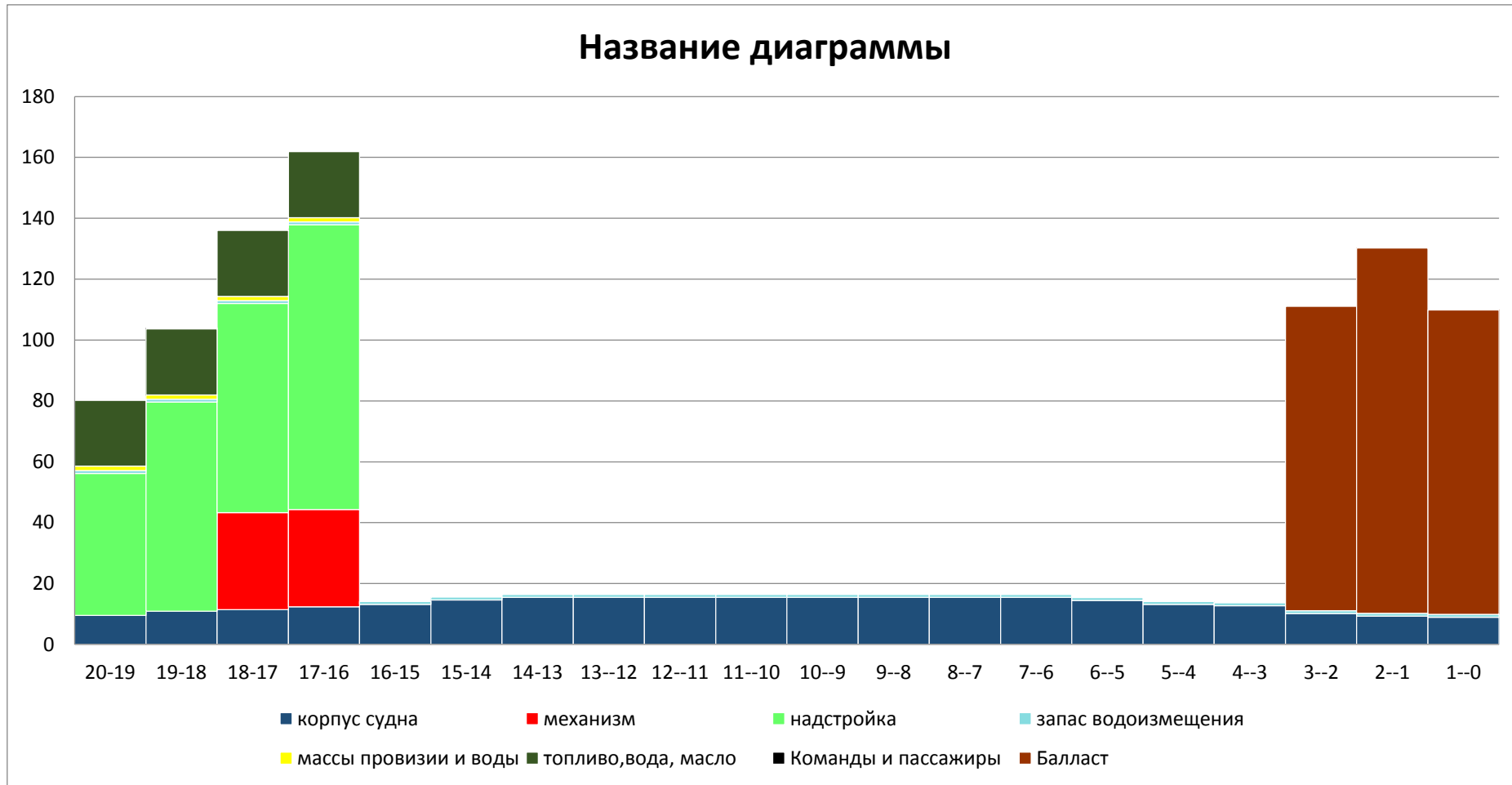


Рисунок 3 – Расчёт весовой нагрузки судна в балласте с 100% запаса

| | | | | |
|--------------|--------------|---------|-------------|-------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | ВЭМ инв | Инв.№ дубл. | Подп и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № док-м. | |
| Л | |
| Л | |

Таблица 4 – Расчёт весовой нагрузки судна в грузу с 10% запаса

| № статей | Статьи | Масса статей | 20-19 | 19-18 | 18-17 | 17-16 | 16-15 | 15-14 | 14-13 | 13-12 | 12-11 | 11-10 | 10-9 | 9-8 | 8-7 | 7-6 | 6-5 | 5-4 | 4-3 | 3-2 | 2-1 | 1-0 |
|----------|------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 1 | Корпус судна | 264,87 | 9,53 | 10,92 | 11,4 | 12,42 | 13,12 | 14,62 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 14,44 | 13,12 | 12,75 | 10,12 | 9,27 | 8,94 |
| 2 | Механизм | 63,76 | 0 | 0 | 31,88 | 31,88 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | Надстройка | 277,77 | 46,7 | 68,74 | 68,74 | 93,59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Запас водоизмещения | 18,75 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,94 |
| 5 | Масса провизии и воды | 0,56 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Топливо, вода, масло | 8,68 | 2,17 | 2,17 | 2,17 | 2,17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Команда и пассажиры | 1,38 | 0,344 | 0,344 | 0,344 | 0,344 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Груз | 1800 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 128,5 | 0 | 0 |
| | Суммы | 2434,69 | 59,824 | 83,254 | 115,609 | 141,479 | 142,56 | 144,06 | 144,94 | 144,94 | 144,94 | 144,94 | 144,94 | 144,94 | 144,94 | 144,94 | 143,88 | 142,56 | 142,19 | 139,56 | 10,21 | 9,88 |
| | Факторы статических моментов | -1823,8 | -1136,66 | -1415,32 | -1734,14 | -1839,23 | -1568,16 | -1296,54 | -1014,58 | -724,7 | -434,82 | -144,94 | 144,94 | 434,82 | 724,7 | 1014,58 | 1294,92 | 1568,16 | 1848,47 | 2093,4 | 173,57 | 187,72 |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

| | | | | |
|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Взв. инв. | Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | | | | |

| | |
|----------|--|
| Изм. | |
| Лист | |
| № док.м. | |
| Лист | |
| Лист | |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

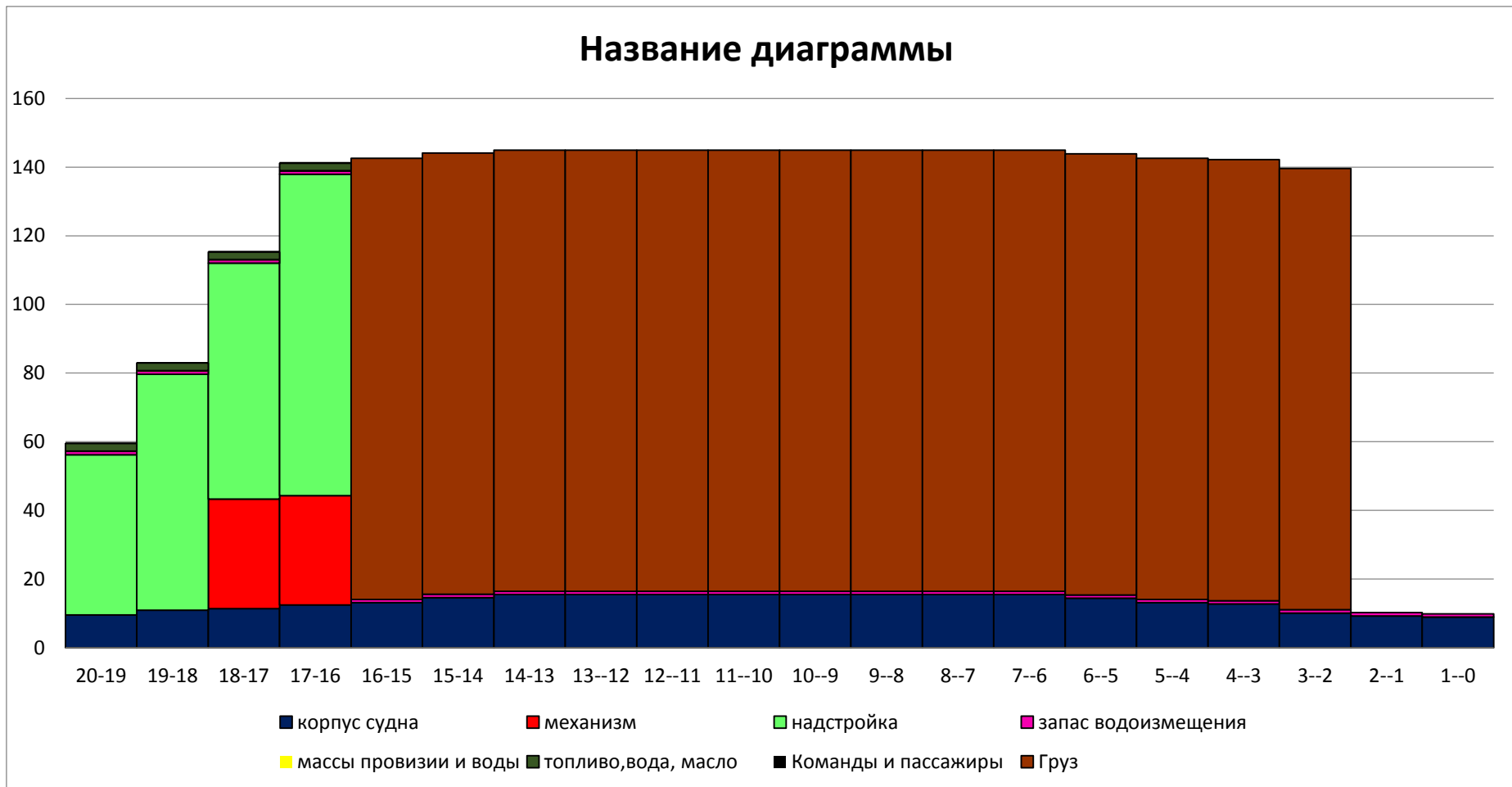


Рисунок 4 – Расчёт весовой нагрузки судна в грузу с 10% запаса

Таблица 5 - Результаты удифферентовки в балласте со 100% запаса

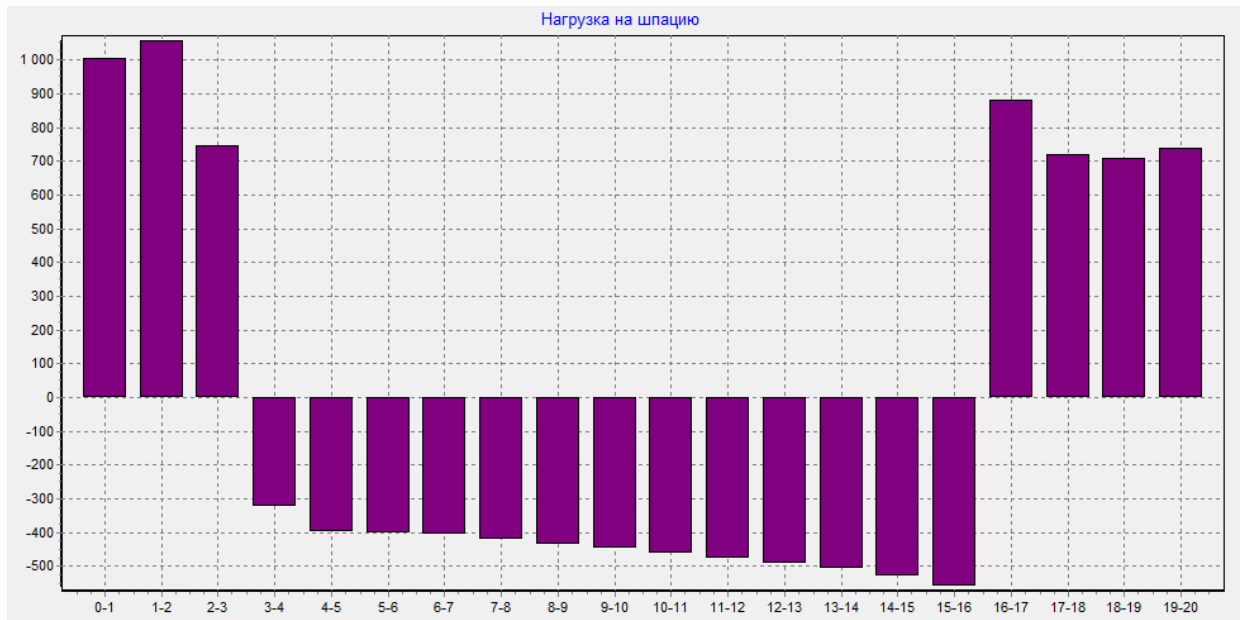
| Нагрузка на шпацию | | Перерезывающая сила | | Изгибающий момент | |
|--------------------|---------|---------------------|----------|-------------------|----------|
| 0-1 | 1005,38 | 0 шп | 0,00 | 0 шп | 0,00 |
| 1-2 | 1057,35 | 1 шп | 1005,41 | 1 шп | 2416,87 |
| 2-3 | 746,43 | 2 шп | 2062,78 | 2 шп | 9784,28 |
| 3-4 | -324,12 | 3 шп | 2809,23 | 3 шп | 21480,75 |
| 4-5 | -396,81 | 4 шп | 2485,14 | 4 шп | 34190,75 |
| 5-6 | -400,25 | 5 шп | 2088,37 | 5 шп | 45170,54 |
| 6-7 | -404,42 | 6 шп | 1688,14 | 6 шп | 54237,38 |
| 7-8 | -418,99 | 7 шп | 1283,75 | 7 шп | 61373,02 |
| 8-9 | -433,56 | 8 шп | 864,78 | 8 шп | 66532,46 |
| 9-10 | -448,13 | 9 шп | 431,25 | 9 шп | 69645,78 |
| 10-11 | -462,70 | 10 шп | -16,85 | 10 шп | 70643,05 |
| 11-12 | -477,27 | 11 шп | -479,52 | 11 шп | 69454,34 |
| 12-13 | -491,83 | 12 шп | -956,75 | 12 шп | 66009,72 |
| 13-14 | -506,40 | 13 шп | -1448,56 | 13 шп | 60239,26 |
| 14-15 | -529,61 | 14 шп | -1954,94 | 14 шп | 52073,03 |
| 15-16 | -558,89 | 15 шп | -2484,51 | 15 шп | 41420,37 |
| 16-17 | 879,98 | 16 шп | -3043,37 | 16 шп | 28155,33 |
| 17-18 | 718,75 | 17 шп | -2163,37 | 17 шп | 15660,92 |
| 18-19 | 707,20 | 18 шп | -1444,58 | 18 шп | 7003,47 |
| 19-20 | 737,33 | 19 шп | -737,36 | 19 шп | 1768,30 |
| | | 20 шп | 0,00 | 20 шп | 0,00 |

| | | | | |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Име. № подп | Подп. и дата | Име. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

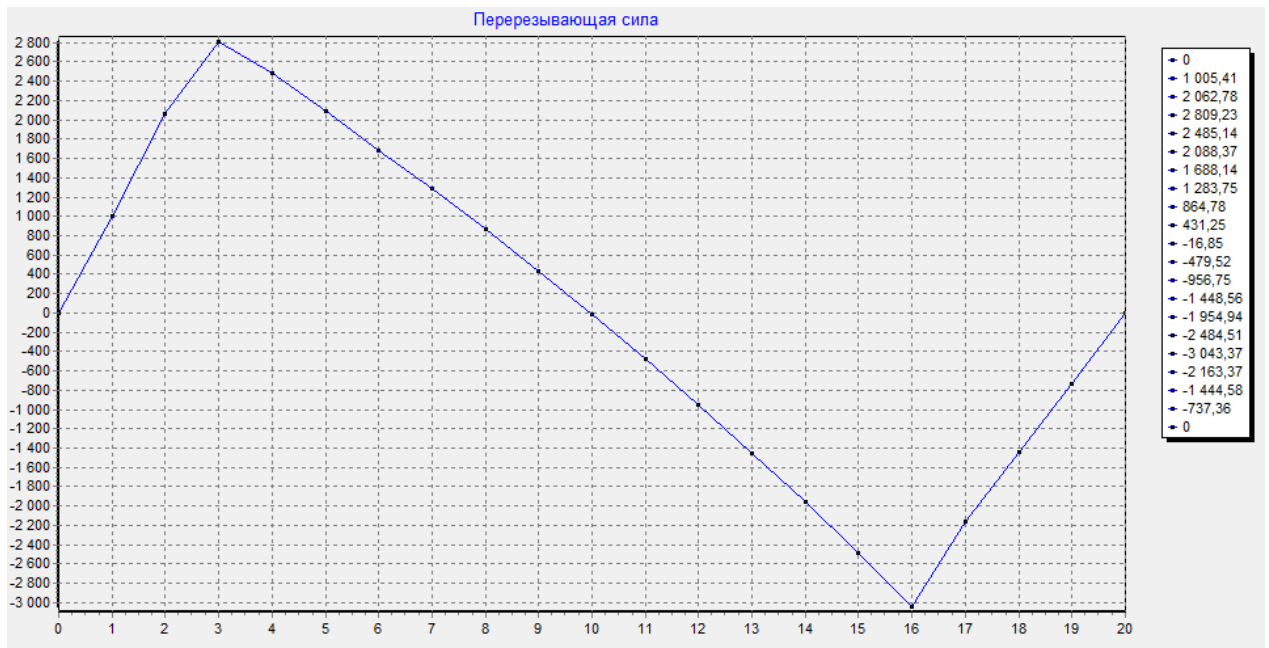
| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
| | | | | |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

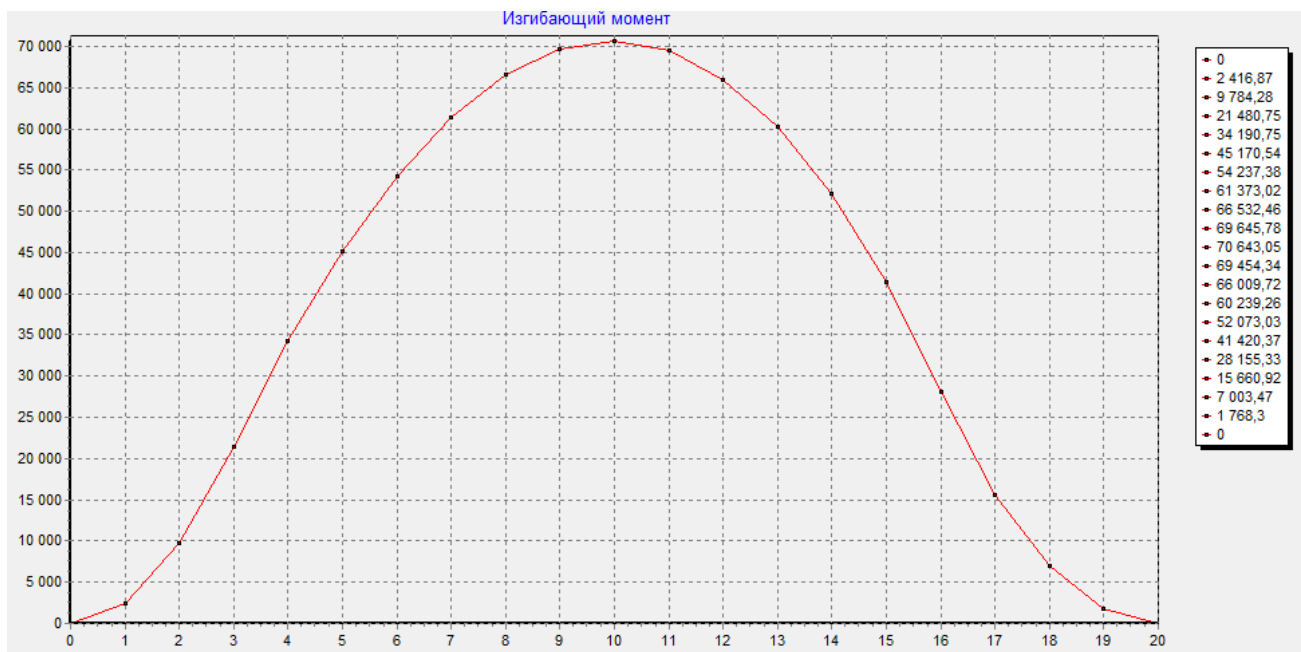
а)



б)



в)



| | |
|--------------|--------------|
| Инв. № подл | Подп. и дата |
| | Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. | Подп. и дата |
| | Инв. № инв. |
| Инв. № подл | Подп. и дата |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Рисунок 5 – Результаты удифферентовки в балласте со 100% запасов
 а – нагрузка на шпацию; б – перерезывающая сила; в – изгибающий момент

Водоизмещение по ГВЛ, куб. м. $V = 1038,75$

Абцисса ЦТ, м $X_G = -3,03$

Абцисса ЦВ, м $X_C = -3,03$

Абцисса ЦТ ГВЛ, м $X_F = -10,35$

Большой метацентрический радиус, м $R = 2864,17$

Площадь ГВЛ, кв. м $S = 1044,86$

Осадка носом, м $T_H = 1,19 \leq [T_H] = 1,44$ - Удовлетворяет условию

Осадка кормой, м $T_K = 1,00 \leq [T_K] = 1,32$ - Удовлетворяет условию

Осадка средняя, м $T_{CP} = 1,07 \leq [T_{CP}] = 1,38$ - Удовлетворяет условию

Невязка по перерезывающей силе, κH -0,56

$0,56 < 0,03 \cdot N_{\max} \Rightarrow 0,56 < 0,03 \cdot 3043,37 = 91,3$ - Удовлетворяет условию [4, п.

2.2.36].

Невязка по изгибающему моменту $\kappa H \cdot м$ -33,05

$33,05 < 0,03 \cdot M_{\max} \Rightarrow 33,05 < 0,03 \cdot 70643,05 = 2119,29$ Удовлетворяет усло-

вию[4, п. 2.2.36].

Таблица 6 - Результаты удифферентовки в грузу с 10% запаса

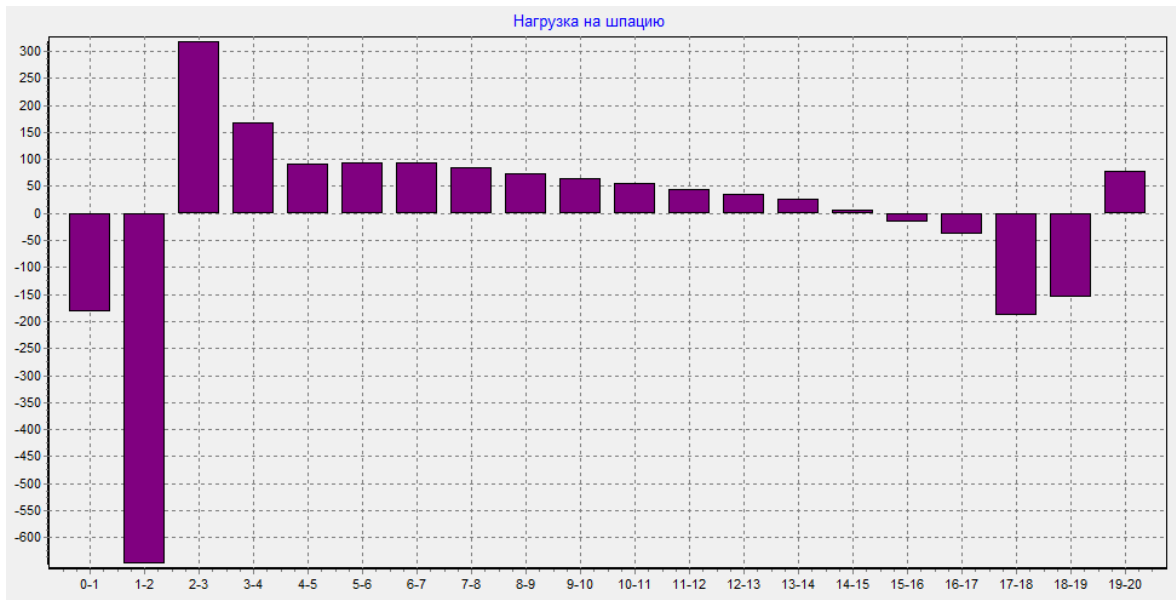
| Нагрузка на шпацию | | Перерезывающая сила | | Изгибающий момент | |
|--------------------|---------|---------------------|---------|-------------------|-----------|
| 0-1 | -181,32 | 0 шп | 0,00 | 0 шп | 0,00 |
| 1-2 | -648,65 | 1 шп | -181,27 | 1 шп | -398,10 |
| 2-3 | 317,72 | 2 шп | -829,86 | 2 шп | -2788,12 |
| 3-4 | 166,56 | 3 шп | -512,09 | 3 шп | -5972,37 |
| 4-5 | 91,24 | 4 шп | -345,48 | 4 шп | -7994,35 |
| 5-6 | 92,64 | 5 шп | -254,19 | 5 шп | -9397,62 |
| 6-7 | 93,33 | 6 шп | -161,50 | 6 шп | -10359,58 |
| 7-8 | 83,61 | 7 шп | -68,12 | 7 шп | -10875,21 |
| 8-9 | 73,90 | 8 шп | 15,54 | 8 шп | -10966,19 |
| 9-10 | 64,18 | 9 шп | 89,49 | 9 шп | -10679,16 |
| 10-11 | 54,46 | 10 шп | 153,72 | 10 шп | -10060,75 |
| 11-12 | 44,75 | 11 шп | 208,23 | 11 шп | -9157,59 |
| 12-13 | 35,03 | 12 шп | 253,03 | 12 шп | -8016,32 |
| 13-14 | 25,32 | 13 шп | 288,12 | 13 шп | -6683,58 |
| 14-15 | 6,97 | 14 шп | 313,49 | 14 шп | -5206,00 |
| 15-16 | -17,46 | 15 шп | 320,51 | 15 шп | -3650,93 |
| 16-17 | -38,27 | 16 шп | 303,10 | 16 шп | -2121,05 |
| 17-18 | -188,50 | 17 шп | 264,87 | 17 шп | -724,93 |
| 18-19 | -154,63 | 18 шп | 76,43 | 18 шп | 126,95 |
| 19-20 | 78,10 | 19 шп | -78,15 | 19 шп | 155,31 |
| | | 20 шп | 0,00 | 20 шп | 0,00 |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

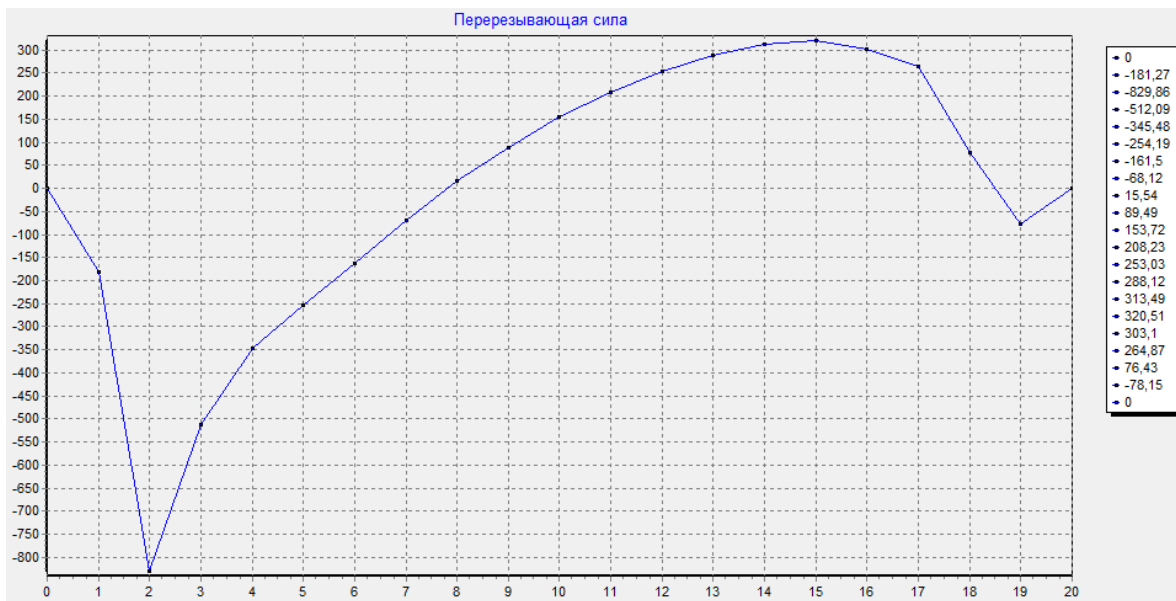
Лист

15

а)



б)



в)

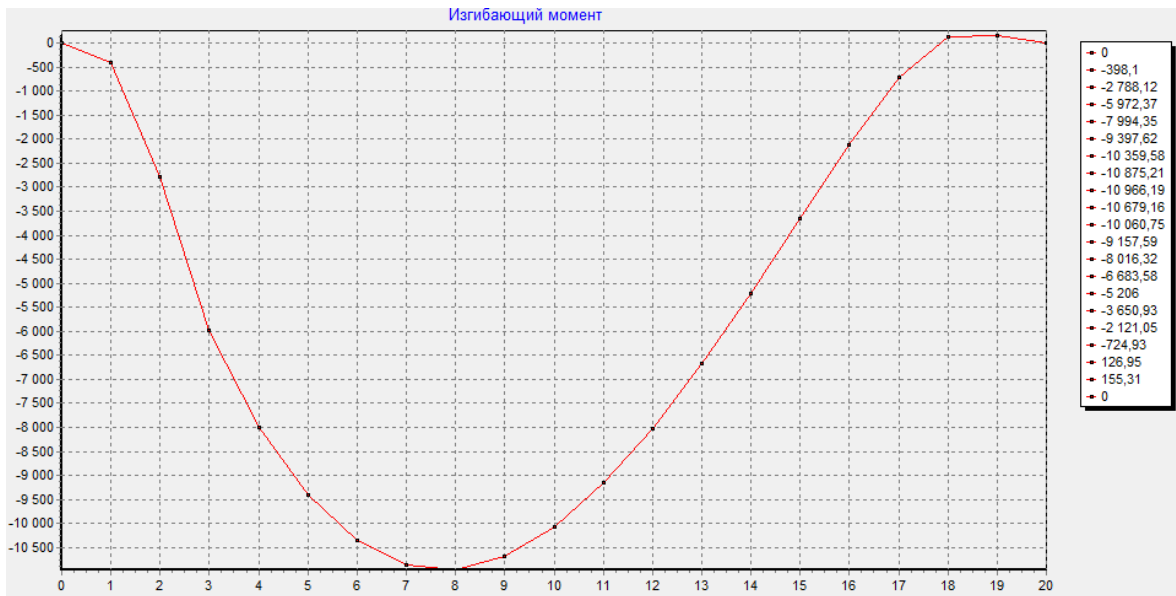


Рисунок 6—Результаты удифферентовки в грузу с 10% запасов
 а – нагрузка на шпацию; б – перерезывающая сила; в – изгибающий момент

| | |
|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата |
| Инв. № дубл. | Взам. инв. № |
| Инв. № подл. | Подп. и дата |
| Инв. № подл. | Подп. и дата |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Водоизмещение по ГВЛ, куб. м. $V = 2434,64$

Абцисса ЦТ, м $X_G = -1,79$

Абцисса ЦВ, м $X_C = -1,78$

Абцисса ЦТ ГВЛ, м $X_F = -12,20$

Большойметацентрический радиус, м $R = 1391,67$

Площадь ГВЛ, кв. м $S = 1122,70$

Осадка носом, м $T_H = 2,44 \leq [T_H] = 2,44$ - Удовлетворяет условию

Осадка кормой, м $T_K = 2,16 \leq [T_K] = 2,44$ - Удовлетворяет условию

Осадка средняя, м $T_{CP} = 2,34 \leq [T_{CP}] = 2,44$ - Удовлетворяет условию

Невязка по перерезывающей силе, κH -1,03

$1,03 < 0,03 \cdot N_{\max} \Rightarrow 1,03 < 0,03 \cdot 829,86 = 24,89$ - Удовлетворяет условию [4, п. 2.2.36].

Невязка по изгибающему моменту $\kappa H \cdot m$ -308,83

$308,83 < 0,03 \cdot M_{\max} \Rightarrow 308,83 < 0,03 \cdot 10966,19 = 328,98$ Удовлетворяет условию [4, п. 2.2.36].

5. Определение расчётного случая

В процессе эксплуатации судна возможно изменение его нагрузки за счёт изменения количества и положения перевозимого груза, топлива, масла, питьевой воды, продуктов и т.д.

После проведения операции удифферентовки по значениям изгибающих моментов можно определить расчётный случай для заданного судна. Очевидно, при определении величин изгибающего момента необходимо выбирать наиболее неблагоприятный случай расположения грузов. В данном случае значения моментов и перерезывающих сил:

$$M_{\text{бал}} = 70643,05 \text{ кНм} \quad N_{\text{бал}} = 3043,37 \text{ кН}$$

$$M_{\text{гр}} = 10966,19 \text{ кНм} \quad N_{\text{гр}} = 829,86 \text{ кН}$$

Таким образом, наиболее опасный случай – случай судна в балласте со 100% запаса ТВМ.

Заключение

В работе произведен расчет статей масс судна на стадии его эскизного проектирования и распределение этих статей по длине корпуса по теоретическим шпациям. Расчет выполнен для случаев в балласте со 100% запасов и в грузу с 10% запасов. На основании полученных данных выполнена удифферентовка, по результатам которой определены осадки носом и кормой, результирующая нагрузка на судно, а также величины перерезывающих сил и изгибающих моментов для дальнейшей проверки общей прочности корпуса. Величины осадок и невязок не превышают значений, регламентированных Российским речным регистром.

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

17

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

5.1 Определение дополнительных изгибающих моментов и перерезывающих сил при движении судна на волнении

Согласно 2.2.10-1[2] требований РРР, дополнительный изгибающий момент равен:

$$M_{\text{дв}} = \pm(k_p \cdot M_B + M_y) = \pm(0,02 \cdot 20410 + 1707) = 2044 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

где M_B - изгибающий момент, вызванный непосредственным действием волнения (волновой изгибающий момент);

k_p - коэффициент, учитывающий влияние волновой вибрации;

M_y - изгибающий момент, вызванный ударом волн в носовую оконечность (ударный изгибающий момент).

Волновой изгибающий момент M_B кНм, определяется согласно 2.2.10-2 [2]

$$M_B = 0,255 \cdot \varepsilon \cdot k_\delta \cdot k_T \cdot k_B \cdot B \cdot L^2 \cdot h,$$

$$M_B = 0,255 \cdot 0,805 \cdot 0,994 \cdot 0,793 \cdot 0,548 \cdot 12,5 \cdot 96^2 \cdot 2 = 20410 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

где $h = 2$ м - высота волны, определяемая в РРР по табл. 2.1.2;

$\varepsilon = 0,805$ - коэффициент, определяемый в РРР по табл. 2.2.10-1;

Коэффициенты k_δ , k_T , k_B вычисляются по формулам, согласно 2.2.10-3,4,5 [2]:

$$k_\delta = \exp[-1,6 \cdot (1 - \delta)] = \exp[-1,6 \cdot (1 - 0,996)] = 0,994$$

$$k_T = \exp\{-1,14 \cdot T \cdot \delta / [\eta h \cdot (2\delta + 1)]\} = \exp\{-1,14 \cdot 1,07 \cdot 0,996 / [0,874 \cdot 2 \cdot (2 \cdot 0,996 + 1)]\} = 0,793$$

$$k_B = \{1 - \exp[-0,19 \cdot \delta \cdot B / (\eta h)]\} \cdot \eta h / (0,19\delta B) = \{1 - \exp[-0,19 \cdot 0,996 \cdot 12,5 / (0,874 \cdot 2)]\} \cdot 0,874 \cdot 2 / (0,19 \cdot 0,996 \cdot 12,5) = 0,548$$

где $\delta = 0,996$ - коэффициент полноты водоизмещения;

$\eta = 0,874$ - коэффициент принимаемый по РРР табл. 2.2.10-1 [2].

Коэффициент k_p рассчитывается согласно формуле 2.2.10-8 [2]:

$$k_p = \psi \{1 + \omega_k^2 / [\sigma^2 \cdot \sqrt{(1 - \omega_k^2 / \sigma^2)^2 + (2 \cdot k_\mu \cdot \omega_k / \sigma)^2}]\} = 1 \cdot \{(1 + 1,895^2) / [16,71^2 \cdot \sqrt{(1 - 1,895^2 / 16,71^2)^2 + (2 \cdot 0,118 \cdot 1,895 / 16,71)^2}]\} = 0,017$$

где ω_k - частота волны, наблюдаемая с движущегося судна, с^{-1} :

$$\omega_k = \omega_{cp} + 1,92 \cdot k_v \cdot v_{Tg} / L = 1,64 + 1,92 \cdot 0,647 \cdot 19,7 / 96 = 1,895$$

$\omega_{cp} = 1,64$ - частота волны, с^{-1} , определяется по РРР табл. 2.2.10-1 [2];

k_v - коэффициент, определяемый по формуле 2.2.10-12 [2]:

$$k_v = 1 - 19,9 \cdot h / L + 143 \cdot (h / L)^2 = 1 - 19,9 \cdot 2 / 96 + 143 \cdot (2 / 96)^2 = 0,647$$

$v_{Tg} = 19,7$ км/ч - скорость судна на тихой воде для расчетного случая нагрузки.

$$\sigma = k_s \sqrt{I / \{[1,2 + B / (3 \cdot T)] \cdot D \cdot L^3\}} = 123 \cdot 10^4 \cdot \sqrt{0,856 / \{[1,2 + 12,5 / (3 \cdot 1,07)] \cdot 1038,75 \cdot 96^3\}} = 16,63$$

$k_s = 123 \cdot 10^4$ - коэффициент для грузовых судов;

$D = 1038,75$ кН - водоизмещение судна, соответствующее расчетному случаю нагрузки.

$$k_\mu = 0,0612 \cdot (1 - 0,047 \cdot \sigma - 0,0077 \cdot \sigma^2) \geq 0$$

$$k_\mu = 0,0612 \cdot (1 - 0,047 \cdot 16,63 - 0,0077 \cdot 16,63^2) = 0,117;$$

ψ - коэффициент, определяемый согласно формуле 2.2.10-13 [2] при

$$0 \leq \omega_k / \sigma \leq 1,0;$$

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

18

Ине. № подл. Подп. и дата
Ине. № дубл. Подп. и дата
Взам. инв. №
Ине. № инв. №

Ли Изм. № докум. Подп. Да-

$$\psi = \cos[1,3 \cdot (\omega_k / \sigma)^2] = \cos[1,3 \cdot (1,895 / 16,71)^2] = 1$$

Ударный изгибающий момент M_y определяется по формуле 2.2.10-15 [2]:

$$M_y = k_y \cdot \varphi_1 \cdot D \cdot L = 0,012 \cdot 1 \cdot 1038,75 \cdot 96 = 1707 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

где $k_y = 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi_0 \cdot \sigma \cdot \nu_0 = 5,3 \cdot 10^{-4} \cdot 0,845 \cdot 13,532 \cdot 1,979 = 0,012$

φ_0 – коэффициент, согласно 2.2.10-18 [2] равный:

$$\varphi_0 = 1 - 1,03 \cdot b_0 + b_0^2 - 0,417 \cdot b_0^3 = 1 - 1,03 \cdot 0,164 + 0,164^2 - 0,417 \cdot 0,164^3 = 0,856$$

$$b_0 = 4,32 \cdot \sqrt{\delta \cdot (B/L) \cdot (T/L)} = 4,32 \cdot \sqrt{0,996 \cdot (12,5/96) \cdot (1,07/96)} = 0,164$$

величина ν_0 вычисляется по формуле 2.2.10-20 [2]:

$$\nu_0 = (0,336 + 0,104 \cdot k_v \cdot \nu_{T_e} / \sqrt{L}) \cdot \nu_1 + 0,024 \cdot k_v \cdot \nu_{T_e}$$

$$\nu_0 = (0,336 + 0,104 \cdot 0,647 \cdot 19,7 / \sqrt{96}) \cdot 4,14 + 0,024 \cdot 0,647 \cdot 19,7 = 2,258$$

$\nu_1 = 4,14$ м/с – величина, принимаемая по таблице 2.2.10-1 [2]

φ_1 – коэффициент, равный:

$$\varphi_1 = 1 \text{ при } T_n \leq T_n^o \Rightarrow 1,06 \text{ м} \leq 1,071 \text{ м}$$

T_n – осадка носом для расчетного случая нагрузки, м;

T_n^o – «пороговая» осадка носом, согласно 2.2.10-17 [2] равная, м:

$$T_n^o = (0,68 + 0,21 \cdot k_v \cdot \nu_{T_e} / \sqrt{L}) \cdot \nu_1 + 0,024 \cdot k_v \cdot \nu_{T_e} = (0,68 + 0,21 \cdot 0,647 \cdot 19,7 / \sqrt{96}) \cdot 4,14 + 0,024 \cdot 0,647 \cdot 19,7 = 1,719 \text{ м}$$

Согласно 2.2.10-21 [2], максимальное значение дополнительной волновой перерезывающей силы:

$$N_{\text{дв}} = 4M_{\text{дв}} / L = 4 \cdot 2044 / 96 = 85,181 \text{ кН}$$

Расчетное значение изгибающий моментов M_p , кН · м, для прогиба и перегиба в расчётном сечении корпуса, согласно 2.2.12 [2], следует вычислять алгебраическим суммированием значений изгибающих моментов на тихой воде $M_{\text{ТВ}}$, кН · м, с дополнительным волновым моментом в этом сечении

$M_{\text{ДВ}}$, кН · м:

$$M_p = M_{\text{ТВ}} + M_{\text{дв}} = 70643,05 + 2044 = 72687,05 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Расчетное значение перерезывающих сил N_p , кН, для прогиба и перегиба в расчётном сечении корпуса, согласно 2.2.13 [2], следует вычислять суммированием абсолютных значений перерезывающей силы на тихой воде $N_{\text{ТВ}}$, кН, с дополнительной перерезывающей силой в этом сечении $N_{\text{ДВ}}$, кН:

$$N_p = |N_{\text{ТВ}}| + |N_{\text{дв}}| = |3043,37| + |85,181| = 3128,551 \text{ кН}$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

6. Расчет эквивалентного бруса в первом приближении

Под эквивалентным брусом понимают совокупность всех продольных связей корпуса судна, принимающих участие в восприятии общего изгибающего момента.

6.1 Определение нормальных напряжений от общего изгиба в первом приближении

Корпус судна представляет собой коробчатую балку сложного переменного сечения. Напряжения от общего изгиба в корпусе определяются, как правило, на основе элементарной теории изгиба балок. В любой i -й точке сечения нормальные напряжения определяются:

$$\sigma_i = \frac{M \cdot z_i}{I_y} \quad [1, \text{ф.}(17)]$$

где I_y — момент инерции площади поперечного сечения корпуса;

M — изгибающий момент;

z_i — расстояние от нейтральной оси до центра тяжести связи.

Для проверки прочности необходимо найти момент инерции, моменты сопротивления и статические моменты площади поперечного сечения корпуса судна, рассматривая его в целом как балку. В состав эквивалентного бруса включают все непрерывные продольные связи, а именно настилы и обшивки, стрингеры, ребра жесткости, продольные переборки и внутренние борта.

При вычислении геометрических характеристик поперечных сечений корпуса (z_0 — расстояние от основной линии до НО и I_y) учитываются лишь те продольные связи, которые удовлетворяют следующим четырем условиям:

- 1) достаточной протяженности продольных связей;
- 2) достаточной целостности;
- 3) достаточной конструктивной связности;
- 4) однородности сечения корпуса по материалу.

Схема эквивалентного бруса приведена на рисунке 6.1

| | |
|--------------|--------------|
| Ине. № подп | Подп. и дата |
| Ине. № дубл. | Взам. инв. № |
| Подп. и дата | Подп. и дата |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

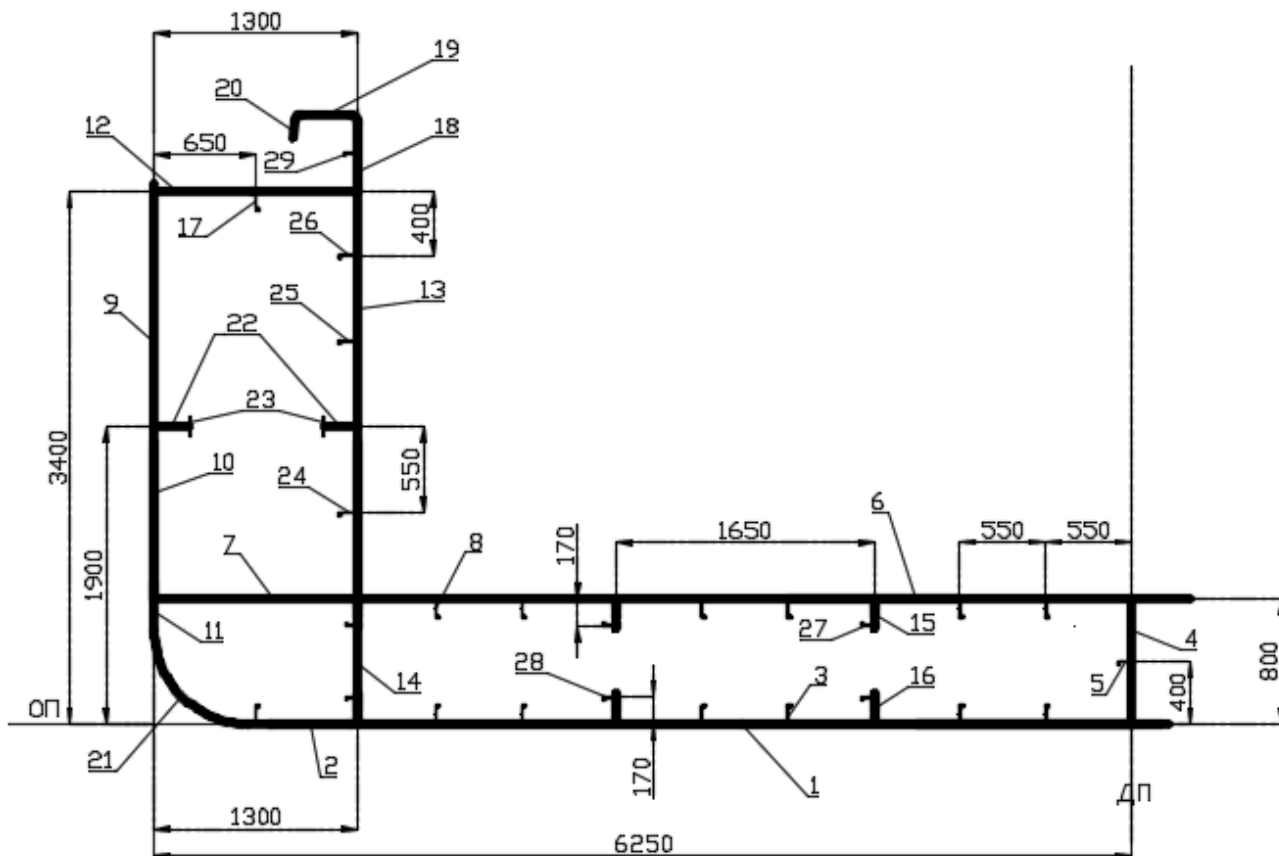


Рисунок 6.1 – Схема эквивалентного бруса в первом приближении

Определение геометрических характеристик эквивалентного бруса в первом приближении представлено в таблице 6.1

Таблица 6.1 – Расчет эквивалентного бруса в первом приближении

| № связи | Наименование связи (для половины сечения) | Размеры, см | Площадь F_j , см ² | Отстояние F_j от УО, z , м | Статический момент $F_j \cdot z$, см ³ | Моменты инерции, см ⁴ | |
|---------|--|-------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|
| | | | | | | Переносный, $F_j \cdot z^2$, см ² м ² | Собственный, i , см ² м ² |
| 1 | Обшивка днища | 0,8×495 | 396 | 0,004 | 1,584 | 0,006 | 0,002 |
| 2 | Обшивка днища в межбортном про- странстве | 0,8×70 | 56 | 0,004 | 0,224 | 0,001 | 0 |
| 3 | Ребра жесткости днища | 7×№12 | 78,05 | 0,084 | 6,517 | 0,544 | 0,614 |
| 4 | Средний кильсон | 0,5×0,8×80 | 32 | 0,408 | 26,112 | 10,654 | 3,413 |
| 5 | Ребро жесткости среднего кильсона | 0,5×№10 | 4,315 | 0,408 | 3,521 | 1,437 | 0,022 |
| 6 | Настил второго дна | 1×495 | 495 | 0,812 | 401,940 | 326,375 | 0,001 |
| 7 | Настил второго дна в мужбортном про- странстве | 0,8×130 | 104 | 0,812 | 84,448 | 68,572 | 0,001 |
| 8 | Ребра жесткости вто- рого дна | 7×№10 | 60,41 | 0,749 | 45,252 | 33,899 | 0,347 |
| 9 | Ширстрек | 0,8×120 | 96 | 2,858 | 274,368 | 784,144 | 11,520 |
| 10 | Обшивка наружного борта | 0,7×145 | 101,5 | 1,533 | 155,600 | 238,534 | 17,784 |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

21

Ли Изм. № докум. Подп. Да-

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл

| | | | | | | | |
|----|--|------------|---------|-------|---------|----------|---------|
| 11 | Обшивка наружного борта в междудонном пространстве | 0,8×20 | 16 | 0,708 | 11,328 | 8,020 | 0,053 |
| 12 | Настил палубы | 0,8×130 | 104 | 3,400 | 353,600 | 1202,240 | 0,001 |
| 13 | Обшивка внутреннего борта | 0,8×260 | 208 | 2,108 | 438,464 | 924,282 | 117,173 |
| 14 | Обшивка внутреннего борта в междудонном пространстве | 0,8×80 | 64 | 0,408 | 26,112 | 10,654 | 3,413 |
| 15 | Верхняя часть проникающего кильсона | 0,8×20×2 | 32 | 0,738 | 23,616 | 17,429 | 0,053 |
| 16 | Нижняя часть проникающего кильсона | 0,8×20×2 | 32 | 0,108 | 3,456 | 0,373 | 0,053 |
| 17 | Подпалубное ребро жесткости | №12 | 11,15 | 3,325 | 37,068 | 123,233 | 0,153 |
| 18 | Стенка комингса | 1×50 | 50 | 3,658 | 182,900 | 669,048 | 1,042 |
| 19 | Полка комингса | 1×40 | 40 | 3,913 | 156,520 | 612,463 | 0 |
| 20 | Фланец комингса | 1×10 | 10 | 3,858 | 38,580 | 148,852 | 0,008 |
| 21 | Скуловой пояс | 0,8×94,248 | 75,36 | 0,390 | 29,390 | 11,462 | 6,601 |
| 22 | Стенка бортового стрингера | 0,7×22×2 | 30,8 | 2,512 | 77,354 | 194,275 | 0 |
| 23 | Полка бортового стрингера | 1×12×2 | 24 | 2,512 | 60,276 | 151,383 | 0,014 |
| 24 | Ребро жесткости внутреннего борта (1) | №9 | 7,03 | 1,358 | 9,547 | 12,964 | 0,030 |
| 25 | Ребро жесткости внутреннего борта (2) | №9 | 7,03 | 2,458 | 17,280 | 42,474 | 0,030 |
| 26 | Ребро жесткости внутреннего борта (3) | №9 | 7,03 | 3,008 | 21,146 | 63,608 | 0,030 |
| 27 | Ребра жесткости верхних частей боковых кильсонов | №8×3 | 17,52 | 0,638 | 11,178 | 7,131 | 0,061 |
| 28 | Ребра жесткости нижних частей боковых кильсонов | №8×3 | 17,52 | 0,178 | 3,119 | 0,555 | 0,061 |
| 29 | Ребро жесткости комингса | №7 | 5,06 | 3,651 | 18,475 | 67,458 | 0,110 |
| | Сумма | | 2181,78 | | 2504,16 | 5888,61 | |

После проведенных вычислений, получим:

$$z = \frac{2504,16}{2181,78} = 1,15 \text{ м} - \text{расстояние от условной оси до нейтральной};$$

$I = 2 \cdot (5888,61 - 1,15 \cdot 2504,16) = 6028,854 \text{ см}^2 \cdot \text{м}^2$ - момент инерции площади поперечного сечения корпуса судна;

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

22

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл.

Ли Изм. № докум. Подп. Да-

$$W_{\text{дн}} = \frac{6028,854}{1,15} = 5252,702 \text{ см}^2 \cdot \text{м} - \text{момент сопротивления площади сечения для}$$

днища;

$$W_{\text{пал}} = \frac{6028,854}{3,4-1,15} = 2676,829 \text{ см}^2 \cdot \text{м} - \text{момент сопротивления площади сечения для}$$

палубы;

$$W_{\text{ком}} = \frac{6028,854}{3,9-1,15} = 2190,528 \text{ см}^2 \cdot \text{м} - \text{момент сопротивления площади сечения для}$$

днища.

Нормальные напряжения от общего изгиба в первом приближении равны:

в днище (сжатие):

$$\sigma_{\text{дн}} = \frac{M_{\text{рас}}}{W_{\text{дн}}}$$

$$\sigma_{\text{дн}} = \frac{72687,05 \cdot 10}{5252,702} = -138,380 \text{ МПа}$$

в палубе (растяжение):

$$\sigma_{\text{пал}} = \frac{M_{\text{рас}}}{W_{\text{пал}}}$$

$$\sigma_{\text{пал}} = \frac{72687,05 \cdot 10}{2676,829} = 271,541 \text{ МПа}$$

в комингсе (растяжение):

$$\sigma_{\text{ком}} = \frac{M_{\text{рас}}}{W_{\text{ком}}}$$

$$\sigma_{\text{ком}} = \frac{72689 \cdot 10}{2190,528} = 331,824 \text{ МПа}$$

На рисунке 6.2 приведена эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении корпуса судна.

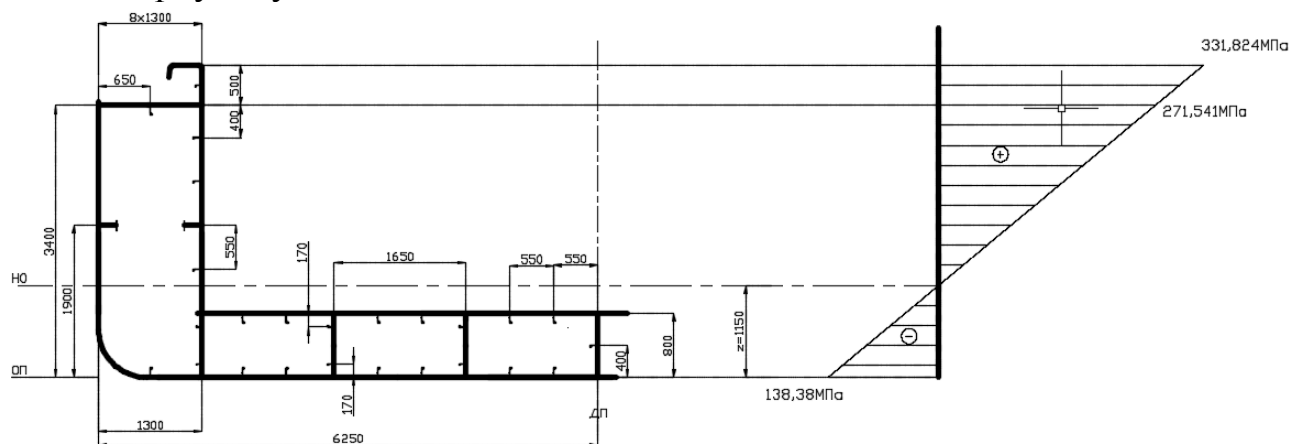


Рисунок 6.2 – Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении корпуса

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Сравним полученные напряжения с допускаемыми:

$$n_T \sigma_T \leq [\sigma],$$

где: $\sigma_T = 235$ МПа – предел текучести материала;

$n_T = 0,75$ – коэффициент запаса;

$$[\sigma]_{\text{дн}} = 0,6 \cdot \sigma_T = 0,6 \cdot 235 = 141 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{пал}} = 0,75 \cdot \sigma_T = 0,75 \cdot 235 = 176,25 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{ком}} = 0,75 \cdot \sigma_T = 0,75 \cdot 235 = 176,25 \text{ МПа}$$

$\sigma_{\text{дн}} \leq [\sigma]_{\text{дн}} \Rightarrow 138,380 \text{ МПа} \leq 141 \text{ МПа}$ - условие выполняется;

$\sigma_{\text{пал}} \leq [\sigma]_{\text{пал}} \Rightarrow 271,541 \text{ МПа} \leq 176,25 \text{ МПа}$ - условие не выполняется;

$\sigma_{\text{ком}} \leq [\sigma]_{\text{ком}} \Rightarrow 331,824 \text{ МПа} \leq 176,25 \text{ МПа}$ - условие не выполняется;

Полученные значения напряжений превышают допускаемые. Для того, чтобы условие прочности выполнилось, увеличиваем толщины и изменяем марку стали для комингса на 10СХНД. После этого производим расчет эквивалентного бруса в первом приближении (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Расчет эквивалентного бруса в первом приближении

| № связи | Наименование связи (для половины сечения) | Размеры, см | Площадь F_j , см ² | Отстояние F_j от УО, z , м | Статический момент $F_j \cdot z$, см ³ | Моменты инерции, см ⁴ | |
|---------|--|-------------|---------------------------------|--------------------------------|--|--|---|
| | | | | | | Переносный, $F_j \cdot z^2$, см ² м ² | Собственный, i , см ² м ² |
| 1 | Обшивка днища | 0,8×495 | 396 | 0,004 | 1,584 | 0,006 | 0,002 |
| 2 | Обшивка днища в межбортном пространстве | 0,8×70 | 56 | 0,004 | 0,224 | 0,001 | 0 |
| 3 | Ребра жесткости днища | 7×№12 | 78,05 | 0,084 | 6,517 | 0,544 | 0,614 |
| 4 | Диаметральный кильсон | 0,5×0,8×80 | 32 | 0,408 | 26,112 | 10,654 | 3,413 |
| 5 | Ребро жесткости среднего кильсона | 0,5×№10 | 4,315 | 0,408 | 3,521 | 1,437 | 0,022 |
| 6 | Настил второго дна | 1×495 | 495 | 0,812 | 401,940 | 326,375 | 0,001 |
| 7 | Настил второго дна в мужбортном пространстве | 0,8×130 | 104 | 0,812 | 84,448 | 68,572 | 0,001 |
| 8 | Ребра жесткости второго дна | 7×№10 | 60,41 | 0,749 | 45,252 | 33,899 | 0,347 |
| 9 | Ширстрек | 1,6×120 | 192 | 2,858 | 548,736 | 1568,287 | 23,040 |
| 10 | Обшивка наружного борта | 0,7×145 | 101,5 | 1,533 | 155,600 | 238,534 | 17,784 |
| 11 | Обшивка наружного борта в междулонном пространстве | 0,8×20 | 16 | 0,708 | 11,328 | 8,020 | 0,053 |
| 12 | Настил палубы | 1,6×130 | 208 | 3,400 | 707,200 | 2404,287 | 0,004 |
| 13 | Обшивка внутреннего борта | 0,8×260 | 208 | 2,108 | 438,464 | 924,282 | 117,173 |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

24

Ли Изм. № докум. Подп. Да-

| | | | | | | | |
|----|--|------------|--------|-------|---------|----------|-------|
| 14 | Обшивка внутреннего борта в междудонном пространстве | 0,8×80 | 64 | 0,408 | 26,112 | 10,654 | 3,413 |
| 13 | Верхняя часть пронизающего кильсона | 0,8×20×2 | 32 | 0,738 | 23,616 | 17,429 | 0,053 |
| 14 | Нижняя часть пронизающего кильсона | 0,8×20×2 | 32 | 0,108 | 3,456 | 0,373 | 0,053 |
| 15 | Подпалубное ребро жесткости | №12 | 16,85 | 3,325 | 56,018 | 186,231 | 0,153 |
| 16 | Стенка комингса | 1,8×50 | 90 | 3,658 | 329,220 | 1204,287 | 1,875 |
| 17 | Полка комингса | 1,8×40 | 72 | 3,913 | 282,024 | 1104,688 | 0,002 |
| 18 | Фланец комингса | 1,8×10 | 18 | 3,858 | 69,444 | 267,915 | 0,015 |
| 19 | Скуловой пояс | 0,8×94,248 | 75,36 | 0,390 | 29,390 | 11,462 | 6,601 |
| 20 | Стенка бортового стрингера | 0,7×22×2 | 30,8 | 2,512 | 77,354 | 194,275 | 0 |
| 21 | Полка бортового стрингера | 1×12×2 | 24 | 2,512 | 60,276 | 151,383 | 0,014 |
| 22 | Ребро жесткости внутреннего борта (1) | №9 | 7,03 | 1,358 | 9,547 | 12,964 | 0,030 |
| 23 | Ребро жесткости внутреннего борта (2) | №9 | 7,03 | 2,458 | 17,280 | 42,474 | 0,030 |
| 24 | Ребро жесткости внутреннего борта (3) | №9 | 7,03 | 3,008 | 21,146 | 63,608 | 0,030 |
| 25 | Ребра жесткости верхних частей боковых кильсонов | №8×3 | 17,52 | 0,638 | 11,178 | 7,131 | 0,061 |
| 26 | Ребра жесткости нижних частей боковых кильсонов | №8×3 | 17,52 | 0,178 | 3,119 | 0,555 | 0,061 |
| 27 | Ребро жесткости комингса | №146 | 16,85 | 3,651 | 61,456 | 224,146 | 0,110 |
| | Сумма | | 2487,5 | | 3486,39 | 9170,32 | |

После проведенных вычислений, получим:

$$z = \frac{3486,39}{2487,5} = 1,40 \text{ м} - \text{расстояние от условной оси до нейтральной};$$

$I = 2 \cdot (9170,32 - 1,40 \cdot 3486,5) = 8567,89 \text{ см}^2 \cdot \text{м}^2$ - момент инерции площади поперечного сечения корпуса судна;

$W_{\text{дн}} = \frac{9170,32}{1,40} = 6113,11 \text{ см}^2 \cdot \text{м}$ - момент сопротивления площади сечения для днища;

$W_{\text{пал}} = \frac{9170,32}{3,4 - 1,40} = 4287,29 \text{ см}^2 \cdot \text{м}$ - момент сопротивления площади сечения для палубы;

$W_{\text{ком}} = \frac{9170,32}{3,9 - 1,40} = 3429,29 \text{ см}^2 \cdot \text{м}$ - момент сопротивления площади сечения для днища.

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

25

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл.

Ли Изм. № докум. Подп. Да-

Нормальные напряжения от общего изгиба в первом приближении равны:
в днище (сжатие):

$$\sigma_{\text{дн}} = \frac{M_{\text{рас}}}{W_{\text{дн}}}$$

$$\sigma_{\text{дн}} = \frac{72643,05 \cdot 10}{6227,05} = -118,904 \text{ МПа}$$

в палубе (растяжение):

$$\sigma_{\text{пал}} = \frac{M_{\text{рас}}}{W_{\text{пал}}}$$

$$\sigma_{\text{пал}} = \frac{72643,05 \cdot 10}{4291,94} = 169,540 \text{ МПа}$$

в комингсе (растяжение):

$$\sigma_{\text{ком}} = \frac{M_{\text{рас}}}{W_{\text{ком}}}$$

$$\sigma_{\text{ком}} = \frac{72643,05 \cdot 10}{3437,91} = 211,959 \text{ МПа}$$

На рисунке 6.3 приведена эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении корпуса судна.

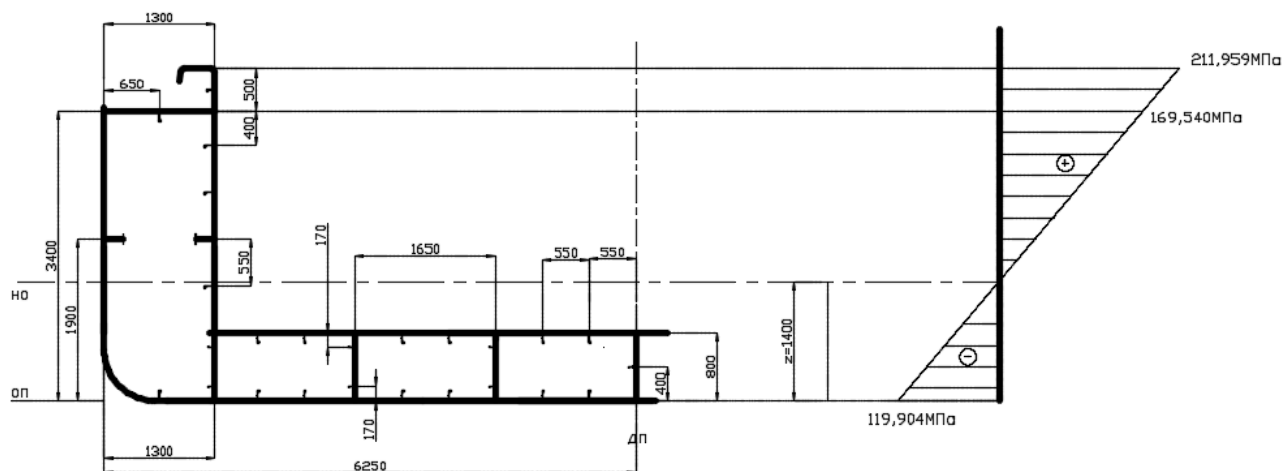


Рисунок 6.3 – Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении корпуса судна. Сравним полученные напряжения с допускаемыми:

$$n_T \sigma_T \leq [\sigma],$$

где: $\sigma_T = 235 \text{ МПа}$ – предел текучести материала;

$\sigma_T = 390 \text{ МПа}$ – предел текучести материала для комингса;

$n_T = 0,75$ – коэффициент запаса для палубы и комингса;

$n_T = 0,6$ – коэффициент запаса для днища;

$$[\sigma]_{\text{дн}} = 0,6 \cdot \sigma_T = 0,6 \cdot 235 = 141 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{пал}} = 0,75 \cdot \sigma_T = 0,75 \cdot 235 = 176,25 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{ком}} = 0,75 \cdot \sigma_T = 0,64 \cdot 390 = 292,5 \text{ МПа}$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

$$\sigma_{\text{дн}} \leq [\sigma]_{\text{дн}} \Rightarrow 118,904 \text{ МПа} \leq 141 \text{ МПа} - \text{условие выполняется};$$

$$\sigma_{\text{пал}} \leq [\sigma]_{\text{пал}} \Rightarrow 169,540 \text{ МПа} \leq 176,25 \text{ МПа} - \text{условие выполняется};$$

$$\sigma_{\text{ком}} \leq [\sigma]_{\text{ком}} \Rightarrow 211,959 \text{ МПа} \leq 292,5 \text{ МПа} - \text{условие выполняется};$$

Полученные значения напряжений не превышают допускаемые.

7. Расчет эквивалентного бруса во втором приближении

Связи эквивалентного бруса разделяются на две группы: жёсткие и гибкие.

Жёсткими связями эквивалентного бруса называются связи, при введении которых в эквивалентный брус можно пренебречь влиянием их начальной погиби и поперечной нагрузки на продольные, нормальные напряжения и потеря устойчивости которых исключена.

Гибкими связями эквивалентного бруса называют связи, теряющие устойчивость при общем изгибе, а также связи, при учёте работоспособности которых приходится считаться с влиянием начальной погиби и поперечной нагрузки на продольные, нормальные напряжения.

Обычно к жёстким связям относятся балки продольного набора, а к гибким – обшивка и настилы, а иногда и продольные рёбра.

Жёсткие связи, кроме участия в общем изгибе, являются распорами для пластин, и потому напряжения $\sigma_{\text{ж}}$ в них значительно отличаются от цепных напряжений $\sigma_{\text{ц}}$ в гибких связях. Вследствие различия в размерах, устройстве, значения начальной погиби и поперечной нагрузки цепные напряжения в соседних гибких связях могут отличаться друг от друга.

Чтобы учесть неодинаковое участие в общем изгибе корпуса судна жёстких и гибких связей, все они приводятся к однородной жёсткости. Для этого каждая отдельная пластина должна быть заменена равноценной ей жёсткой связью такого сечения, при котором эта связь имела бы напряжения, равные $\sigma_{\text{ж}}$, и воспринимала одинаковое усилие с заменяемой ею пластиной.

7.1 Определение коэффициентов редуцирования:

Коэффициенты редуцирования φ для пластин палубы будут равны 1, т.к. эти пластины находятся в растянутой зоне. Коэффициенты редуцирования φ для пластин днища определяются по формуле:

$$\varphi = - \frac{\sigma_{\text{э}}}{\sigma_{\text{ж}}}$$

| | |
|--------------|--------------|
| Ине. № подп | Подп. и дата |
| Ине. № дубл. | Взам. инв. № |
| Ине. № инв. | Подп. и дата |
| Ине. № инв. | Подп. и дата |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Схема эквивалентного бруса во втором приближении представлена на рис. 7.1:

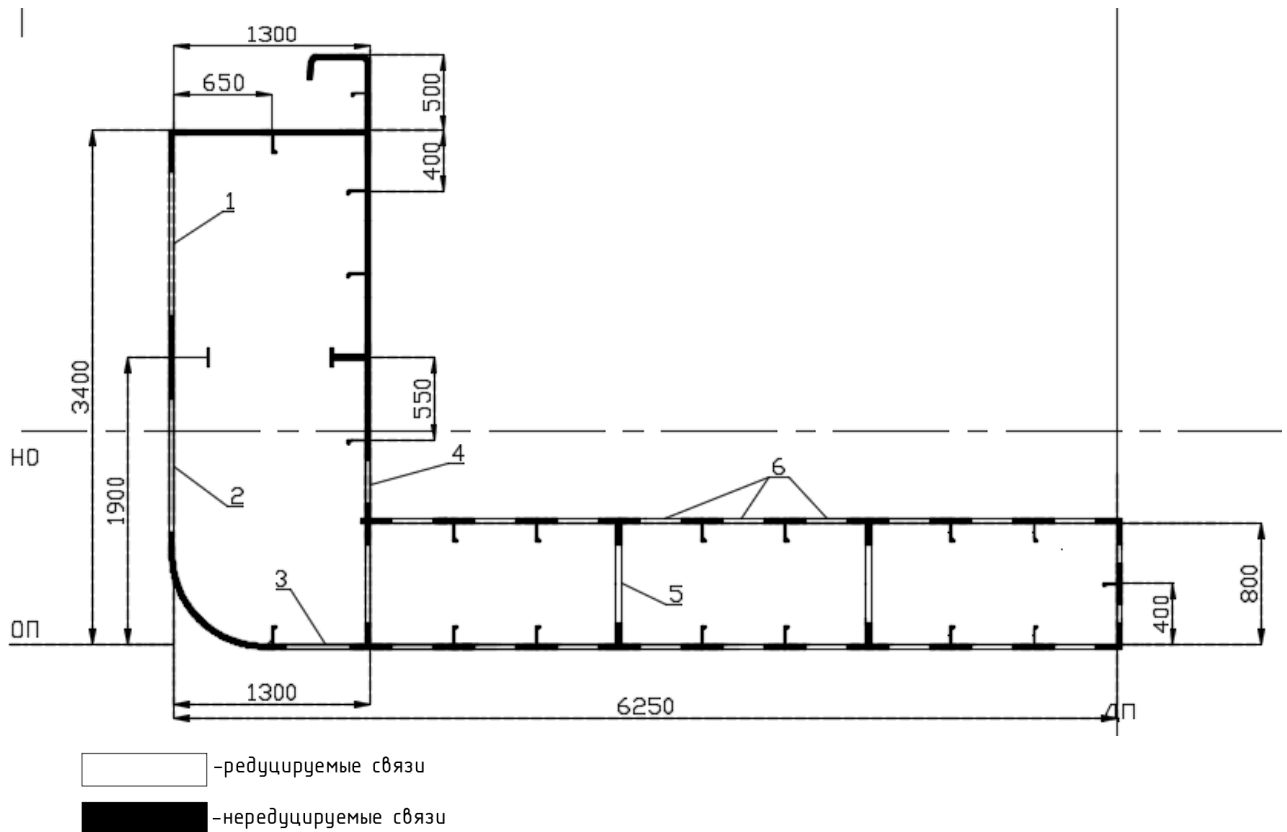


Рисунок 7.1 – Схема редуцируемых элементов эквивалентного бруса
 Определяем коэффициенты редуцирования, результаты сведены в таблицу 7.2.

Таблица 7.1 – Коэффициенты редуцирования

| № пластины | $t, \text{см}$ | $a, \text{см}$ | $b, \text{см}$ | $\sigma_3, \text{МПа}$ | $\sigma_{ж}, \text{МПа}$ | φ |
|------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|--------------------------|-----------|
| 1 | 0,8 | 60 | 95 | 76,23 | 106,045 | 0,718 |
| 2 | 0,7 | 60 | 88,75 | 16,63 | 18,58 | 0,841 |

Для пластины №1, редуцирующий коэффициент φ согласно [2, п.2.2.39] определим при помощи формул строительной механики корабля.

Размеры пластины №1: $a=60 \text{ см}$, $b=95 \text{ см}$, $t=0,8 \text{ см}$

Напряжение в жесткой связи, равно напряжению на уровне центра тяжести пластины:

$$\sigma_{ж} = \frac{M_{рас} \cdot z}{I} = \frac{72687,05 \cdot 1,25}{8567,89} = 10,604 \text{ МПа},$$

где: $M_{рас}$ - расчетный изгибающий момент, кН·м

z – расстояние от центра тяжести пластины до Н.О, м

I -момент инерции эквивалентного бруса, $\text{см}^2 \cdot \text{м}^2$

Поперечная нагрузка на пластину: $P=0$.

Стрелка прогиба от поперечной нагрузки: $f=0$.

Стрелка начальной погиби пластины определяется по формуле:

Подп. и дата
 Взам. инв. №
 Инв. № дубл.
 Подп. и дата
 Инв. № подл.

$$h = \frac{a}{55} \cdot \left(\frac{0,15}{t} + 0,4 \right) = \frac{60}{55} \cdot \left(\frac{0,15}{0,8} + 0,4 \right) = 0,64 \text{ см}$$

Эйлерово напряжение пластины свободно опертой по кромкам, определяется по формуле:

$$\sigma_3 = 19 \left(\frac{100 \cdot t}{a} \right)^2 \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2 = 66,099 \text{ МПа} = 6,609 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad [3, \text{ф. (3.9)}]$$

Определим нагрузку на пластину ρ , Н/см²:

$$\rho = 4,00 - 2,81 \frac{a}{b} + 1,34 \frac{a^2}{b^2} = 4,00 - 2,81 \cdot \frac{60}{95} + 1,34 \cdot \frac{60^2}{95^2} = 2,759$$

Кубическое уравнение:

$$x^3 + \left[\frac{2,73}{\rho \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2} \left(\frac{h}{t} \right)^2 - \frac{1}{\rho} \frac{\sigma_{жс}}{\sigma_3} - 1 \right] x^2 = \frac{2,73(f+h)^2}{\rho \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2 \cdot t^2}$$

$$x^3 + \left[\frac{2,73}{2,759 \cdot \left(1 + \frac{60^2}{95^2} \right)^2} \cdot \left(\frac{0,64}{0,8} \right)^2 - \frac{1}{2,759} \cdot \frac{10,613}{6,609} - 1 \right] \cdot x^2 =$$

$$= \frac{2,73 \cdot (0 + 0,64)^2}{2,759 \cdot \left(1 + \frac{60^2}{95^2} \right)^2 \cdot 0,8^2}$$

$$x^3 - 1,258x^2 = 0,323$$

Наименьший корень: $x=1,418$

Редукционный коэффициент определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{жс}},$$

где: $\sigma_{ц}$ - цепное напряжение.

$$\sigma_{ц} = \rho(x-1)\sigma_3 = 2,759 \cdot (1,418-1) \cdot 6,609 = 7,623 \text{ кН/см}^2 \quad [4, \text{ф. (434)}]$$

$$\varphi = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{жс}} = \frac{7,633}{10,613} = 0,718 \quad [4, \text{ф. (431)}]$$

Аналогично определим редукционный коэффициент φ для пластины №2, согласно [2, п.2.2.39].

Размеры пластины №1: $a=60$ см, $b=88,75$ см, $t=0,7$ см

Напряжение в жесткой связи, равно напряжению на уровне центра тяжести пластины:

$$\sigma_{жс} = \frac{M_{рас} \cdot z}{I} = \frac{72687,05 \cdot 0,219}{8567,89} = 1,858 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

Подп. и дата
 Взам. инв. №
 Инв. № дубл.
 Подп. и дата
 Инв. № подл.

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

где: $M_{рас}$ - расчетный изгибающий момент, кН·м

z – расстояние от центра тяжести пластины до Н.О, м

I -момент инерции эквивалентного бруса, $см^2 \cdot м^2$

Поперечная нагрузка на пластину:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Где: ρ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

h – высота до середины пластины;

$$\rho = 1 \text{ т/м}^3$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$h = 1,18 \text{ м}$$

$$P = 1 \cdot 9,8 \cdot 1,18 = 1,156 \text{ Н/см}^2$$

Стрелка прогиба от поперечной нагрузки:

$$f = \frac{k \cdot P \cdot a^4}{E \cdot t^3}$$

где k – коэффициент, определяемы по табл. 13.2 [1, стр. 351];

P – поперечная нагрузка;

E – модуль Юнга;

$$k = 0,0241$$

$$E = 2 \cdot 10^5 \text{ Мпа}$$

$$f = \frac{0,0241 \cdot 1,156 \cdot 60^4}{2 \cdot 10^7 \cdot 0,7^3} = 0,053 \text{ см}$$

Стрелка начальной погиби пластины определяется по формуле:

$$h = \frac{a}{55} \cdot \left(\frac{0,15}{t} + 0,4 \right) = \frac{60}{55} \cdot \left(\frac{0,15}{0,7} + 0,4 \right) = 0,67 \text{ см} \quad [2, \text{ п.2.2.39-1}]$$

Эйлерово напряжение пластины свободно опертой по кромкам, определяется по формуле:

$$\sigma_s = 19 \left(\frac{100 \cdot t}{a} \right)^2 \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2 = 54,903 \text{ МПа} = 5,49 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \quad [3, \text{ ф. (3.9)}]$$

Определим нагрузку на пластину ρ , Н/см^2 :

$$\rho = 4,00 - 2,81 \frac{a}{b} + 1,34 \frac{a^2}{b^2} = 4,00 - 2,81 \cdot \frac{60}{88,75} + 1,34 \cdot \frac{60^2}{88,75^2} = 2,712$$

Кубическое уравнение:

$$x^3 + \left[\frac{2,73}{\rho \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2} \left(\frac{h}{t} \right)^2 - \frac{1}{\rho} \frac{\sigma_{жс}}{\sigma_s} - 1 \right] x^2 = \frac{2,73(f+h)^2}{\rho \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)^2 \cdot t^2}$$

$$x^3 + \left[\frac{2,73}{2,712 \cdot \left(1 + \frac{60^2}{88,75^2}\right)^2} \cdot \left(\frac{0,67}{0,7}\right)^2 - \frac{1}{2,712} \cdot \frac{1,858}{5,49} - 1 \right] \cdot x^2 =$$

$$= \frac{2,73 \cdot (0,053 + 0,67)^2}{2,712 \cdot \left(1 + \frac{60^2}{88,75^2}\right)^2 \cdot 0,7^2}$$

$$x^3 - 0,690x^2 = 0,506$$

Наименьший корень: $x=1,105$

Редукционный коэффициент определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{жс}},$$

где: $\sigma_{ц}$ - цепное напряжение.

$$\sigma_{ц} = \rho(x-1)\sigma_s = 2,712 \cdot (1,105-1) \cdot 5,49 = 1,563 \text{ кН/см}^2 \quad [4, \text{ф.}(434)]$$

$$\varphi = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{жс}} = \frac{1,563}{1,858} = 0,841 \quad [4, \text{ф.}(431)]$$

Определение поправок во втором приближении представлены в таблице 7.3.

Таблица 7.2 – Вычисление поправок на редуцирование во втором приближении

| № пластины | Редукционный коэффициент φ | 1- φ | Площадь, подлежащая редуцированию ω , см ² | Потеря площади $\omega(1-\varphi)$, см ² | Расстояние ЦТ площади до Н.О z , м | Потеря статического момента $\omega(1-\varphi)z$, см ² ·м | Потеря момента инерции $\omega(1-\varphi)z^2$, см ² ·м ² | Потеря собственного момента инерции см ² ·м ² |
|------------|------------------------------------|--------------|--|--|--------------------------------------|---|---|---|
| 1 | 0,718 | 0,282 | 76 | 21,432 | 1,25 | 26,790 | 33,488 | 5,001 |
| 2 | 0,841 | 0,159 | 62,125 | 9,864 | 0,219 | 2,160 | 0,473 | 4,078 |
| Σ | - | - | - | A₀=31,296 | - | B₀=28,950 | C₀=43,040 | |

Таким образом, получаем:

$$A_1 = A - A_0 = 2487,505 - 31,296 = 2456,209 \text{ см}^2;$$

$$B_1 = B - B_0 = 3486,386 - 28,950 = 3457,436 \text{ см}^3;$$

$$C_1 = C - C_0 = 9170,322 - 43,040 = 9127,282 \text{ см}^4.$$

$$z_0 = \frac{3457,436}{2456,209} = 1,408 м$$

$$I = 2 \cdot \left(9127,282 - \frac{3457,436^2}{2456,209} \right) = 8520,975 см^2 \cdot м^2$$

$$W_{дн} = \frac{8520,975}{1,408} = 6051,829 см^2 \cdot м$$

$$W_{пал} = \frac{8520,975}{(3,4 - 1,408)} = 4277,598 см^2 \cdot м$$

$$W_{ком} = \frac{8520,975}{(3,9 - 1,408)} = 3419,331 см^2 \cdot м$$

7.2 Определение нормальные напряжения от общего изгиба во втором приближения равны:

$$\sigma = \frac{M_{рас}}{W}$$

в днище (сжатие):

$$\sigma_{дн} = \frac{M_{рас}}{W_{дн}}$$

$$\sigma_{дн} = \frac{72687,05 \cdot 10}{6051,829} = -120,108 МПа$$

в палубе (растяжение):

$$\sigma_{пал} = \frac{M_{рас}}{W_{пал}}$$

$$\sigma_{пал} = \frac{72687,05 \cdot 10}{4276,672} = 169,925 МПа$$

в комингсе (растяжение):

$$\sigma_{ком} = \frac{M_{рас}}{W_{ком}}$$

$$\sigma_{ком} = \frac{72687,05 \cdot 10}{3419,331} = 212,577 МПа$$

На рисунке 7.2 приведена эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении корпуса судна.

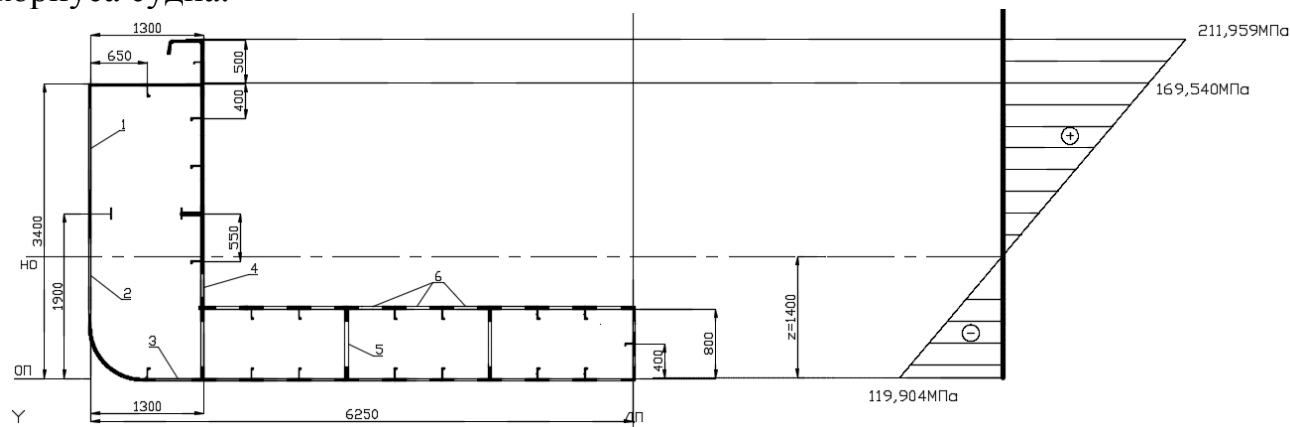


Рисунок 7.2 – Эпюра нормальных напряжений в поперечном сечении корпуса судна

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Вычисляя расхождения между напряжениями в первом и втором приближениях, получим:

$$\Delta\sigma_{\text{дн}} = \frac{120,108 - 118,904}{120,108} \cdot 100\% = 1,002\% < 5\%$$

$$\Delta\sigma_{\text{пал}} = \frac{169,925 - 169,541}{169,925} \cdot 100\% = 0,226\% < 5\%$$

$$\Delta\sigma_{\text{ком}} = \frac{212,577 - 211,959}{212,577} \cdot 100\% = 0,291\% < 5\%$$

Так как $\Delta\sigma$ не превышает 5%, второе приближение является окончательным, полученные во втором приближении напряжения не превышают допусковых.

7.3 Проверка общей прочности нормальных напряжений для эквивалентного бруса во втором приближении

Сравним полученные напряжения с допусковыми:

$$n_T \sigma_T \leq [\sigma],$$

где: $\sigma_T = 235$ МПа – предел текучести материала;

$\sigma_T = 390$ МПа – предел текучести материала для комингса;

$n_T = 0,75$ – коэффициент запаса для палубы и комингса;

$n_T = 0,6$ – коэффициент запаса для днища;

$$[\sigma]_{\text{дн}} = 0,6 \cdot \sigma_T = 0,6 \cdot 235 = 141 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{пал}} = 0,75 \cdot \sigma_T = 0,75 \cdot 235 = 176,25 \text{ МПа}$$

$$[\sigma]_{\text{ком}} = 0,75 \cdot \sigma_T = 0,64 \cdot 390 = 292,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{дн}} \leq [\sigma]_{\text{дн}} \Rightarrow 120,108 \text{ МПа} \leq 141 \text{ МПа} - \text{условие выполняется;}$$

$$\sigma_{\text{пал}} \leq [\sigma]_{\text{пал}} \Rightarrow 169,925 \text{ МПа} \leq 176,25 \text{ МПа} - \text{условие выполняется;}$$

$$\sigma_{\text{ком}} \leq [\sigma]_{\text{ком}} \Rightarrow 212,597 \text{ МПа} \leq 292,5 \text{ МПа} - \text{условие выполняется;}$$

Полученные значения напряжений не превышают допустимых.

8. Расчет общей предельной прочности

Под предельным моментом понимается изгибающий момент, вызывающий хотя бы одно из продольных связей корпуса, включенной в эквивалентный брус, нормальные напряжения общего изгиба, равные по абсолютной величине опасным;

При этом во всех других связях напряжение должны быть не больше опасных.

В соответствии с п.2.2.76 [2], назначаем предельное напряжение в комингсе, как наиболее удаленное от нейтральной оси эквивалентного бруса равное по абсолютной величине опасному:

$$\sigma_o = k_n \cdot R_{eH}$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

где: $R_{eH} = 390 \text{ МПа}$ - предел текучести материала;

k_n – коэффициент, вычисляемый, при $235 \text{ МПа} \leq R_{eH} \leq 395 \text{ МПа}$, по формуле:

$$k_n = 1 - 0,089(R_{eH} / 235 - 1) - 0,129(R_{eH} / 235 - 1)^2 \quad (2.2.67-3 [2])$$

$$k_n = 1 - 0,089(390 / 235 - 1) - 0,129(390 / 235 - 1)^2 = 0,885$$

Представлена таблица для проверки общей прочности:

Таблица 8.1 Расчет эквивалентного бруса для проверки общей прочности

| № пластины | Редукционный коэффициент ϕ | 1- ϕ | Площадь, подлежащая редуцированию ω , см^2 | Потеря площади $\omega(1-\phi)$, см^2 | Расстояние ЦТ площади до Н.О z , м | Потеря статического момента $\omega(1-\phi)z$, $\text{см}^2 \cdot \text{м}$ | Потеря момента инерции $\omega(1-\phi)z^2$, $\text{см}^2 \cdot \text{м}^2$ | Потеря собственного момента инерции $\text{см}^2 \cdot \text{м}^2$ |
|------------|---------------------------------|-----------|--|---|--------------------------------------|--|---|--|
| 1 | 0,718 | 0,282 | 76 | 21,432 | 1,242 | 26,618 | 33,060 | 5,001 |
| 2 | 0,836 | 0,164 | 62,125 | 10,189 | 0,227 | 2,313 | 0,525 | 4,078 |
| Σ | - | - | - | $A_0=31,621$ | - | $B_0=28,931$ | $C_0=42,664$ | |

Таким образом, получаем:

$$A_1 = A - A_2 = 2456,209 - 31,621 = 2424,588 \text{ см}^2;$$

$$B_1 = B - B_2 = 3457,436 - 28,931 = 3428,505 \text{ см}^3;$$

$$C_1 = C - C_2 = 9127,282 - 42,664 = 9084,618 \text{ см}^4.$$

$$z_0 = \frac{3428,505}{2424,588} = 1,414 \text{ м}$$

$$I = 2 \cdot \left(9084,618 - \frac{3428,505^2}{2424,588} \right) = 8472,703 \text{ см}^2 \cdot \text{м}^2$$

$$W_{\text{ком}} = \frac{8472,703}{(3,9 - 1,414)} = 3408,167 \text{ см}^2 \cdot \text{м}$$

Предельный изгибающий момент:

$$M_{np} = W_{\text{ком}} \cdot \sigma_o = 258,915 \cdot 3408,167 = 882425,559 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Условие прочности корпуса по предельному моменту в соответствии с 2.2.80 [2]:

$$|M_{np}| \geq k |M_p|,$$

где: k – коэффициент запаса прочности по предельному моменту, равный 1,35.

$882425,559 \text{ кН} \cdot \text{м} \geq 1,35 \cdot 72687,05 = 98127,518 \text{ кН} \cdot \text{м}$ - условие выполнено по обеспечению прочности корпуса по предельному моменту.

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

34

Инв. № подл. Инв. № инв. № Подп. и дата

Для грузовых судов, прочность корпуса по предельному моменту должна быть дополнительно проверена согласно 2.2.82 [2]:

$$M_{np} \geq k_{np} DL,$$

где: k_{np} - коэффициент предельного момента;

D - водоизмещение судна в полном грузу, кН.

$882425,559 \text{ кН} \cdot \text{м} \geq 0,0336 \cdot 1038,75 \cdot 96 = 3350,592 \text{ кН} \cdot \text{м}$ - условие прочности корпуса по предельному моменту выполнено.

Заключение

В работе произведен расчет статей масс судна на стадии его эскизного проектирования и распределение этих статей по длине корпуса по теоретическим шпациям. Расчет выполнен для случаев в балласте со 100% запасов и в грузу с 10% запасов. На основании полученных данных выполнена удифферентовка, по результатам которой определены осадки носом и кормой, результирующая нагрузка на судно, а также величины перерезывающих сил и изгибающих моментов для дальнейшей проверки общей прочности корпуса. Величины осадок и невязок не превышают значений, регламентированных Российским Речным Регистром. Выполнен расчет эквивалентного бруса в первом и втором приближении, определены нормальные напряжения от общего изгиба корпуса судна, вычислены коэффициенты редуцирования. Расчет общей предельной прочности выполнен в соответствии с правилами Российского Речного Регистра, следовательно, можно сделать вывод, что судно соответствует нормам общей и предельной прочности.

| | |
|---------------|--------------|
| Инва. № подп | Подп. и дата |
| Инва. № дубл. | Взам. инв. № |
| Подп. и дата | Подп. и дата |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

9. Проверка местной прочности

9.1. Расчет ребра жесткости днища на прочность

Рассмотрим наиболее опасный случай, когда осадка судна максимальна ($T=2,34$ м, расчетная полувысота волны $r=1$ м).

Определим нагрузку, действующую на ребро жесткости днища:

$$Q = q \cdot l \cdot c,$$

где q – давление воды на днище;

$$q = \rho \cdot g \cdot (T + r) \cdot a = 1 \cdot 9,81 \cdot (2,34 + 1) \cdot 0,6 = 19,66 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2},$$

$l=1,8$ м – пролет ребра жесткости днища;

$a=600$ мм – шпация;

$c=300$ мм – ширина присоединенного пояса п.2.2.53.1 [2].

$$Q = 19,66 \cdot 1,8 \cdot 0,3 = 10,62 \text{ кН}$$

По таблице №3.1 сл.28 [4] находим:

$$M_{\text{оп}} = \frac{Ql}{12} = \frac{10,62 \cdot 1,8}{12} = 1,593 \text{ кНм}$$

$$M_{\text{пр}} = \frac{Ql}{12} = \frac{10,62 \cdot 1,8}{24} = 0,797 \text{ кНм}$$

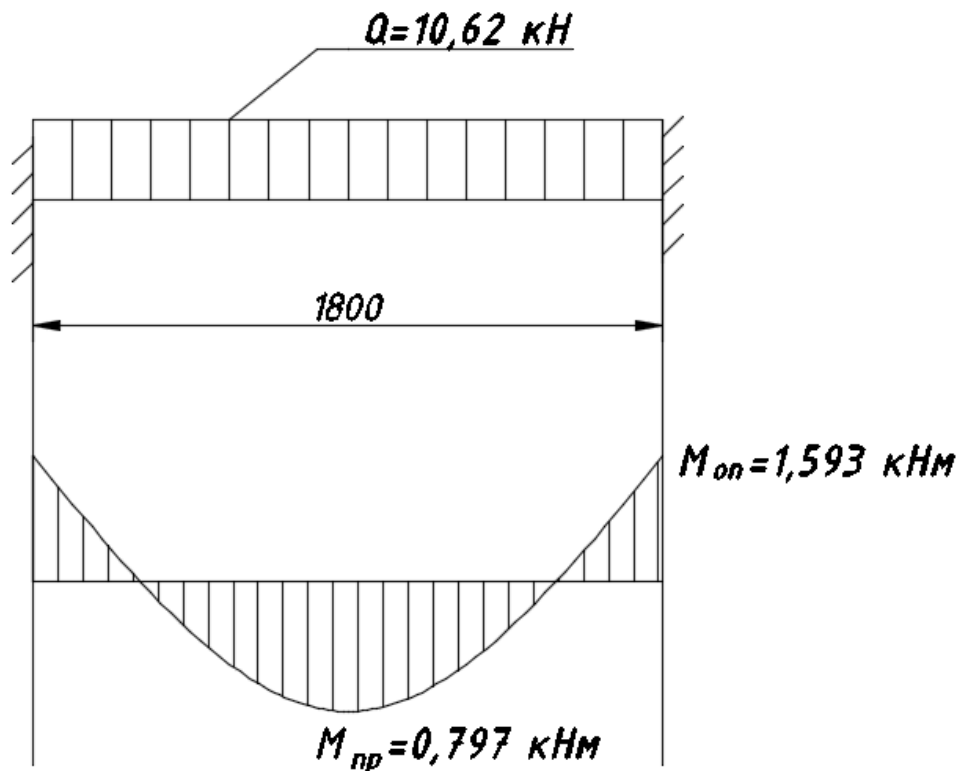


Рисунок 9.1 – Расчетная схема ребра жесткости днища

| | |
|--------------|--|
| Подп. и дата | |
| Взам. инв. № | |
| Инв. № дубл. | |
| Подп. и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
| | | | | |

В качестве ребра жесткости днища выбран несимметричный полособульб №12.

Определение момента сопротивления ребра жесткости днища приведено в таблице 9.1

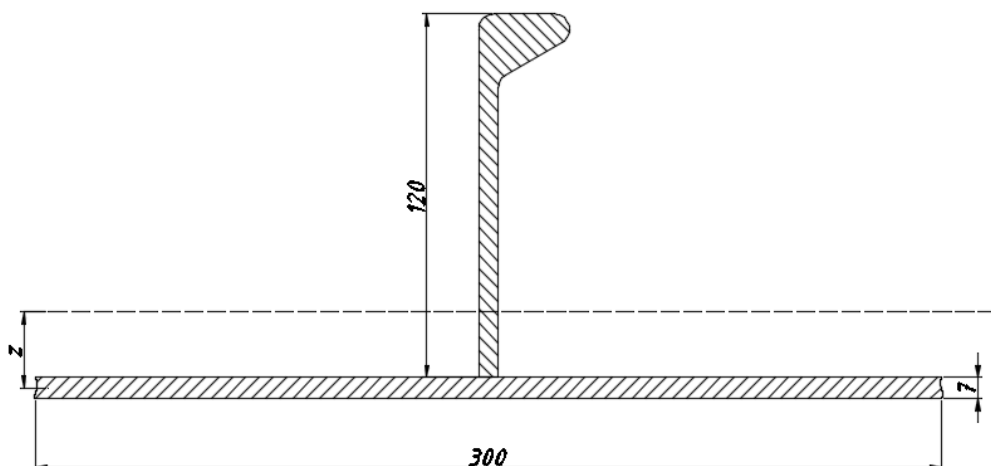


Рисунок 9.2 – схема ребра жесткости днища

Таблица 9.1 – Геометрические характеристики профиля ребра жесткости днища.

| Наименование и размеры связи, мм | Площадь f , см ² | Расстояние от оси z , см | Статический момент инерции fz , см ³ | Переносной момент инерции fz^2 , см ⁴ | Собственный момент инерции i , см ⁴ |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---|--|--|
| 120x30x6,5 | 11,15 | 7,95 | 88,623 | 704,708 | 157,36 |
| Присоединенный поясok 300x8 | 24 | 0 | 0 | 0 | - |
| Суммы | A=35,15 | | B=88,623 | C=862,068 | |

Отстояние нейтральной оси от условной:

$$z = \frac{B}{A} = \frac{88,623}{35,15} = 2,52 \text{ см}$$

Момент инерции площади сечения:

$$I_y = 2 \cdot (C - z \cdot B) = 2 \cdot (862,068 - 2,52 \cdot 88,623) = 1277,476 \text{ см}^4$$

Минимальный момент сопротивления (момент сопротивления полки):

$$W_{min} = \frac{I_y}{y_{max}} = \frac{1277,476}{9,52} = 134,188 \text{ см}^3$$

Максимальный момент сопротивления (момент сопротивления пояска):

$$W_{max} = \frac{I_y}{y_{min}} = \frac{1277,476}{2,52} = 506,935 \text{ см}^3$$

Вычислим сжимающие напряжения в опоре:

$$\sigma_{оп} = \frac{M_{оп}}{W_{min}} = \frac{1593}{134,188 \cdot 10^{-6}} = 11,871 \text{ МПа}$$

Вычислим сжимающие напряжения в пролете:

$$\sigma_{пр} = \frac{M_{пр}}{W_{min}} = \frac{797}{134,188 \cdot 10^{-6}} = 5,939 \text{ МПа}$$

Напряжения от общего изгиба в днище:

$$\sigma_{дн} = 120,108 \text{ МПа}$$

Суммарные напряжения:

в опоре: $\sigma_{\Sigma оп} = \sigma_{дн} + \sigma_{оп} = 120,108 + 11,871 = 131,979 \text{ МПа}$

в пролете: $\sigma_{\Sigma пр} = \sigma_{дн} + \sigma_{пр} = 120,108 + 5,939 = 126,047 \text{ МПа}$

Допускаемые напряжения по таблице 2.2.68 [2]:

$$[\sigma_{оп}] = 0,95 \cdot \sigma_T = 0,95 \cdot 235 = 223,25 \text{ МПа}$$

$$[\sigma_{пр}] = 0,85 \cdot \sigma_T = 0,85 \cdot 235 = 199,75 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{оп} = 131,979 \text{ МПа} < [\sigma_{оп}] = 223,25 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{пр} = 126,047 \text{ МПа} < [\sigma_{пр}] = 199,75 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются.

| | |
|--------------|--|
| Подп. и дата | |
| Взам. инв. № | |
| Инв. № дубл. | |
| Подп. и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

9.2 Расчёт холостого шпангоута борта на местную прочность

Согласно пункту 2.2.48 [2], холостые шпангоуты должны рассчитываться как многопролетные балки в предположении, что продольные рамные связи (бортовые стрингеры) являются жесткими несмещающимися опорами для холостых шпангоутов, а отдельные участки последних между опорами работают на изгиб. При соединении бортового холостого шпангоута и флора кницей нижний конец шпангоута должен считаться жестко заделанным.

Концы холостых шпангоутов в узле пересечения палубы с бортом должны приниматься свободно опертыми.

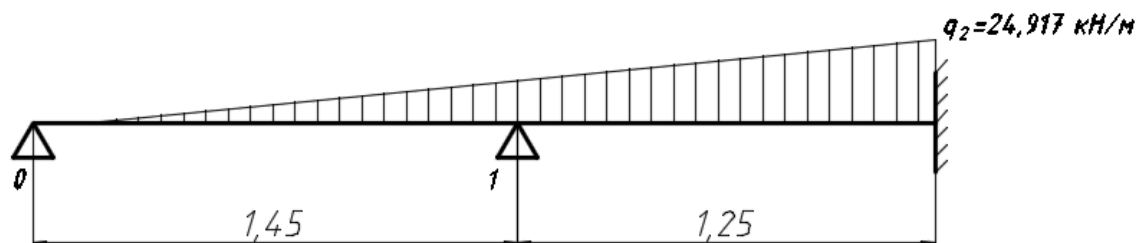


Рисунок 9.3 – Расчётная схема холостого шпангоута как многоопорной балки

Нагрузка на холостой шпангоут Q определяется по следующей формуле:

$$Q = 0,5 \cdot q_2 \cdot l \cdot a,$$

где $q_2 = \rho \cdot g \cdot l$ – давление воды на уровне нижней кромки холостого шпангоута;

$\rho = 1,0 \text{ т/м}^3$ – плотность воды;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$l = 2,54 \text{ м}$ – расстояние от свободной поверхности воды до нижней кромки холостого шпангоута;

$a = 0,55$ – поперечная шпация.

$$q_2 = 1 \cdot 9,81 \cdot 2,54 = 24,917 \text{ кН/м}$$

$$Q = 0,5 \cdot 24,917 \cdot 2,54 \cdot 0,55 = 17,4 \text{ кН}$$

$$q_1 = 1 \cdot 9,81 \cdot 1,29 = 12,655 \text{ кН/м}$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

1. Составим систему уравнений для раскрытия статической неопределимости балки по методу трёх моментов. За неизвестные принимаем изгибающие моменты M_1 и M_2 на опорах 1 и 2

$$l_{01} \cdot \underbrace{M_0}_0 + 2(l_{01} + l_{12}) \cdot M_1 + l_{12} \cdot M_2 = 6EJ \cdot [-W'_1(Q_{01}) + W'_1(Q_{12})]$$

$$l_{12} \cdot M_1 + 2l_{12} \cdot M_2 = 6EJ \cdot [-W'_2(Q_{12})]$$

2. Определим углы поворота концевых сечений балки от заданной нагрузки на каждом участке, заменяя все опоры на свободные жёсткие.

Участок 01

Схема для определения углов поворота на этом участке изображена на рисунке 9.4.

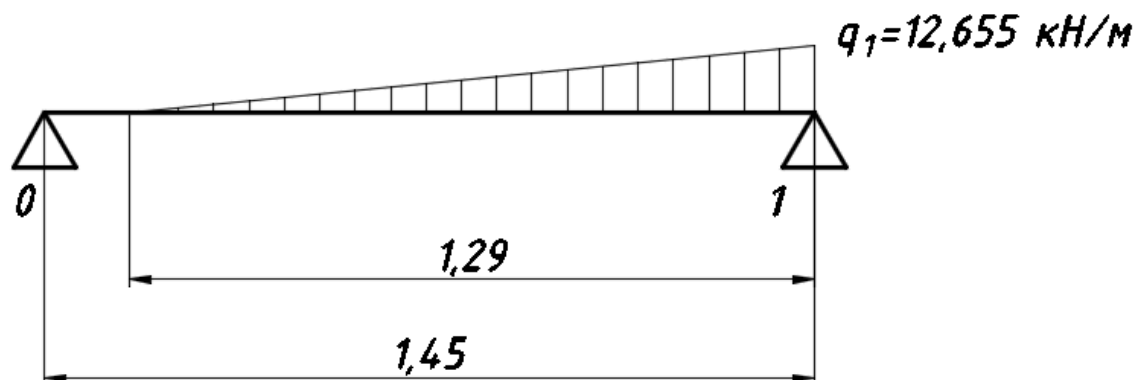


Рисунок 9.4 – Схема для определения углов поворота на участке 01

$$Q = \frac{1,29 \cdot 12,655}{2} = 8,162$$

$$W'_0(Q_{01}) = \frac{Ql^2b}{180 \cdot EJ} \cdot \left(7 + 6 \frac{a}{l} + 3 \frac{a^2}{l^2} \right)$$

$$W'_0(Q_{01}) = \frac{8,162 \cdot 1,45^2 \cdot 1,29}{180 \cdot EJ} \cdot \left(7 + 6 \frac{0,16}{1,45} + 3 \frac{0,16^2}{1,45^2} \right) = \frac{0,947}{EJ}$$

$$W'_1(Q_{01}) = - \frac{Ql^2b}{180 \cdot EJ} \cdot \left(8 + 9 \frac{a}{l} + 3 \frac{a^2}{l^2} \right)$$

$$W'_1(Q_{01}) = - \frac{8,162 \cdot 1,45^2 \cdot 1,29}{180 \cdot EJ} \cdot \left(8 + 9 \frac{0,16}{1,45} + 3 \frac{0,16^2}{1,45^2} \right) = - \frac{1,111}{EJ}$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Участок 12

Схема для определения углов поворота на этом участке изображена на рисунке 9.5

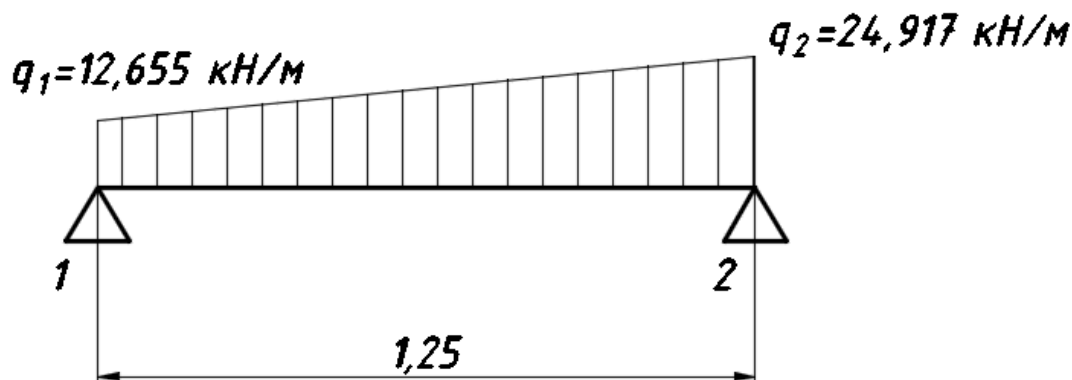


Рисунок 9.5 – Схема для определения углов поворота на участке 12

Так как на этом участке действует распределенная нагрузка в виде трапеции, ее необходимо разбить на 2 части – прямоугольную и треугольную. Первая часть нагрузки изображена на рисунке 9.6, вторая – на рисунке 9.7.

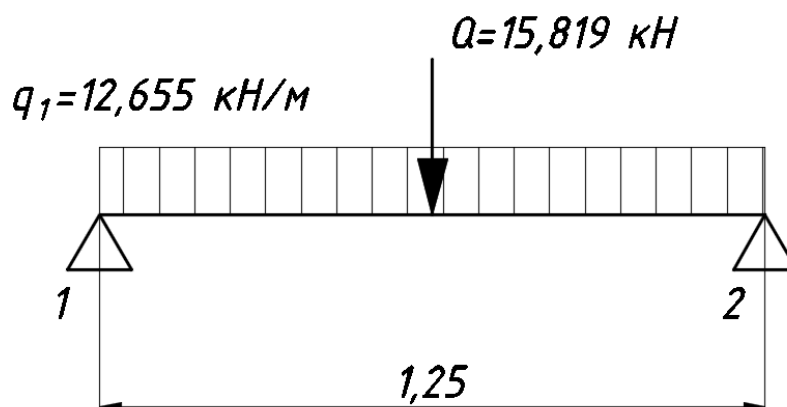


Рисунок 9.6 – Схема для определения углов поворота на участке 12 от первой части нагрузки

$$Q_{\text{пр}} = 12,655 \cdot 1,25 = 15,819 \text{ кН}$$

$$W'_1(Q_{12}) = \frac{Ql^2}{24 \cdot EJ} = \frac{15,819 \cdot 1,25^2}{24 \cdot EJ} = \frac{1,03}{EJ}$$

$$W'_2(Q_{12}) = -\frac{Ql^2}{24 \cdot EJ} = -\frac{1,03}{EJ}$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

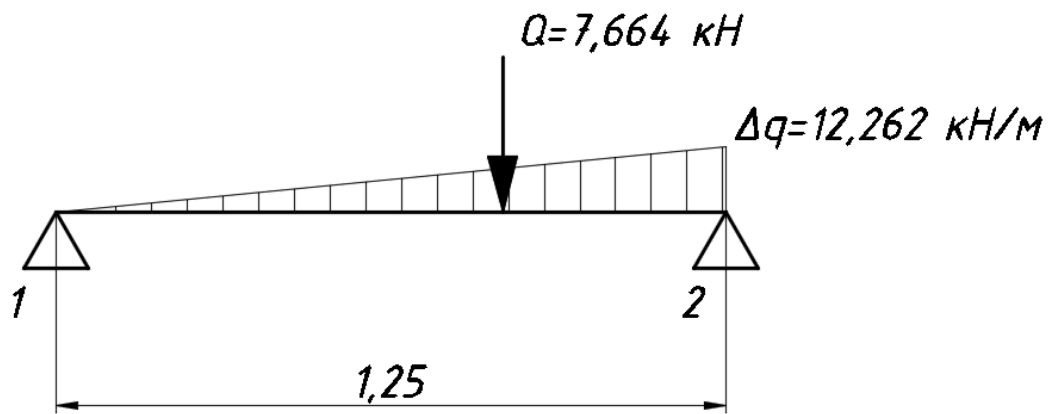


Рисунок 9.7 – Схема для определения углов поворота на участке 12 от второй части нагрузки

$$Q_{\text{тр}} = \frac{(24,917 - 12,655) \cdot 1,25}{2} = 7,664$$

$$W'_1(Q_{12}) = \frac{7}{180} \cdot \frac{Ql^2}{EJ} = \frac{7 \cdot 7,664 \cdot 1,25^2}{180 \cdot EJ} = \frac{0,466}{EJ}$$

$$W'_2(Q_{12}) = -\frac{2}{45} \cdot \frac{Ql^2}{EJ} = -\frac{2 \cdot 7,664 \cdot 1,25^2}{45 \cdot EJ} = -\frac{0,532}{EJ}$$

В итоге для участка 12 получим:

$$W'_1(Q_{12})_{\Sigma} = \frac{1,03}{EJ} + \frac{0,466}{EJ} = \frac{1,496}{EJ}$$

$$W'_2(Q_{12})_{\Sigma} = -\frac{1,03}{EJ} - \frac{0,532}{EJ} = -\frac{1,562}{EJ}$$

3. Подставим полученные значения в систему уравнений, составленную по методу трёх моментов.

$$1,45 \cdot \underbrace{M_0}_0 + 2 \cdot (1,45 + 1,25) \cdot M_1 + 1,25 \cdot M_2 = 6EJ \cdot \left[\frac{1,111}{EJ} + \frac{1,496}{EJ} \right]$$

$$1,25 \cdot M_1 + 2 \cdot 1,25 \cdot M_2 = 6EJ \cdot 1,562$$

Решая, получим:

$$M_0 = 0$$

$$M_1 = 2,294$$

$$M_2 = 2,601$$

4. Определим реактивные усилия на опорах балки и построим эпюры срезывающих сил и изгибающих моментов по участкам.

Подп. и дата
 Взам. инв. №
 Инв. № дубл.
 Подп. и дата
 Инв. № подп

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Расчётная схема, эпюра перерезывающих сил и изгибающих моментов для участка 01 изображены на рисунке 9.8, а для участка 12 – на рисунке 9.9. Решение для соответствующих участков приведено ниже.

Участок 01

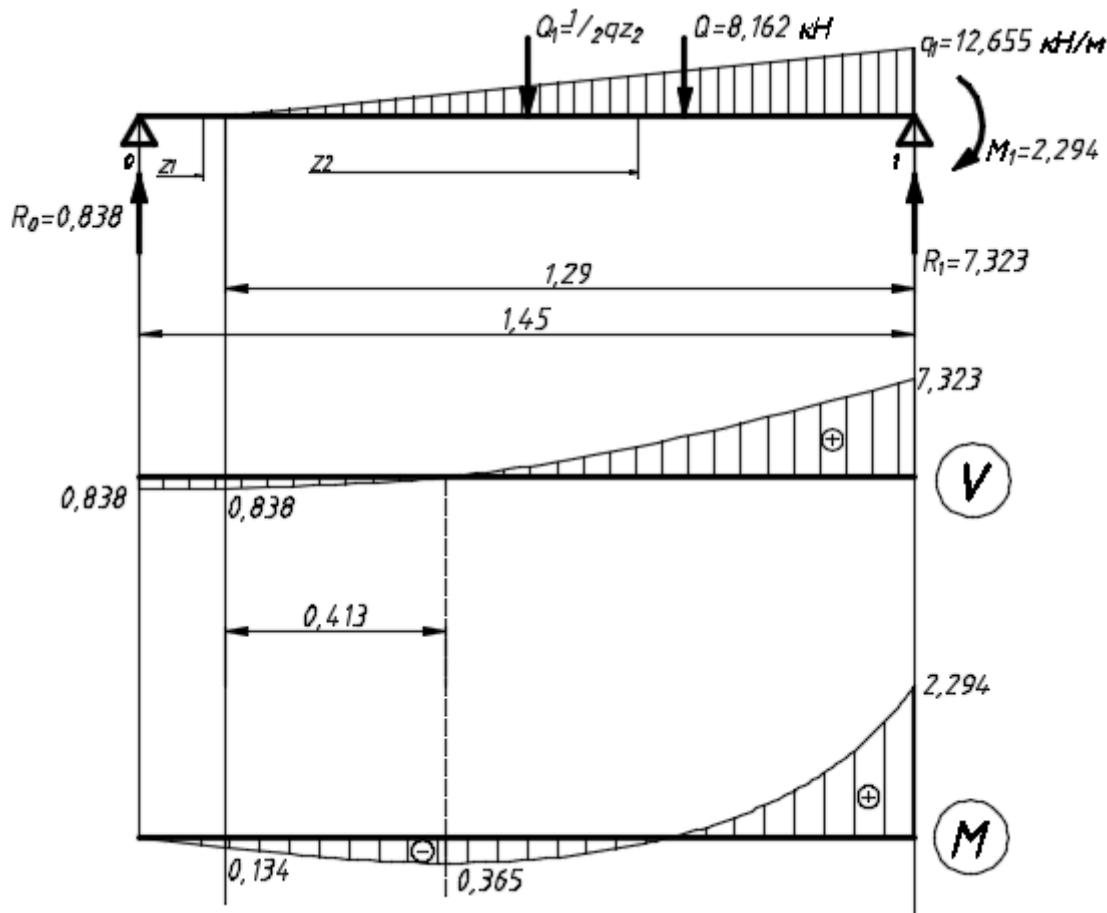


Рисунок 9.8 – Расчётная схема, эпюра перерезывающих сил и изгибающих моментов для участка 01

I. По правилам теоретической механики определим реакции на опорах и сделаем проверку

$$1) \sum m_{O_0} = 0$$

$$-2,294 - 8,162 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 1,29 + 0,16 \right) + R_1 \cdot 1,45 = 0$$

$$R_1 = \frac{2,294 + 8,162 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot 1,29 + 0,16 \right)}{1,45} = 7,323$$

$$2) \sum m_{O_1} = 0$$

$$-2,294 + 8,162 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1,29 - R_0 \cdot 1,45 = 0$$

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

$$R_0 = \frac{-2,294 + 8,162 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1,29}{1,45} = 0,838$$

3) Проверка: $\sum y(P_i) = 0$

$$0,838 - 8,162 + 7,323 = 0$$

$$0 = 0$$

II. По правилам строительной механики построим эпюры срезающих сил и изгибающих моментов, записав выражения на участке:

$$z_1: 0 \leq z_1 \leq 0,16$$

$$V_1 = -R_0 = -0,838$$

$$M_1 = -R_0 \cdot z_1 \Big|_0^{0,16} = -0,838 \cdot z_1 \Big|_0^{0,16}$$

$$M_1(0) = 0$$

$$M_1(0,16) = -0,838 \cdot 0,16 = -0,134$$

$$z_2: 0 \leq z_2 \leq 1,29$$

$$V_2 = -R_0 + \frac{q_1 \cdot z_2^2}{2 \cdot 1,29} \Big|_0^{1,29} = -0,838 + \frac{12,655 \cdot z_2^2}{2,58} \Big|_0^{1,29}$$

$$V_2(0) = -0,838$$

$$V_2(1,29) = -0,838 + \frac{12,655 \cdot 1,29^2}{2,58} = 7,324$$

$$M_2 = -R_0 \cdot (0,16 + z_2) + \frac{q_1 \cdot z_2^3}{6 \cdot 1,29} \Big|_0^{1,29} = -0,838 \cdot (0,16 + z_2) + \frac{12,655 \cdot z_2^3}{7,74} \Big|_0^{1,29}$$

$$M_2(0) = -0,134$$

$$M_2(1,29) = -0,838 \cdot (0,16 + 1,29) + \frac{12,655 \cdot 1,29^3}{7,74} = 2,294$$

Определим экстремум на эпюре изгибающего момента:

$$V = 0$$

$$-0,838 + \frac{12,655 \cdot z_0^2}{2,58} = 0$$

$$z_0 = 0,413$$

$$M^{extr}(z_0 = 0,413) = -0,838 \cdot (0,16 + 0,413) + \frac{12,655 \cdot 0,413^3}{7,74} = -0,365$$

Инва. № подл. Подп. и дата
Инва. № дубл. Подп. и дата
Взам. инв. № Подп. и дата

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

Участок 12

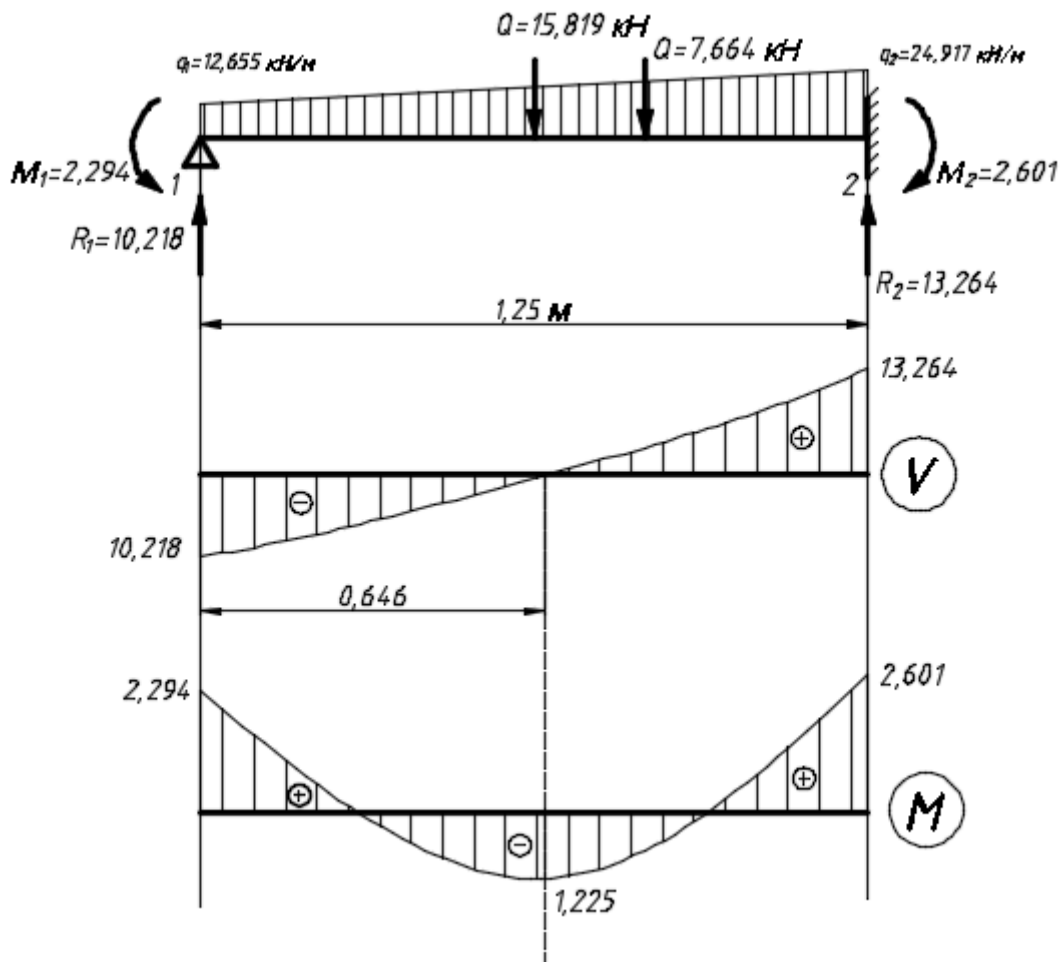


Рисунок 9.9 – Расчётная схема, эпюра перерезывающих сил и изгибающих моментов для участка 12.

I. По правилам теоретической механики определим реакции на опорах и сделаем проверку

$$1) \sum m_{O_1} = 0$$

$$2,294 - 2,601 - 15,819 \cdot 1,25 \cdot \frac{1}{2} - 7,664 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,25 + R_2 \cdot 1,25 = 0$$

$$R_2 = \frac{-2,294 + 2,601 + 15,819 \cdot 1,25 \cdot \frac{1}{2} + 7,664 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,25}{1,25} = 13,264$$

$$2) \sum m_{O_2} = 0$$

$$2,294 - 2,601 + 15,819 \cdot 1,25 \cdot \frac{1}{2} + 7,664 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1,25 - R_1 \cdot 1,25 = 0$$

$$R_1 = \frac{2,294 - 2,601 + 15,819 \cdot 1,25 \cdot \frac{1}{2} + 7,664 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1,25}{1,25} = 10,218$$

$$3) \text{ Проверка: } \sum y(P_i) = 0$$

$$10,218 - 15,819 - 7,664 + 13,264 = 0$$

$$0 = 0$$

II. По правилам строительной механики построим эпюры срезывающих сил и изгибающих моментов, записав выражения на участке

$$V = -R_1 + q \cdot z + \frac{\Delta q \cdot z^2}{2 \cdot 0,82} \Big|_0^{1,25} = -10,218 + 12,655 \cdot z + \frac{12,262 \cdot z^2}{2 \cdot 1,25} \Big|_0^{1,25}$$

$$V(0) = -10,218$$

$$V(1) = -10,218 + 12,655 \cdot 1,25 + \frac{12,262 \cdot 1,25^2}{2 \cdot 1,25} = 13,265$$

$$M = -R_1 \cdot z + M_1 + \frac{q \cdot z^2}{2} + \frac{\Delta q \cdot z^3}{6 \cdot 1} \Big|_0^{1,25}$$
$$= -10,218 \cdot z + 2,294 + \frac{12,655 \cdot z^2}{2} + \frac{12,262 \cdot z^3}{6 \cdot 1} \Big|_0^{1,25}$$

$$M(0) = 2,294$$

$$M(1,25) = -10,218 \cdot 1,25 + 2,294 + \frac{12,655 \cdot 1,25^2}{2} + \frac{12,262 \cdot 1,25^3}{6 \cdot 1} = 2,601$$

Определим экстремум на эпюре изгибающего момента:

$$V = 0$$

$$-10,218 + 12,655 \cdot z_0 + \frac{12,262 \cdot z_0^2}{2 \cdot 1,25} = 0$$

$$z_0 = 0,646$$

$$M^{extr}(z_0 = 0,646) = -10,218 \cdot 0,646 + 2,294 + \frac{12,655 \cdot 0,646^2}{2} + \frac{12,262 \cdot 0,646^3}{6 \cdot 1}$$
$$= -1,225$$

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инв. № дубл.

Подп. и дата

Инв. № подл.

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Лист

46

Итоговая эпюра перерезывающих сил и изгибающих моментов изображена на рисунке 9.10

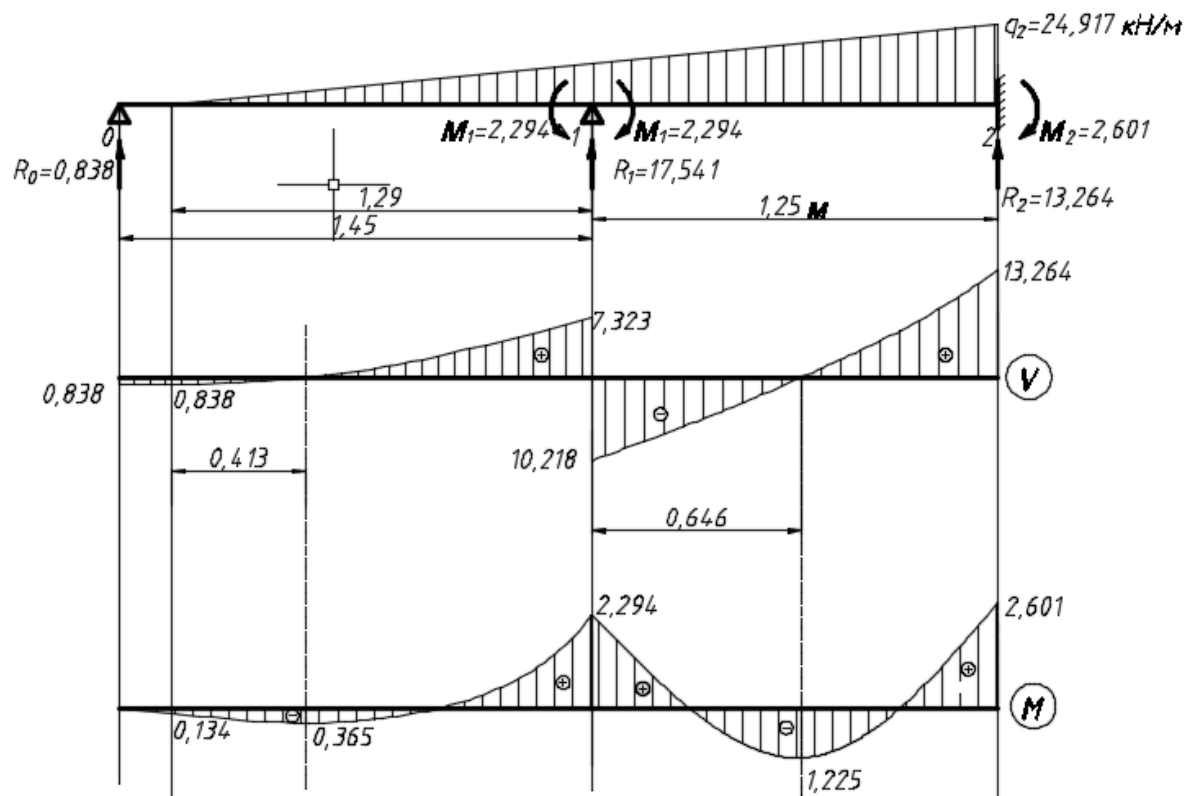


Рисунок 33 – Эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов холостого шпангоута борта

5. Проверим выполнение условия прочности.

$$\sigma^{max} = \frac{M^{max}}{W_x} \leq [\sigma] \quad (70)$$

где M^{max} – максимальный момент в пролёте или на опоре балки

$W_x = 45 \text{ см}^3 = 45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ – момент сопротивления холостого шпангоута борта с присоединённым пояском (полособульб №10)

В итоге имеем следующие максимальные напряжения:

$$\sigma_{оп}^{max} = \frac{2,294 \cdot 10^{-3}}{45 \cdot 10^{-6}} = 50,98 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{прол}^{max} = \frac{1,225 \cdot 10^{-3}}{45 \cdot 10^{-6}} = 27,22 \text{ МПа}$$

В соответствии с таблицей 2.2.68 [2] (пункт 9), норма допускаемых напряжений для поперечного холостого набора определяется следующим образом:

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подл. |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

$[\sigma] = 0,95 \cdot R_{eH} = 0,95 \cdot 235 = 223,25$ МПа – для опасного сечения, расположенного на опоре

$[\sigma] = 0,85 \cdot R_{eH} = 0,85 \cdot 235 = 199,75$ МПа – для опасного сечения, расположенного в пролёте

Таким образом, для опасного сечения, расположенного на опоре, имеем
 $50,98 \text{ МПа} < 223,25 \text{ МПа}$ – условие выполняется

А для сечения, расположенного в пролёте:

$27,22 \text{ МПа} < 199,75 \text{ МПа}$ – условие выполняется

9.3 Расчёт ребра жёсткости палубы на устойчивость

Для судов, с нагруженной палубой, при расчёте ребра жёсткости на устойчивость, необходимо в первую очередь выполнить расчёт этого ребра на прочность.

В соответствии с пунктом 2.2.49 [2], продольные балки (рёбра жёсткости) при продольной системе набора должны рассчитываться исходя из требований местной прочности, как балки, жёстко заделанные на рамном поперечном наборе (бимсах) при симметричной нагрузке.

Расчётная схема изображена на рисунке 9.11

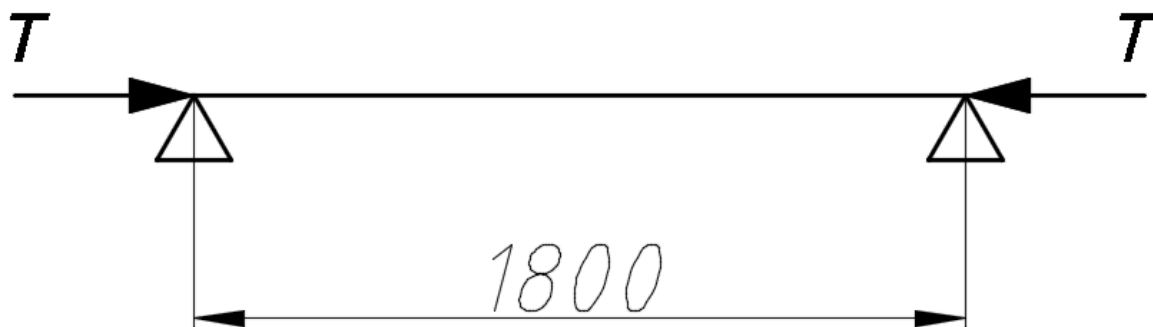


Рисунок 9.11 – Расчётная схема для расчёта ребра жёсткости днища на местную прочность

| |
|--------------|
| Подп. и дата |
| Взам. инв. № |
| Инв. № дубл. |
| Подп. и дата |
| Инв. № подп |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
|----|------|----------|-------|-----|

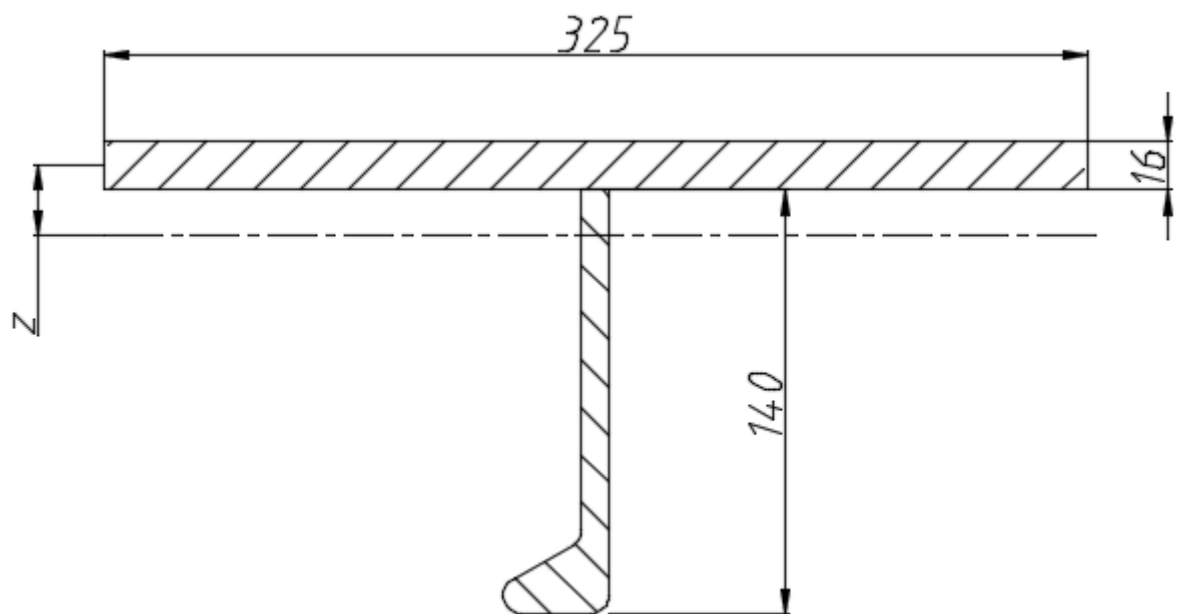


Рисунок 9.12 – Схема ребра жесткости палубы

Таблица 9.2 – Геометрические характеристик профиля ребра жесткости палубы

| Наименование и размеры связи, мм | Площадь f , см ² | Расстояние от оси z , см | Статический момент инерции fz , см ³ | Переносной момент инерции fz^2 , см ⁴ | Собственный момент инерции i , см ⁴ |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---|--|--|
| 140x35x9 | 16,85 | 9,35 | 157,55 | 1473,07 | 321 |
| Присоединенный поясок 325x16 | 52 | 0 | 0 | 0 | - |
| Суммы | A=68,85 | | B=157,55 | C=1794,07 | |

Отстояние нейтральной оси от условной:

$$z = \frac{B}{A} = \frac{157,55}{68,85} = 2,28 \text{ см}$$

Момент инерции площади сечения:

$$I_y = 2 \cdot (C - z \cdot B) = 2 \cdot (1794,07 - 2,28 \cdot 157,55) = 2869,712 \text{ см}^4$$

В соответствии с пунктом 2.2.74 [2], продольные балки (рёбра жёсткости) считаются свободно опёртыми на соответствующие поперечные связи (бимсы).

Эйлеровы напряжения при сжатии продольных рёбер определяются формулой 2.2.74 [4]:

$$\sigma_{\text{э}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{b^2 \cdot (f + a \cdot t)} \quad (72)$$

Где $E = 2 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости;

$J = 2869,712 \text{ см}^4 = 2869,712 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ – момент инерции площади поперечного сечения ребра с присоединённым пояском (полособульб №14);

$b = 1,8$ м – пролёт ребра;

$f = 16,85 \text{ см}^2 = 0,001685 \text{ м}^2$ – площадь поперечного сечения ребра без присоединённого пояса (полособульб №14б);

$a = 0,65$ м – расстояние между рёбрами (меньшая сторон пластины);

$t = 16 \text{ мм} = 0,016$ м – толщина пластины.

Таким образом, имеем эйлеровы напряжения при сжатии продольных рёбер палубы:

$$\sigma_{\text{э}} = \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2869,712 \cdot 10^{-8}}{1,8^2 \cdot (0,001685 + 0,65 \cdot 0,016)} = 1446,69 \text{ МПа}$$

Согласно пункту 2.2.71 [2], для сжатых стальных стержней критические напряжения определяются по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{кр}} = R_{eH} \quad \text{при } \sigma_{\text{э}} > 2,6 \cdot R_{eH}$$

$$\text{Так как } 2,6 \cdot R_{eH} = 2,6 \cdot 235 = 611 \text{ МПа}$$

в итоге имеем:

$$1446,69 \text{ МПа} > 611 \text{ МПа}$$

Поэтому $\sigma_{\text{кр}} = R_{eH}$. Из этого следует, что рассматриваемая балка сломается быстрее, чем потеряет устойчивость, а, следовательно, условие устойчивости ребра жёсткости палубы выполняется.

| | |
|--------------|--|
| Подп. и дата | |
| Взам. инв. № | |
| Инв. № дубл. | |
| Подп. и дата | |
| Инв. № подл. | |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
| | | | | |

Заключение

| | | | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Инв. № подл. | Подп. и дата | Инв. № дубл. | Взам. инв. № | Подп. и дата |
| | | | | |
| | | | | |

| | | | | |
|----|------|----------|-------|-----|
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- |
| | | | | |
| | | | | |

КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20

Список литературы

1. Волков, В.М. Прочность корпуса судна: методические указания к курсовой работе / В.М. Волков, А.Е. Жуков. – НГТУ. – Нижний Новгород, 2014. – 64 с.
2. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания: В 4-х тт. Т.2 / Российский Речной Регистр. – М.: По Волге, 2015. – 394 с.
3. Волков, В.М. Прочность корабля / В.М. Волков. – Нижегород. гос. техн. ун-т., Нижний Новгород, 1994. – 260 с.
4. Давыдов, В.В. Прочность судов внутреннего плавания. Справочник / В.В. Давыдов, Н.В. Маттес, И.Н. Сиверцев, И.И. Трянин. – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.

| | | | | | | | | | |
|--------------|------|--------------|-------|--------------|-----------------------------------|--------------|--|--------------|--|
| Инв. № подл. | | Подп. и дата | | Взам. инв. № | | Инв. № дубл. | | Подп. и дата | |
| | | | | | | | | | |
| Ли | Изм. | № докум. | Подп. | Да- | <i>КР-НГТУ-150303-16-ДП-19-20</i> | | | | |
| | | | | | Лист | | | | |
| | | | | | 52 | | | | |