

Расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе изготовления с использованием программы «ЛИРА»

Д.М. Гнатив✉, А.С. Комаров, О.В. Арестов

Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Российская Федерация

✉gnatif@bk.ru

Резюме

В статье представлен расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе ее производства с использованием программного комплекса «ЛИРА». Это необходимо главным образом для проверки прочности конструктивных элементов секции, обухов и тросов при кантовке при ее изготовлении. Уделяется внимание моделированию граничных условий, в том числе закреплению обухов и распределению массовых нагрузок, а также учитываются особенности программного обеспечения, например, косвенное задание модуля упругости через параметр жесткости EI_y . Для верификации модели предварительно выполнены аналитические расчеты тавровых балок по классическим формулам сопротивления материалов. Сравнение результатов ручных вычислений и данных, полученных в программе «ЛИРА», показало расхождение менее 5 %, что подтверждает корректность принятых допущений и конечно-элементной модели. Анализ позволил определить районы концентрации максимальных напряжений и величины прогибов, которые не превышают допустимые пределы по нормативным документам. Установлены усилия, действующие на элементы крепления, что помогло обосновать выбор конструктивных решений и технологических параметров. Результаты расчета продемонстрировали высокую эффективность программного комплекса «ЛИРА» в инженерных задачах, следовательно, его применение обеспечит достоверное прогнозирование поведения конструкции под монтажными нагрузками. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации технологической оснастки, а также с целью снижения рисков и повышения безопасности на производстве. Представленная методика подтверждает перспективность интеграции программы «ЛИРА» в инженерную практику проектирования и изготовления судовых конструкций.

Ключевые слова

напряженно-деформированное состояние, судно-снабженец, кантовка, программа «ЛИРА», деформации, прочность, тавровые элементы, эпюры напряжений

Для цитирования

Гнатив Д.М. Расчет напряженно-деформированного состояния днищевой секции судна-снабженца при кантовке в процессе изготовления с использованием программы «ЛИРА» / Д.М. Гнатив, А.С. Комаров, О.В. Арестов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2025. № 2 (86). С. 120–130. DOI 10.26731/1813-9108.2025.2(86).120-130.

Информация о статье

поступила в редакцию: 29.05.2025 г.; поступила после рецензирования: 09.06.2025 г.; принята к публикации: 10.06.2025 г.

Calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the process of manufacturing using the program «LIRA»

D.M. Gnativ✉, A.S. Komarov, O.V. Arestov

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok, the Russian Federation

Abstract

The article presents a calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the course of production using the LIRA software package. This calculation is necessary to check the strength of the structural elements of the section, casings and cables during edging in the manufacturing process. Attention is paid to the modelling of boundary conditions, including the fastening of casings and the distribution of mass loads, and software features are also taken into account, such as the indirect setting of the modulus of elasticity through the stiffness parameter EI_y . To verify the model, analytical calculations of brand blocks were previously performed using classical formulas for the resistance of materials. A comparison of the results of manual calculations and the data obtained in the LIRA program showed a discrepancy of less than 5 %, which confirms the correctness of the accepted assumptions and the finite element model. The analysis allowed us to determine the areas of maximum stress concentration and deflection values that do not exceed the permissible limits according to regulatory documents. The forces acting on the fastening elements were established, which made it possible to justify the choice of design solutions and technological parameters. The calculation results demonstrated the high efficiency of the LIRA software package in engineering tasks,

providing reliable prediction of the behaviour of the structure under installation loads. The data obtained can be used to optimize technological equipment, reduce risks and increase safety during production. The presented methodology confirms the prospects of integrating the LIRA program into the engineering practice of designing and manufacturing ship structures.

Keywords

stress-strain state, supply vessel, edging, program «LIRA», deformations, strength, brand elements, stress diagrams

For citation

Gnativ D.M., Komarov A.S., Arestov O.V. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dnishchevoi seksii sudna-snabzhentsa pri kantovke v protsesse izgotovleniya s ispol'zovaniem programmy «LIRA» [Calculation of the stress-strain state of the bottom section of the supply vessel during edging in the process of manufacturing using the program «LIRA»]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2025. No. 2 (86). Pp. 120–130. DOI: 10.26731/1813-9108.2025.2(86).120-130.

Article Info

Received: May 29, 2025; Revised: June 9, 2025; Accepted: June 10, 2025.

Введение

В современном судостроении точное определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструктивных элементов судов является ключевым аспектом обеспечения их безопасности, надежности и долговечности [1]. Особенно актуальна эта задача для судов специального назначения, таких как суда снабженцы, которые играют критически важную роль в морском сообществе, включая транспортировку грузов, техники и персонала на удаленные объекты, например, в нефтегазовой отрасли. Эти суда подвергаются сложным динамическим и статическим нагрузкам как в процессе эксплуатации, так и на этапах производства, что требует глубокого анализа их прочностных характеристик [2].

Одним из наиболее ответственных этапов в производстве крупных судовых секций является процесс кантовки (наклонения или подъема) конструкций для их монтажа и сборки. На данном этапе днищевая секция судна-снабженца испытывает значительные воздействия, включая изгибающие моменты, напряжения сдвига и деформации [3]. Неправильная оценка этих нагрузок может привести к деформациям, трещинам или даже критическим повреждениям, что негативно скажется на безопасности судна и экономической эффективности производства.

В рамках данной проблемы существует множество методов расчета, реализованных в современных программных комплексах, которые становятся неотъемлемой частью проектирования и анализа судовых конструкций. Однако многие из данных программ созданы зарубежными компаниями и не предоставляют свои услуги нашей отрасли. Программа «ЛИРА»,

разработанная отечественной компанией «ЛИРА софт», для моделирования и расчета строительных конструкций, способна решать некоторые специфические судостроительные задачи. Ее использование позволяет детально моделировать поведение материалов, учитывать нелинейности и геометрические особенности, а также прогнозировать потенциальные риски на ранних этапах проектирования.

Целью данной статьи является демонстрация расчетов НДС днищевой секции судна-снабженца при кантовке с использованием программного комплекса «ЛИРА» и анализ влияния различных факторов (форма сечения, распределение нагрузок, материалы) на прочностные характеристики конструкции. Результаты исследования могут быть использованы для снижения рисков повреждений и повышения эффективности конструктивных решений.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенный подход обеспечивает снижение затрат на испытания и корректировку конструкций. Он также соответствует современным стандартам безопасности, что особенно важно в условиях роста требований к энергоэффективности, экологичности и надежности морской техники.

Построение секции в программе «ЛИРА»

Для выполнения инженерного проектирования поперечной секции 0801 судна-снабженца требуется создать упрощенную геометрическую модель, основанную на замене сложных форм элементов конструкции на приближенные геометрические формы [4]. Такой подход позволяет минимизировать вычислительную сложность задачи, сохраняя при этом

правильность представления ключевых физических характеристик (рис. 1).

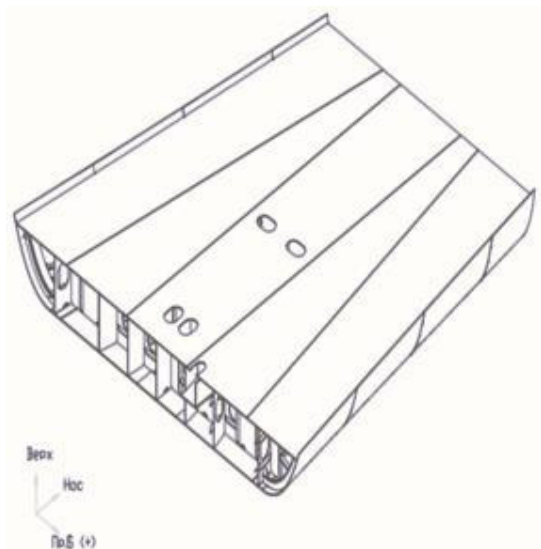


Рис. 1. Вид сечения в «корабельном» положении
Fig. 1. View of the section in the «ship» position

В рамках данного расчета поперечная секция разбивается на четыре тавровые конструкции, каждая из которых характеризуется индивидуальными размерными параметрами поперечного сечения. Разделение на подобные элементы осуществляется с учетом локальных нагрузок, распределения напряжений и требований к жесткости конструкции (рис. 2) [5]. Под жесткостью конструкции принимаем ее способность сохранять свою первоначальную форму и расположение под воздействием нагрузок.

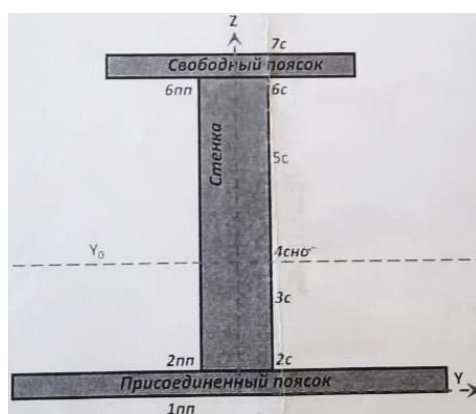


Рис. 2. Сечение двутавра
Fig. 2. I-beam section

Разбиение на четыре тавра различного профиля обеспечивает возможность проведения детализированного анализа механических

свойств. На основе методов теории упругости и сопротивления материалов проводится анализ НДС поперечного сечения, позволяющий определить геометрические характеристики сечения, включая моменты сопротивления, а также выявить критические точки с максимальными напряжениями. Эти параметры важны для оценки жесткости конструкции при динамических и статических нагрузках, возникающих в процессе эксплуатации судна [6]. Разделение секции на тавровые элементы также обеспечивает возможность верификации полученных результатов с использованием специализированного программного обеспечения, например, системы «ЛИРА». Проверка расчетов в таких программах позволяет идентифицировать потенциальные несоответствия между аналитическими моделями и численными расчетами, что обеспечивает повышение надежности проектирования. Особое внимание при этом уделяется согласованности данных по распределению напряжений, упругим деформациям и нагрузкам, что напрямую влияет на безопасность и долговечность конструкции судна-снабженца [7].

Таким образом, применение геометрически упрощенной модели с декомпозицией сложных сечений на типовые тавровые профили, характерные для набора корпуса судна, позволяет ускорить расчеты без значительной потери точности. Это обеспечивает корректную оценку прочностных и жесткостных характеристик, что является обязательным условием при проектировании судовых конструкций. Этот подход позволяет интегрировать результаты анализа в комплексные системы моделирования, включая динамическое поведение судна, нагрузки от гидродинамических воздействий и другие факторы, что обеспечивает всестороннюю оценку надежности конструкции. Однако для построения эпюры нормальных напряжений необходимо взять за основу конструкции пластины, а не стержни (тавровые профили) как в нашем случае. Пример расчета основных характеристик двутавра, необходимых для проверки расчетов программы «ЛИРА», представлены в табл. 1 [8].

В таблице e – отстояние центральной оси от оси сравнения (см), рассчитываемое по [9]:

$$e = A/B,$$

где A – сумма площади всех связей; B – сумма статических моментов связей; I_y – момент инерции (см⁴), рассчитываемый по формуле:

Таблица 1. Расчет характеристик двутавра
Table 1. Calculation of I-beam characteristics

Наименование связи Name connections	Размер оси Y, мм Y-axis size, mm	Размер оси Z, мм Z-axis size, mm	Площадь F , см ² Area F , cm ²	Расстояние z , центр тяжести от оси ОО, см Distance z , center gravity from the OO axis, cm	Статический момент, см ³ Static moment, cm ³	Переносной момент инерции, см ⁴ Portable moment inertia, cm ⁴	Собственный момент инерции, см ⁴ Own moment inertia, cm ⁴
Присоединенный поясок Attached belt	184	15	27,6	0,65	17,9	11,7	5,2
Стенка Wall	9	1 400	126	71,5	9 009,0	644 143,5	205 800,0
Свободный поясок Loose belt	184	10	18,4	142	2 612,8	371 017,6	1,5
<i>Итого</i> <i>Total</i>			$A = 172$	–	$B = 11 639,7$	–	$C = 1 220 979,5$
e	I_y	$\sum z$	z_1	z_2	$z_{\max}$	$z_{\min}$	$W_{\min}$ $W_{\max}$
67,67	433 284,4	142,5	67,67	74,83	74,83	67,67	5 790,48 6 402,63

$$I_y = C - A \cdot e^2,$$

где C – сумма всех переносных моментов инерции и собственных моментов инерции [10];
 $\sum z$ – общая высота профиля тавра:

$$\sum z = (z_{n.n} + z_{cm} + z_{св.л}) / 10.$$

Расстояние $z_1 = e$, а $z_2 = \sum z - e$ [11, 12];
 $W_{\min}$ – минимальный момент сопротивления (см³), рассчитываемый по формуле:

$$W_{\min} = I_y / z_{\max},$$

где $W_{\max}$ – максимальный момент сопротивления, см³, рассчитываемый по формуле [13, 14]:

$$W_{\max} = I_y / z_{\min},$$

После проведения расчета основных характеристик приступаем к построению секции в ПК «ЛИРА». Для этого нам потребуется схема крепления при проведении кантовки (рис. 3 и 4).

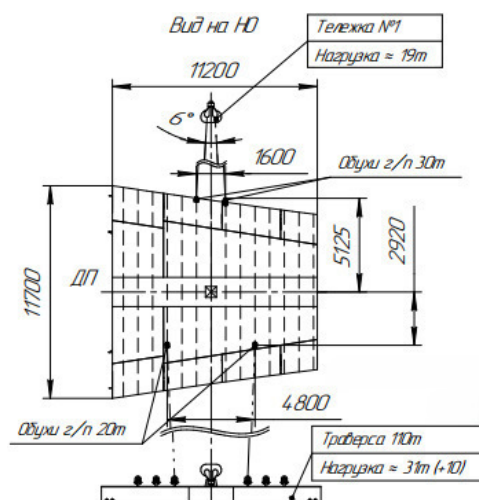


Рис. 3. Схема строповки в блоке корпусных производств краном грузоподъемностью 120 т
Fig. 3. Slinging diagram for a hull production unit using a 120-ton crane

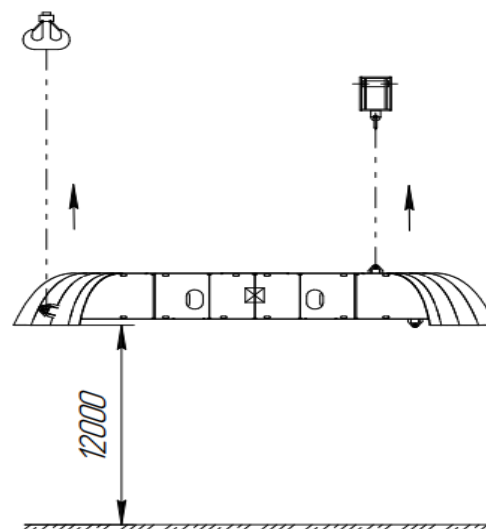


Рис. 4. Схема кантовки в блоке корпусных производств краном грузоподъемностью 120 т
Fig. 4. The tilting scheme in the hull production block with a crane with a lifting capacity of 120 tons

Перед построением упрощенной секции также ознакомимся с правилами и планом проведения кантовки.

1. Оградить участок такелажных работ предупреждающими табличками «Проход запрещен».

2. Первый этап (проверка прочности приварки обухов с последующим подъемом секции 0801):

- использовать 4 скобы грузоподъемностью 35 т с диаметром пальца не более 55 мм; стропы канатные для тележки № 1 – 2 шт. грузоподъемностью не ниже 30 т ($L = 10\,000$ мм), для траверсы (грузоподъемность 110 т) – 2 шт. грузоподъемностью не ниже 25 т ($L = 6\,000$ мм);

- поднять секцию за четыре обуха грузоподъемностью 20 т и за два обуха грузоподъемностью 30 т краном грузоподъемностью 120 т на высоту 200–300 мм от плоской части стенда, выдержать 15 мин., опустить;

- выполнить визуальный осмотр по РД5.121-85 [15];

- разрушение и деформация конструкций и сварных швов не допускаются;

- в районе третьего пролета блока корпусных производств поднять секцию на 12 000 мм для дальнейшей кантовки согласно схеме.

3. Второй этап (кантовка секции 0801):

- плавно опускать гак центральной тележки с одновременным горизонтальным движением в сторону траверсы грузоподъемностью 110 т, медленно начинать проворачивать секцию в вертикальное положение;

- при достижении вертикального положения относительно центра массы застопорить центральную тележку;

- отстропить обухи грузоподъемностью 20 т центральной тележки согласно схеме;

- перевести гак центральной тележки на противоположную сторону и застропить за обухи грузоподъемностью 20 т;

- плавно поднимая гак центральной тележки с одновременным горизонтальным движением, медленно начинать поворачивать секцию в вертикальное положение;

- плавно опустить секцию на стенд или водоопреснительную установку.

Для определения точного расположения элементов крепления (обухов) в поперечной секции судна-снабженца необходимо использовать данные схемы строповки, которая показывает информацию о распределении нагрузок, геометрических ограничениях и конструктивных особенностях. Эти сведения позволяют

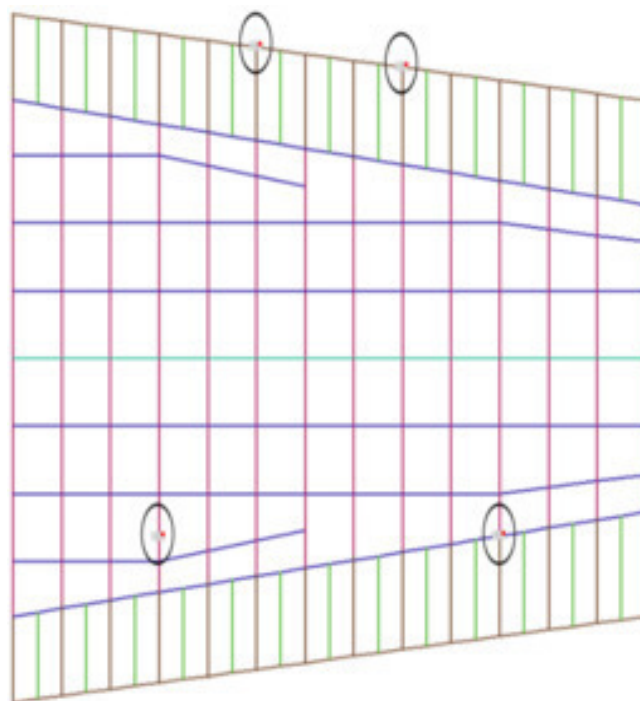


Рис. 5. Изображение днищевой секции (геометрически упрощенный вид)

Fig. 5. Image of the bottom section (geometrically simplified view)

определить координаты установки обухов, обеспечивающих механическую стабилизацию секции. Полученные данные визуализируются на упрощенной геометрической модели секции в масштабе 1:1 (рис. 5), где элементы крепления обозначаются специальными маркерами – окружностями с прямоугольниками в центре.

Двухтавровые балки и другие несущие элементы в упрощенной модели представлены различными цветовыми сегментами, что упрощает визуальное различение их функциональных ролей и взаимосвязей. Важно отметить, что в процессе моделирования исключаются конструктивные вырезы и технологические разрывы в сечениях, так как специализированное программное обеспечение (например, ЛИРА) не поддерживает их прямое отображение. Это упрощение допустимо при условии, что его влияние на общую механическую жесткость считается незначительным по сравнению с основными нагрузками. После интеграции всех элементов в единую систему координат проводится симуляция продольных и поперечных связей, что очень важно для оценки распределения напряжений и деформаций. Для анализа НДС днищевой секции моделируется равномерная нагрузка, эквивалентная весу собственной конструкции (49 671 кг) [16]. При этом

ключевую роль играет корректировка материальных свойств, так как программа «ЛИРА», разработанная в основном для строительных задач, не поддерживает прямое указание модуля упругости E . Для компенсации этого ограничения используется подход: модуль упругости вводится через параметр жесткости конструкции:

$$EI_y = E \cdot A,$$

где E – модуль упругости материала, равный $2,06 \cdot 10^{11}$ Па [17].

Результаты нагружения секции

После ввода всех параметров и нажатия на кнопку расчета программа формирует деформированную модель секции (рис. 6), демонстрирующую смещения элементов под действием нагрузок.

Визуализация включает сравнение исходной геометрии с деформированной, что позволяет оценить масштабы продольных и поперечных перемещений. Дополнительно, через функцию «Эпюры перерезывающих сил» программа генерирует распределение поперечных сил по секции (рис. 7), где максимальное значение (142 кН) фиксируется в точке крепления – это участок, требующий отдельного внимания или специального контроля.

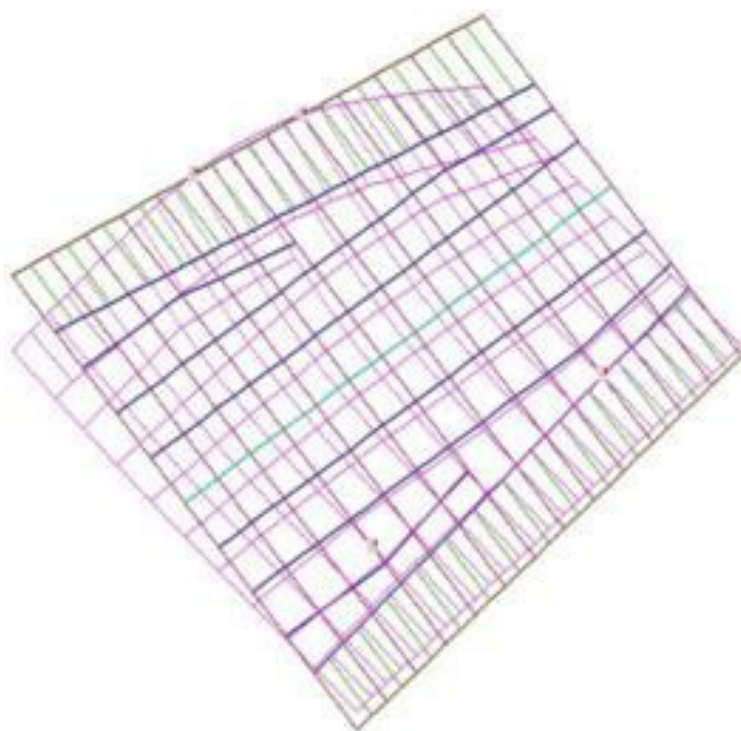


Рис. 6. Деформированная модель секции

Fig. 6. Deformed model of the section

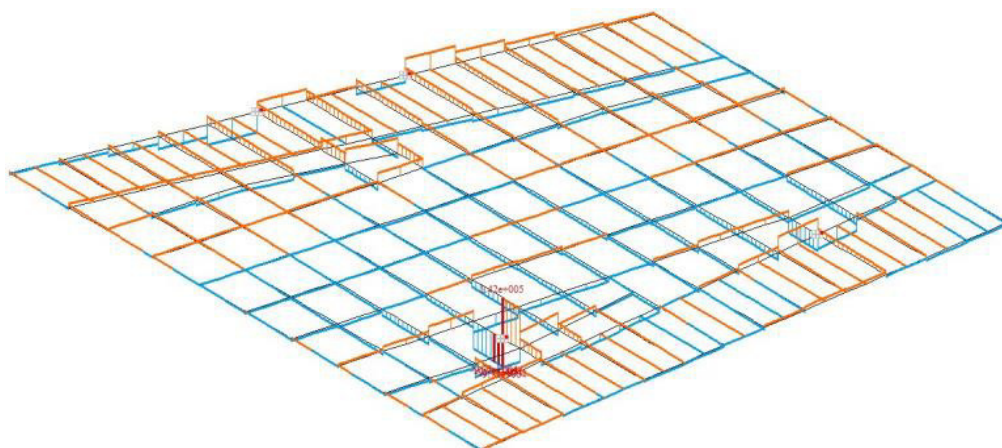
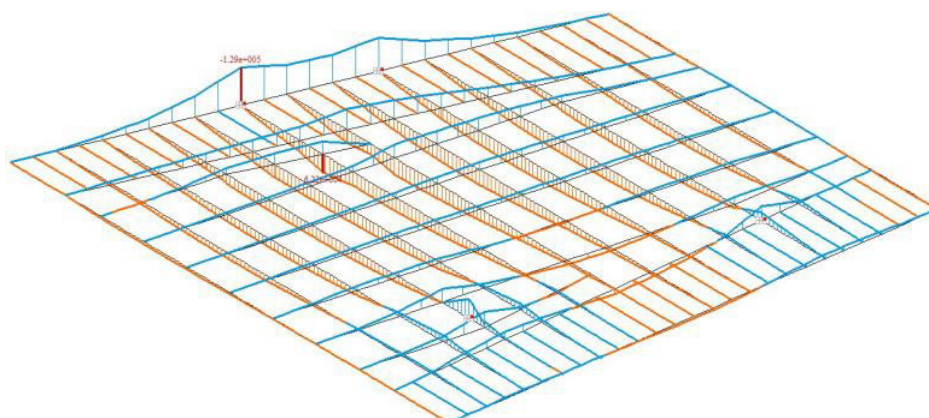
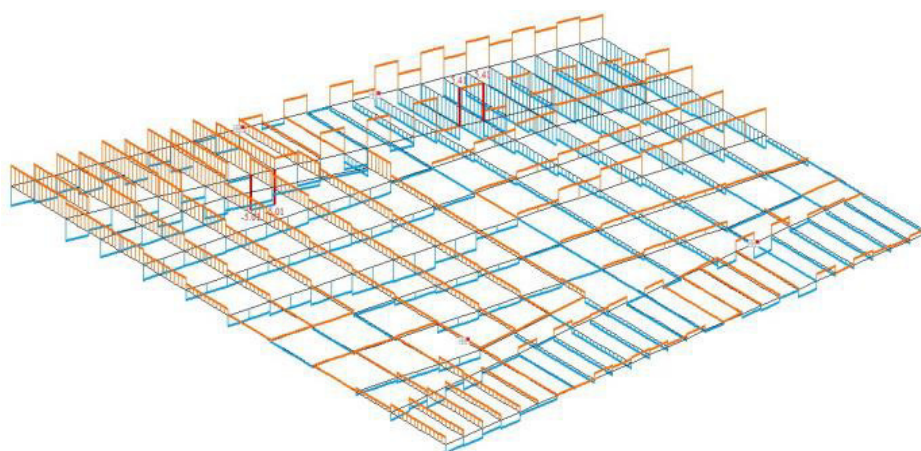


Рис. 7. Эпюры перерезывающих сил

Fig. 7. Shear force diagrams

Для оценки изгибающих моментов используется инструмент «Эпюры изгибающих моментов» (рис. 8 и 9), который демонстрирует зоны максимального напряжения в сечении, что необходимо для выбора материалов и профилей

элементов. Наконец, программа моделирует эпюру прогибов (рис. 10), отображающую максимальные деформации секции под нагрузкой.

Рис. 8. Эпюры изгибающих моментов M_y Fig. 8. Bending moment diagrams M_y Рис. 9. Эпюры изгибающих моментов M_x Fig. 9. Bending moment diagrams M_x

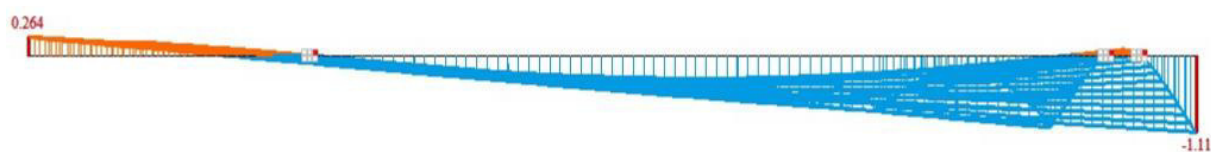


Рис. 10. Эпюра прогибов

Fig. 10. Sag diagram

Полученные данные формируют комплексную картину воздействий, позволяя определить «узкие места» конструкции, оценить резервы прочности и уточнить параметры в местах крепления обухов. Такой подход обеспечивает интеграцию экспериментальных данных с теоретическими расчетами, что важно для обеспечения безопасности конструкции [18]. Этапы расчета демонстрируют зависимость точности результатов от выбора методов упрощения, адаптации программных ограничений и учета теоретических нагрузок. В данном случае игнорирование конструктивных вырезов допустимо при условии, что их влияние на общую жесткость системы не превышает допустимые погрешности.

Важно отметить, что в рамках стандартных процедур автоматизированного проектирования результаты численного моделирования силовых конструкций и исследования их НДС часто характеризуются неопределенной точностью: разработчики, как правило, не располагают полной информацией о величине ошибки и точности получаемых результатов [2, 7].

Причина незначительного расхождения может быть связана с упрощениями, внесенными

ми в численную модель (например, игнорирование микротрещин, технологических разъемов или нелинейных эффектов), которые в ручных расчетах компенсируются через дополнительные коэффициенты запаса прочности. Однако, учитывая, что отклонение остается в рамках 5 %, это не влияет на конечные выводы о безопасности и жесткости конструкции. На основе этих данных была сформирована аналитическая табл. 2, включающая сравнительные показатели для ключевых параметров [19].

Заключение

Проведенный расчет продемонстрировал эффективность применения программного комплекса «ЛИРА» для оценки НДС днищевой секции судна-снабженца при кантовке. Расчет, основанный на геометрическом упрощении модели и разделении секции на четыре тавровых элемента с индивидуальными характеристиками, позволил достоверно определить критические точки деформаций и нагрузок, что подтверждается совпадением результатов численного моделирования с ручными расчетами в пределах 5 %. Это подтверждает соответствие расчета инженерным стандартам.

Таблица 2. Сводные результаты расчетов

Table 2. Summary of calculation results

Показатель Indicator	Параметры Parameters	
Прогибы Z , мм Sag Z , mm	$Z_{\max} = 0,264$	$Z_{\min} = -1,11$
Напряжения, МПа Stresses, MPa	$\sigma_{\max} = 24,3$	$\tau_{\max} = 49,3$
Изгибающие моменты M , кН · м Bending moments M , kN · m	$M_{y\max} = 62,2$	$M_{y\min} = -129$
Перерезывающие силы Q , кН Shearing forces Q , kN	$Q_{z\max} = 142$	$Q_{z\min} = -97,7$
Моменты сопротивления W , м ³ Moments of resistance W , m ³	$W_{\max} = 0,0064$	$W_{\min} = 0,00579$
Напряжения допускаемые, МПа Permissible stresses, MPa	$\sigma = 235$	$\tau = 135$

Основные выводы по работе:

1. Определение критических зон: максимальная концентрация перерезывающих сил (142 кН) и изгибающих моментов (до 129 кН · м). Это может использоваться для усиления конструкции (при необходимости) в этих участках, например, за счет изменения профиля тавров или введения дополнительных элементов фиксации.

2. Резервы прочности: максимальные напряжения (24,3 МПа) и деформации (1,11 мм) не превышают допустимых значений ($\sigma = 235$ МПа, $\tau = 135$ МПа) [20]. Однако резервы прочности в критических зонах требуют дальнейшего анализа для повышения долговечности.

3. Адаптация программных ограничений: учет модуля упругости через параметр жесткости (EI_y) показал свою эффективность, несмотря на специфику комплекса «ЛИРА», ориентированного на строительные задачи. Это открывает возможности для расширения его применения в судостроении с учетом корректировок.

Результаты расчетов могут быть использованы в следующих целях:

– уточнение схем строповки с учетом распределения нагрузок;

– визуализация деформаций через эпюры напряжений и прогибов для минимизации рисков повреждений на этапе производства;

– рекомендаций по выбору материалов и геометрических параметров для снижения деформаций.

Однако исследование имеет ограничения, связанные с игнорированием конструктивных вырезов и технологических разрывов в модели. Эти упрощения, как показано, не влияют на общие выводы, но требуют учета в дальнейших расчетах для повышения точности.

Перспективы развития:

– внедрение нелинейных моделей для учета микротрещин и динамических эффектов;

– адаптация расчетов для других типов судов и сложных конструкций;

– совершенствование алгоритмов программного комплекса «ЛИРА» для прямого учета модуля упругости в судостроительных задачах.

Таким образом, предложенный расчет обеспечивает полную оценку жесткости конструкций, снижает риски дефектов и затрат на испытания, что соответствует требованиям современного судостроения к безопасности и энергоэффективности.

Список литературы

1. НД 2-030101-045 Руководство по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов. Введ. : 2021-05-01. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021. 11 с.
2. Душевский Д.А., Манухин В.А. Влияние килеватости и конструкции днища на напряженно-деформированное состояние кия при доковании судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-2 (61). С. 47–52.
3. Кулеш В.А. Конструкция корпуса судов в курсовых и выпускных квалификационных работах. Владивосток : ДВФУ, 2018. 61 с.
4. К оптимизации формы и конструкций корпуса судна с системных позиций / В.Г. Бугаев, Дам Ван Тунг, М.В. Китаев и др. // Вестник Инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. 2023. № 4 (57). С. 24–38.
5. Беляева З.В., Кудрявцев С.В. Расчет и проектирование элементов металлических конструкций. Екатеринбург : УрФУ, 2019. 136 с.
6. Окладникова Е.В. Сопротивление материалов. Основы теории, примеры расчета и варианты заданий. Благовещенск : ДальГАУ, 2014. 128 с.
7. Доронин С.В., Рогалев А.Н. Организация вычислительного процесса контроля точности численных оценок напряженно-деформированного состояния // Безопасность и живучесть технических систем : материалы и доклады V Всерос. конф. Красноярск, 2015. Т. 1. С. 163–167.
8. Фролова О.А., Полякова Е.В. Расчет плоских стержневых конструкций. Оренбург : ОГУ, 2018. 120 с.
9. Остапенко О.Ю. МДК.02.01. Конструкторская подготовка производства в судостроительной организации (раздел 2). Феодосия : филиал Керч. гос. морск. технолог. ун-та, 2021. 22 с.
10. Момент инерции сечения // Inner Engineering : сайт. URL : <https://inner.su/services/moment-inertsii-secheniya/> (дата обращения 19.04.2025).
11. ГОСТ 14249-89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Введ. : 1990-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1989. 56 с.
12. Мамченко В.О. Расчет балок на прочность и жесткость при прямом плоском изгибе. СПб. : ИТМО, 2014. 48 с.
13. Беликов Г.И. Геометрические характеристики поперечных сечений стержней. Волгоград : ВГАСУ, 2015. 57 с.
14. Козловский А.Э. Расчет элементов конструкций на сдвиг и кручение. Иваново : ИГХТУ, 2016. 100 с.
15. Власов С.В., Грибов К.В. Технология судостроения. Ч. 1. Организация судостроительного производства. Владивосток : ДВФУ, 2016. 167 с.

16. Саруев А.Л., Рудаченко А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов. Томск : ТПУ, 2021. 146 с.
17. Ширшиков А.С., Лянденбургский В.В., Белоковылский А.М. Оценка надежности технических систем. Пенза : ПГУАС, 2015. 240 с.
18. Ролле В.Е., Красильников А.А., Комаров И.А. Конструирование и расчет автомобилей и тракторов. Расчет рычагов и шарниров подвески АТС. СПб. : СПбПУ, 2022. 96 с.
19. Гарькин И.Н. Теоретические исследования составных неразрезных подкрановых балок // Региональная архитектура и строительство. 2018. № 2 (35). С. 100–104.
20. Фролов А.М., Иванов А.В. Проектирование конструкций судов внутреннего плавания. Нижний Новгород : ВГАВТ, 2013. 99 с.

References

1. ND 2-030101-045 Rukovodstvo po otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sudovykh korpusnykh konstrukttsii na osnove metoda konechnykh elementov [ND 2-030101-045 Guidelines for assessing the stress-strain state of ship hull structures based on the finite element method]. Saint Petersburg: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva Publ., 2021. 11 p.
2. Dushevskii D.A., Manukhin V.A. Vliyanie kilevatosti i konstrukttsii dnishcha na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kilya pri dokovanii sudna [Influence of the bottom keel angle and bottom structure on the stress-strain state of the keel when the ship is docked]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine intellectual technologies], 2023, no 3-2 (61), pp. 47–52.
3. Kulesh V.A. Konstruktsiya korpusa sudov v kursovykh i vypusnykh kvalifikatsionnykh rabotakh [Ship hull design in course and final qualifying papers]. Vladivostok: DVFU Publ., 2018. 61 p.
4. Bugaev V.G., Tung Dam Wan, Kitaev M.V., Novikov V.V. K optimizatsii formy i konstrukttsii korpusa sudna s sistemnykh pozitsii [To optimize the shape and structures of the ship's hull from a systemic perspective]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University], 2023, no 4 (57), pp. 24-38.
5. Belyaeva Z.V., Kudryavtsev S.V. Raschet i proektirovanie elementov metallicheskh konstrukttsii [Calculation and design of elements of metal structures]. Ekaterinburg: UrFU Publ., 2019. 136 p.
6. Okladnikova E.V. Soprotivlenie materialov. Osnovy teorii, primery rascheta i varianty zadaniy [Resistance of materials. Fundamentals of theory, calculation examples and task options]. Blagoveshchensk: Dal'GAU Publ., 2014. 128 p.
7. Doronin S.V., Rogalev A.N. Organizatsiya vychislitel'nogo protsessa kontrolya tochnosti chislennykh otsenok napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Organization of the computational process for controlling the accuracy of numerical estimates of the stress-strain state]. *Materialy i doklady V Vserossiiskoi konferentsii «Bezopasnost' i zhivuchest' tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the V All-Russian Conference «Safety and survivability of technical systems»]. Krasnoyarsk, 2015, Vol. 1, pp. 163–167.
8. Frolova O.A., Poyarkova E.V. Raschet ploskikh sterzhnevnykh konstrukttsii [Calculation of flat rod structures]. Orenburg: OGU Publ., 2018. 120 p.
9. Ostapenko O.Yu. MDK.02.01. Konstruktorskaya podgotovka proizvodstva v sudostroitel'noi organizatsii (razdel 2) [MDK.02.01. Design preparation of production in a shipbuilding organization (section 2)]. Feodosiya: filial Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2021. 22 p.
10. Moment inertsii secheniya (elektronnyi resurs) [The moment of inertia of the section (electronic resource)]. Available at: <https://inner.su/services/moment-inertsii-secheniya/> (Accessed April 19, 2025).
11. GOST 14249-89 Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost' [State Standard 14249-89 Vessels and apparatus. Norms and methods of strength calculation]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 1989. 56 p.
12. Mamchenko V.O. Raschet balok na prochnost' i zhestkost' pri pryamom ploskom izgibe [Calculation of beams for strength and rigidity in direct flat bending]. Saint Petersburg: ITMO Publ., 2014. 48 p.
13. Belikov G.I. Geometricheskie kharakteristiki poperechnykh sechenii sterzhnei [Geometric characteristics of cross-sections of rods]. Volgograd: VGASU Publ., 2015. 57 p.
14. Kozlovskii A.E. Raschet elementov konstrukttsii na sdvig i kruchenie [Calculation of structural elements for shear and torsion]. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi khimiko-tekhnologicheskii universitet Publ., 2016. 100 p.
15. Vlasov S.V., Gribov K.V. Tekhnologiya sudostroeniya. Ch. 1. Organizatsiya sudostroitel'nogo proizvodstva [Technology of shipbuilding. Part 1. Organization of shipbuilding production]. Vladivostok: DVFU Publ., 2016. 167 p.
16. Saruev A.L., Rudachenko A.V. Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov [Researches of the stress-strain state of pipelines]. Tomsk: TPU Publ., 2021. 146 p.
17. Shirshikov A.S., Lyandenburskii V.V., Belokovyl'skii A.M. Otsenka nadezhnosti tekhnicheskikh sistem [Reliability assessment of technical systems]. Penza: PGUAS Publ., 2015. 240 p.
18. Rolle V.E., Krasil'nikov A.A., Komarov I.A. Konstruirovaniye i raschet avtomobilei i traktorov. Raschet ryuchagov i sharnirov podveski ATS [Design and calculation of cars and tractors. Calculation of the levers and hinges of the ATS suspension]. Saint Petersburg: SPbPU Publ., 2022. 96 p.
19. Gar'kin I.N. Teoreticheskie issledovaniya sostavnykh nerazreznnykh podkranovykh balok [Theoretical researches of composite continuous crane beams]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction], 2018, no 2 (35), pp. 100–104.
20. Frolov A.M., Ivanov A.V. Proektirovaniye konstrukttsii sudov vnutrennego plavaniya [Designing structures of inland navigation vessels]. Nizhny Novgorod: VГАVТ Publ., 2013. 99 p.

Информация об авторах

Гнатив Денис Михайлович, кафедра технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток; e-mail: gnatif@bk.ru.

Комаров Артем Сергеевич, кафедра технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток; e-mail: joe_vice777@mail.ru.

Арестов Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и организации судостроения и судоремонта, Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток; e-mail: arestov@msun.ru.

Information about the authors

Denis M. Gnativ, Department of Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok; e-mail: gnatif@bk.ru.

Artem S. Komarov, Department of Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok; e-mail: joe_vice777@mail.ru.

Oleg V. Arestov, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Shipbuilding and Ship Repair, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevel'skoi, Vladivostok; e-mail: arestov@msun.ru.