

УДК: 629.123
EDN QIERWU

РАЗРАБОТКА ДИАГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБОРА БОРТОВЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ СУДОВ С ШИРОКИМ РАСКРЫТИЕМ ПАЛУБЫ

Т.А. Макарова, ассистент, Дальневосточный федеральный университет, 690922 Россия, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10, e-mail: makarova_tanya_2000@mail.ru

Суда с широким раскрытием палубы, в частности контейнеровозы, играют существенную роль в современной морской логистике и транспортировке грузов. Однако разработка и эксплуатация этих судов сопряжены с рядом технических сложностей, таких как проблемы прочности и жесткости корпусов. Традиционные системы набора перекрытий формируют каркас из брусев, пересекающихся под прямыми или близкими к ним углами, что создает систему прямоугольных рамок. Такие рамки обладают относительно низкой жесткостью при сдвиговых деформациях, возникающих при кручении корпуса судна.

В этом контексте актуальность работы обусловлена предложением увеличить сдвиговую жесткость перекрытий корпуса введением в набор перекрытий диагональных элементов. Такую систему набора можно назвать диагональной. Она превращает прямоугольные рамки в треугольные, значительно увеличивая их сопротивление сдвигу.

Работа направлена на разработку диагональной системы набора бортового перекрытия на судах с широким раскрытием палубы для обеспечения жесткости и прочности корпуса в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: диагональные элементы набора, кручение корпуса судна, конструкция бортового перекрытия, вес элементов набора, прочность и жесткость перекрытия при кручении, узел соединения рамных балок, метод конечных элементов.

Для цитирования: Макарова Т.А. Разработка диагональной системы набора бортовых перекрытий судов с широким раскрытием палубы / Т.А. Макарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 96 — 110. — EDN QIERWU.

DEVELOPMENT OF A DIAGONAL FRAMING SYSTEM FOR THE SIDE PLATING ON SHIPS WITH A WIDE DECK OPENING

T.A. Makarova, Assistant, Far Eastern Federal University, 690922 Russia, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10, e-mail: makarova_tanya_2000@mail.ru

Ships with wide deck openings play a crucial role in modern maritime logistics and cargo transportation. However, the design and operation of such vessels are associated with several technical challenges, including issues related to the strength and rigidity of their hulls. Traditional deck framing systems form a structure consisting of beams intersecting at right or nearly right angles, creating a system of rectangular frames. These frames exhibit relatively low stiffness under shear deformations that occur during hull torsion.

In this context, the relevance of the work is determined by the proposal to increase the shear stiffness of the hull plating by introducing diagonal elements into the framing system. Such a framing system can be referred to as diagonal. It transforms rectangular frames into triangular ones, significantly enhancing their resistance to shear.

The work is aimed at developing a diagonal framing system for the side plating on ships with wide deck openings, ensuring stiffness and strength in accordance with the requirements of the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: ship hull torsion, diagonal framing elements, side plating structure, framing element weight, plating strength and stiffness under torsion, frame beam connection node, finite element method.

For citation: Makarova T.A. Development of a diagonal framing system for the side plating on ships with a wide deck opening. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 96 — 110. EDN QIERWU. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Суда с широким раскрытием палубы, такие как контейнеровозы, занимают важное место в современной морской логистике. Однако их проектирование и эксплуатация сопряжены с рядом технических сложностей, особенно в части обеспечения прочности и жесткости корпуса.

С точки зрения строительной механики, корпус судна с широким раскрытием палубы представляет собой тонкостенный брус открытого профиля. Касательные напряжения и особенно углы закручивания, которые возникают при кручении такого бруса, могут быть при прочих равных условиях на порядки больше напряжений и углов закручивания для бруса закрытого профиля, каким является, например, корпус танкера.

Анализ данных о повреждениях конструкций судов с широким раскрытием палубы позволяет констатировать, что основной причиной их возникновения является низкая сдвиговая жесткость перекрытий и корпуса в целом при кручении. В результате наблюдаются повреждения узлов корпусных конструкций, разрушение замков люковых закрытий и, как следствие, разгерметизация трюмов.

Существующие системы набора перекрытий определяют каркас корпуса, состоящий из брусев, пересекающихся под прямыми или близкими к ним углами. Этот каркас, представляющий собой систему прямоугольных рам, имеет относительно низкую жесткость при сдвиговых деформациях перекрытий корпуса судна, возникающих при его кручении. Это связано с тем, что при сдвиге брусья каркаса работают на изгиб. При этом их изгиб происходит в плоскости перекрытия, в которой их сечения обладают минимальной изгибной жесткостью.

В этом контексте актуальность работы обусловлена предложением увеличить сдвиговую жесткость перекрытий корпуса введением в их набор диагональных элементов. Такую систему набора можно назвать диагональной (ДСН). Она трансформирует прямоугольные рамы в треугольные, значительно увеличивая их сопротивление сдвигу. В отличие от прямоугольных рам, где брусья работают в основном на изгиб, в треугольных рамах брусья при сдвиге подвергаются в основном растяжению-сжатию, что существенно повышает сдвиговую жесткость перекрытий.

Вопросы конструирования и исследования прочностных и технологических аспектов диагональной системы набора более 5 лет являются одним из направлений научной деятельности сотрудников Департамента морской техники и транспорта Политехнического института ДВФУ.

Некоторые вопросы, посвященные диагональной системе бортового набора, рассмотрены в работах [1 — 3, 5, 6].

Целью исследования является обоснование эффективности диагональной системы набора бортовых перекрытий судов с широким раскрытием палубы (контейнеровозов) при обеспечении их жесткости и прочности в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства [7] (далее Правила).

Для достижения поставленной цели были рассмотрены следующие задачи:

- разработаны расчетные схемы бортовых перекрытий без диагональных элементов и при их установке;
- определены характеристики набора бортовых перекрытий с поперечной и продольной системами набора по Правилам [7] с диагональными элементами и без них;
- исследована местная прочность и весовые характеристики бортовых перекрытий с диагональными элементами и без них;
- с использованием упрощенной методики и МКЭ исследована прочность и жесткость бортовых перекрытий при кручении с диагональными элементами и без них;
- разработан узел соединения разновысоких балок с диагональным элементом набора и исследована его прочность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполненный анализ конструктивных особенностей корпусов контейнеровозов в составе мирового флота лег в основу выбора конструкции бортовых перекрытий исследуемого гипотетического судна.

Основой контейнерного флота являются экономически более эффективные крупные суда. Для решения поставленных задач в рамках данной работы в качестве модели выбрано сравнительно небольшое гипотетическое судно длиной 120 м.

Необходимые в рамках исследования размеры и характеристики гипотетического расчетного судна с широким раскрытием палубы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики расчетного судна с широким раскрытием палубы

Наименование	Обозначение	Величина	Размерность
Длина между перпендикулярами	$L_{пп}$	120	м
Ширина	B	18	м
Высота борта	H	10	м
Осадка	T	7,5	м
Водоизмещение	D	11624	т
	V	11340	м ³
Коэффициент общей полноты	δ	0,7	—
Скорость	V_s	16	уз.

Такой выбор сделан из следующих соображений. Длина судна 120 м является условной границей рациональности использования поперечной или продольной систем набора. Это связано с эффективностью той или иной системы набора при обеспечении общей продольной прочности.

Поскольку в некоторых аспектах предполагается сравнительный анализ результатов исследования при кручении аналогичных корпусов, но набранных один по продольной, а другой по поперечной системам набора, была выбрана именно эта «пограничная» длина, и на основе осредненных статистических данных — все прочие размерения.

РАЗРАБОТКА ДИАГОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБОРА БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ

Для указанного судна разработаны схемы бортовых перекрытий при продольной и поперечной системах набора с диагональными элементами набора и без них.

Бортовые перекрытия набраны в соответствии с требованиями Правил [7]. Расчетная схема набора базового бортового перекрытия с поперечной системой набора приведена на рис. 1, а схема набора бортового перекрытия с продольной системой набора — на рис. 2.

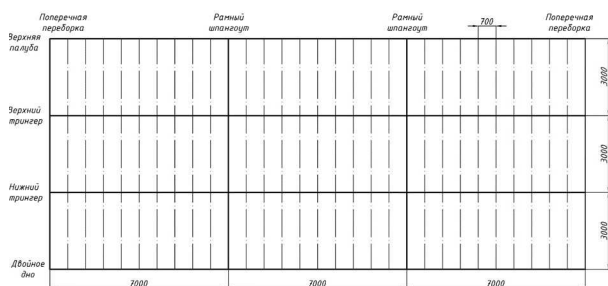


Рис. 1. Расчетная схема набора базового бортового перекрытия, набранного по поперечной системе набора

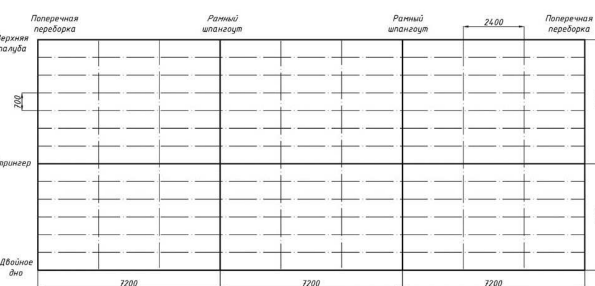


Рис. 2. Расчетная схема набора бортового перекрытия, набранного по продольной системе набора с диагональными элементами

Для сопоставления результатов расчета рассмотрены два варианта профилей основного набора: полосу по ГОСТ 21937-76 и неравнополочный уголок по ГОСТ 8510-86. Полученные размеры элементов перекрытия, набранного по продольной системе набора, приведены в табл. 2. Аналогичные данные для поперечной системы набора приведены в [2].

Таблица 2

Элементы перекрытия при продольной системе набора без ДЭ

Часть борта	Элементы набора перекрытия	
Верхняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 12
		Шпангоуты № 206
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора $L 125 \times 80 \times 12$
		Шпангоуты $L 180 \times 60 \times 10$
Нижняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 146
		Шпангоуты № 246
		Бортовой стрингер $\frac{115 \times 12}{730 \times 12}$
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора $L 140 \times 65 \times 7$
		Шпангоуты $L 200 \times 100 \times 9$
		Бортовой стрингер $\frac{125 \times 12}{740 \times 12}$

Процедура расчета размеров балок основного набора и рамных связей для перекрытия с диагональными элементами аналогична расчету для перекрытия без диагональных элементов, но с учетом того, что расчетные пролеты балок основного набора, пересекаемых диагональными элементами, изменяются вдоль длины панели перекрытия при поперечной системе набора и вдоль высоты панели — при продольной системе.

Для поперечной системы набора [2] длина пролетов балок основного набора меняется в соответствии с рис. 3, так как диагональный элемент является промежуточной опорой для балок основного набора.

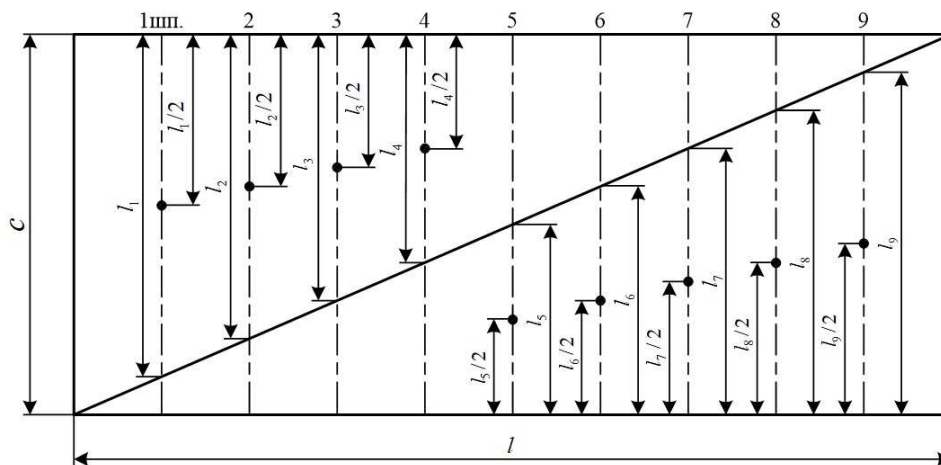


Рис. 3. К определению пролетов балок основного набора и точки, на уровне которых определяется расчетное давление [2]

Балки основного набора делятся диагональным элементом на две неравные по длине части. Требуемый Правилами момент сопротивления их сечений определяется по большей для данной балки величине пролета между бортовыми стрингерами и диагональным элементом. Вследствие изменения длины пролета в соответствии с Правилами меняется расчетная ширина присоединенного пояса обшивки.

В работе [2] приведены данные о размерах балок основного набора с учетом установки диагональных элементов при расчетной схеме набора бортового перекрытия при поперечной системе набора, приведенной на рис. 4 [2].

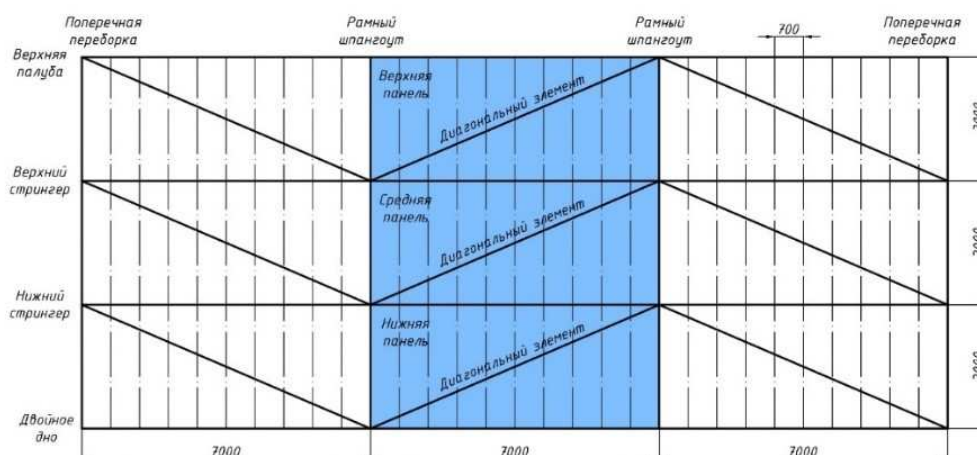


Рис. 4. Расчетная схема бортового перекрытия набранного по поперечной системе набора с диагональными элементами [2]

Расчеты были выполнены для средней панели перекрытия (выделена цветом).

При продольной системе набора длина балок основного набора меняется в соответствии с рис. 5.

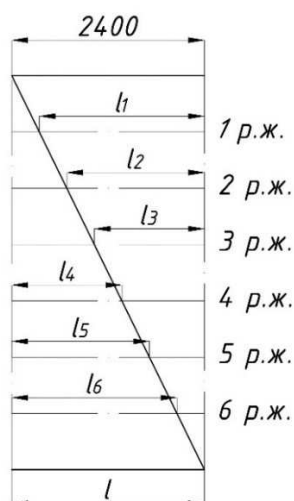


Рис. 5. К определению пролетов балок основного набора и точки, на уровне которых определяется расчетное давление

Процедура определения размеров балок основного набора и рамных связей для перекрытия с диагональными элементами, схема которого приведена на рис. 5, аналогична процедуре для перекрытия с поперечной системой набора.

В табл. 3 приведены размеры балок основного набора двух профилей, а также бортовых стрингеров и диагональных элементов для бортового перекрытия с диагональными элементами, расчетная схема которого приведена на рис. 6.

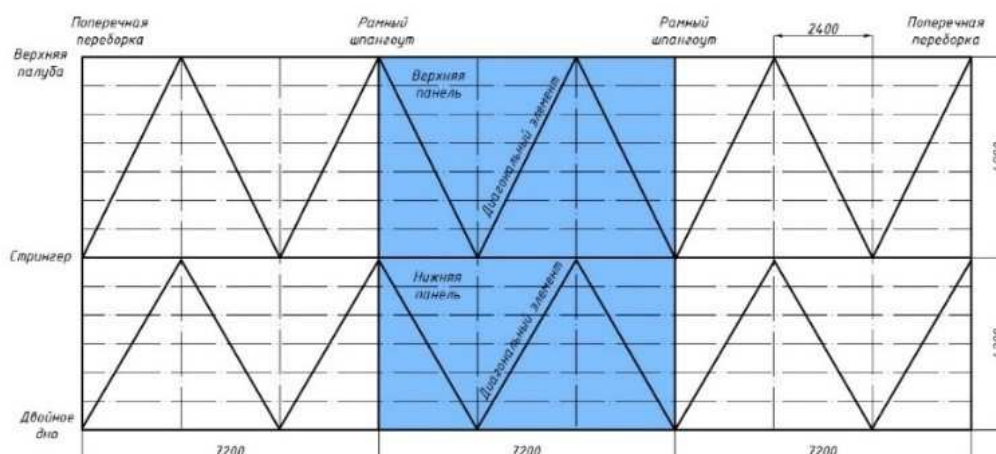


Рис. 6. Расчетная схема бортового перекрытия, набранного по продольной системе набора с диагональными элементами

Таблица 3

Элементы перекрытия при продольной системе набора с диагональными элементами

Часть борта	Элементы набора перекрытия	
Верхняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 10
		Шпангоуты № 206
		Диагональная рамная связь $\frac{110 \times 10}{300 \times 8}$
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора L 125 × 80 × 10
		Шпангоуты L 180 × 50 × 10
		Диагональная рамная связь $\frac{100 \times 10}{324 \times 8}$
Нижняя панель перекрытия	Балки основного набора из полособульба	Балки основного набора № 14а
		Шпангоуты № 246
		Бортовой стрингер $\frac{105 \times 10}{580 \times 10}$
		Диагональная рамная связь $\frac{148 \times 10}{425 \times 8}$
	Балки основного набора из неравнополочного уголка	Балки основного набора L 120 × 50 × 8
		Шпангоуты L 200 × 90 × 10
		Бортовой стрингер $\frac{112 \times 10}{592 \times 12}$
		Диагональная рамная связь $\frac{154 \times 10}{412 \times 10}$

Дополнительные исследования местной прочности бортового перекрытия не требуются, так как подобранные балки перекрытия уже удовлетворяют требованиям Правил [7].

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ МЕСТНОЙ ПРОЧНОСТИ

Расчет массы элементов набора перекрытия выполнялся для балок из прокатных профилей как произведение массы погонного метра на длину балки, а для сварных — как сумма масс стенки и полки в виде полос требуемой толщины, ширины и длины при принятой плотности стали 7800 кг/м^3 .

Для расчетов методом конечных элементов применялся программный продукт SolidWorks Simulation.

И при поперечной, и при продольной системах набора расчет производится для средней по длине части перекрытия, ограниченной двумя рамными шпангоутами.

Выполнены расчеты по оценке влияния унификации балок основного набора на массу всего перекрытия при местной прочности, обеспеченной в соответствии с требованиями Правил. Рассчитано несколько конструктивных вариантов перекрытия.

Подробный анализ для бортового перекрытия с диагональными элементами, набранного по поперечной системе набора, приведен в работе [2].

На рис. 7 для сравнения с результатами аналогичного анализа для перекрытия, набранного по продольной системе набора, приведена диаграмма результатов исследования по расчету масс элементов набора бортового перекрытия с поперечной системой набора [2]. Расчеты выполнены при различных вариантах унификации размеров балок основного набора.

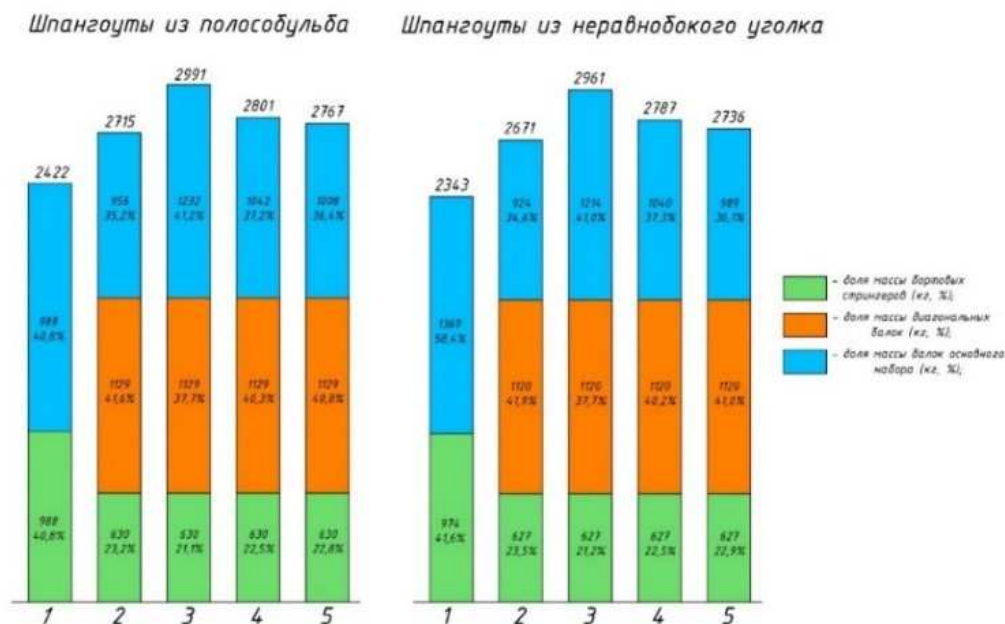


Рис. 7. Соотношение масс элементов набора бортового перекрытия, содержащего диагональные рамные связи, при различных вариантах унификации размеров балок основного набора [2]:
 1 — перекрытие без диагональных связей; 2 — 5 — перекрытия с диагональными связями без унификации набора (2), при одном (3), двух (4) и трех (5) типоразмерах балок основного набора

В табл. 4 приведена графическая интерпретация вариантов комбинаций набора бортового перекрытия с диагональными рамными связями, набранного по продольной системе набора, при различных уровнях унификации профилей балок, а на рис. 8 — соответствующая диаграмма результатов исследования масс элементов набора.

Таблица 4

Графическая интерпретация вариантов комбинаций основного набора бортового перекрытия при продольной системе набора для различных уровней унификации профилей балок

Варианты основного набора	БДЭ	При наличии диагональных элементов			
		По расчету при минимальном весе	Унифицированные		
			3 типоразмера	2 типоразмера	1 типоразмер
Основной набор из полособульба по ГОСТ21937-76					
Основной набор из неравнополочного уголка по ГОСТ 8510-86					

Шпангоуты из полособульба

Шпангоуты из неравнобокого уголка

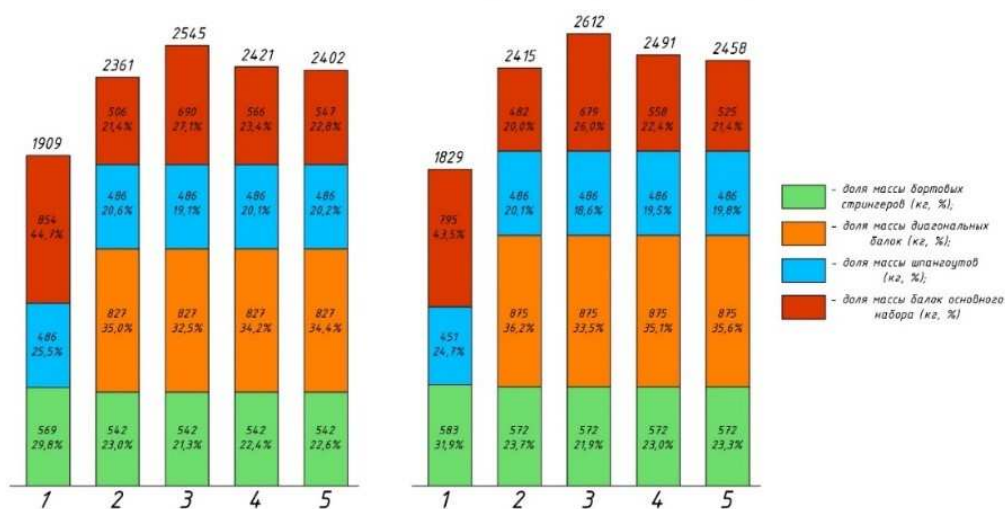


Рис. 8. Соотношение масс элементов набора бортового перекрытия, содержащего диагональные рамные связи, при различных вариантах унификации размеров балок основного набора:

1 — перекрытие без диагональных связей; 2 — 5 — перекрытия с диагональными связями без унификации набора (2), при одном (3), двух (4) и трех (5) типоразмерах балок основного набора

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с поперечной системой набора наблюдается снижение массы основного набора при увеличении числа групп унифицированных размеров балок. За базу сравнения принята масса неунифицированного набора, являющаяся минимально возможной (все балки изготовлены из одинакового профиля разного размера из условия их минимального веса). Если все балки имеют одинаковое сечение — один типоразмер, то их масса на 28,9 % и 31,4 % больше массы

минимального весового варианта. При двух типоразмерах превышение массы составляет 9,0 % и 12,6 %, а при трех — 5,4 % и 7,0 %. Первое значение соответствует балкам набора, изготовленным из полосульба, а второе — из неравнополочного уголка. При этом общая масса перекрытия при трех типоразмерах балок основного набора за счет значительного веса диагональных элементов увеличивается на 14,2 % и 16,7%.

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с продольной системой набора также наблюдается снижение массы основного набора с увеличением числа групп унифицированных размеров балок (табл. 4). Аналогичные показатели: при одном типоразмере, масса на 36,5 % и 40,9 % больше массы минимального весового варианта. При двух типоразмерах превышение массы составляет 11,9 % и 15,7 %, а при трех — 8,1 % и 9,0 %. При этом общая масса перекрытия увеличивается на 25,8 % и 34 %.

Видно, что при продольной системе набора увеличение массы основного набора при установке диагональных элементов несколько больше, чем при поперечной системе набора, и почти в два раза больше увеличение массы всего перекрытия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ БОРТОВОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ КРУЧЕНИИ

В рамках предварительного исследования расчеты выполнялись по упрощенной методике [8] расчета на кручение брусев открытого профиля. Затем полученные результаты уточнялись расчетами по МКЭ. Используемая упрощенная, но общепризнанная методика расчетов на кручение тонкостенных открытых профилей основана на теории В.З. Власова [4].

Результаты расчетов по приближенной методике опубликованы в [1, 3], некоторые из них в минимально необходимом для сопоставления с результатами расчетов МКЭ приведены ниже.

Для анализа был использован отсек условного судна с полным раскрытием палубы в конструктивных вариантах «одинарные или двойные борта и двойное дно». Все перекрытия — днище и второе дно, наружный и внутренний борта — приняты конструктивно одинаковыми и рассматриваются как пластины, эквивалентные перекрытиям с точки зрения сдвига. В сравнительных расчетах угла закручивания отсека за базу принят исходный вариант его конструкции, то есть с бортовыми перекрытиями, не подкрепленными диагональными балками. Схема деформации отсека приведена на рис. 9.

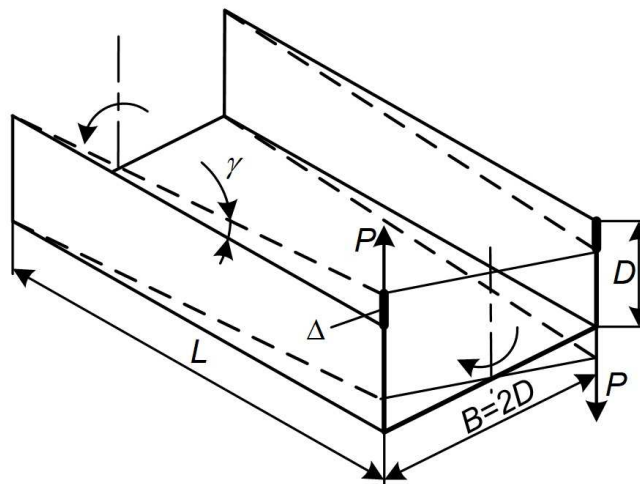


Рис. 9. Схема деформации отсека

В работе [1] показано, что при установке диагональных элементов сдвиговая деформация исследуемого перекрытия условного судна (см. выше) уменьшается в 4,82 раза, то есть $\lambda = \Delta_o \Delta_d = 4,82$, где Δ_o — сдвиговая деформация перекрытия без диагональных элементов, а Δ_d — то же после их установки. Моменты инерции при кручении каждого перекрытия составного открытого профиля с учетом λ_i

$$I_{Ki} = \frac{A_i \delta_i^2 \lambda_i}{3}, \quad (1)$$

тогда для составного профиля момент инерции при кручении (α — коэффициент, зависящий от формы составного профиля) —

$$I_K = \alpha \frac{\sum_1^n A_i \delta_i^2 \lambda_i}{3}, \quad (2)$$

Отношение угла закручивания профиля без диагональных элементов к углу закручивания такого же профиля с диагональными элементами в перекрытиях пропорционально отношению соответствующих моментов инерции при кручении, то есть

$$\psi = \phi / \phi_d = I_K / I_{Kd}. \quad (3)$$

Для различных вариантов количества и соединения перекрытий в отсеке получены следующие соотношения углов закручивания:

1) $\psi_1 = 2,27$ — одинарные борта и двойное дно; днище и второе дно не связаны между собой междудонным набором;

2) $\psi_2 = 1,43$ — одинарные борта и двойное дно; днище и второе дно жестко связаны междудонным набором; при реальном в той или иной мере податливым междудонным набором величина отношения лежит в диапазоне 1,43 — 2,27;

3) $\psi_3 = 3,35$ — двойные борта и двойное дно; наружный и внутренний борта, а также днище и второе дно не связаны друг с другом внутренним набором;

4) $\psi_4 = 3,35$ — двойные борта и двойное дно; наружный и внутренний борта, а также днище и второе дно жестко связаны друг с другом внутренним набором;

5) $\psi_5 = 2,98$ — двойные борта и двойное дно представляют собой тонкостенные замкнутые профили.

Таким образом, при использовании приближенной методики для рассмотренного отсека установка диагональных элементов в перекрытиях двойного борта увеличивает его жесткость при кручении приблизительно в три раза, а при одинарном борте — в два раза.

Расчеты МКЭ производились в среде SolidWorks. Использование МКЭ дало возможность более детально и точно исследовать распределение напряжений и деформаций в конструкции с учетом всех факторов, которые невозможно учесть при использовании приближенной методики. Для расчета влияния диагональных элементов на прочность корпуса судна при кручении были использованы четыре модели грузового отсека с одинарными бортами (рис. 10 — 13).

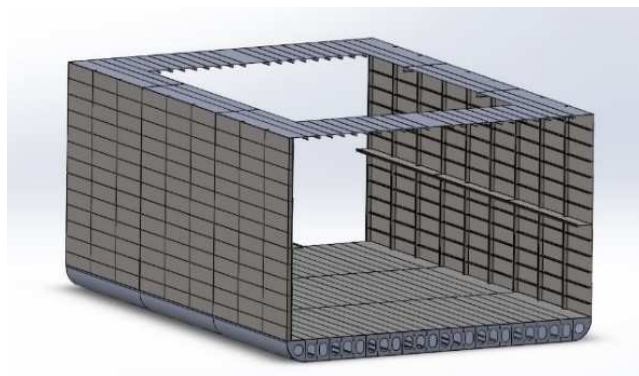


Рис. 10. Сборка блока с бортовым набором по продольной системе без диагональных элементов

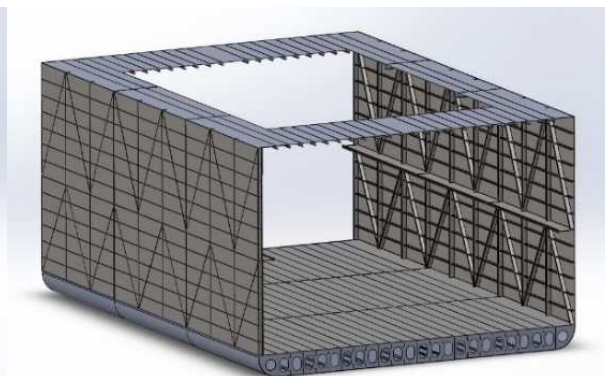


Рис. 11. Сборка блока с бортовым набором по продольной системе с диагональными элементами

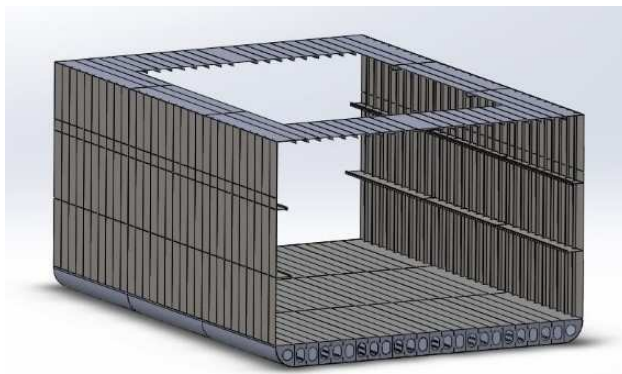


Рис. 12. Сборка блока с бортовым набором по поперечной системе без диагональных элементов

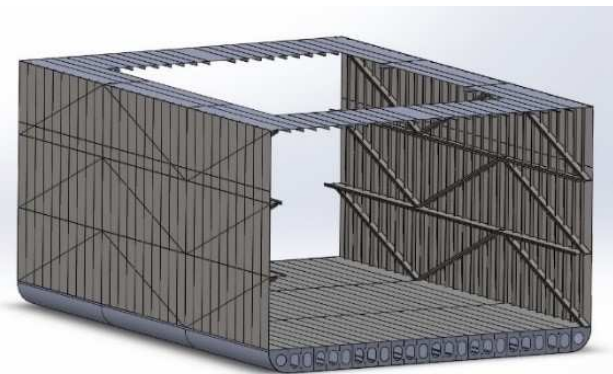


Рис. 13. Сборка блока с бортовым набором по поперечной системе с диагональными элементами

При расчете по упрощенной методике установка диагональных балок рамного набора в перекрытиях бортов увеличивает жесткость корпуса при кручении в 2,27 раза.

По результатам расчета МКЭ, при установке диагональных элементов в бортовое перекрытие, набранное по продольной системе набора, жесткость корпуса увеличивается в 2,48 и 2,37 раза при основном наборе из полособульба и уголка соответственно.

По результатам расчета МКЭ бортового перекрытия с диагональными элементами, набранного по поперечной системе набора, жесткость корпуса увеличивается в 2,36 и 2,28 раза при основном наборе из полособульба и уголка соответственно.

Погрешность вычисления по упрощенной методике в сравнении с расчетом МКЭ составляет 5,1 % и 4 % для перекрытия с поперечной системой набора при основном наборе из полособульба и уголка соответственно и 9,3 % и 4,4 % для перекрытия с продольной системой набора при тех же профилях. При этом погрешность идет в запас прочности. Это означает, что приближенная методика вполне применима в оценочных расчетах общей прочности при кручении.

Использование балок, изготовленных из полособульба, в качестве основного набора дает большее увеличение прочности перекрытия, в сравнении с балками из уголка. Увеличение жесткости при использовании балок из полособульба на 4,44 % и 3,39 % больше, чем при использовании уголка, при продольной и поперечной системах набора соответственно.

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ БАЛОК ДИАГОНАЛЬНОГО НАБОРА

Для обеспечения передачи усилий в узле соединения традиционных и диагональных балок рамного набора и решения технологических проблем была разработана конструкция узла, защищенная патентом на изобретение [6]. Приведенное на рис. 14 конструктивное решение позволяет ввести в узел пересечения двух взаимно перпендикулярных балок диагональный набор одинаковой с ними высоты. На рис. 15 показано конструктивное решение для узла соединения разновысоких рамных балок с диагональным элементом. На конструкцию последнего узла подана заявка на патентование.

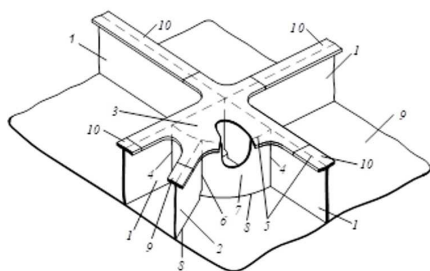


Рис. 14. Узел соединения рамных балок под произвольными углами [6]

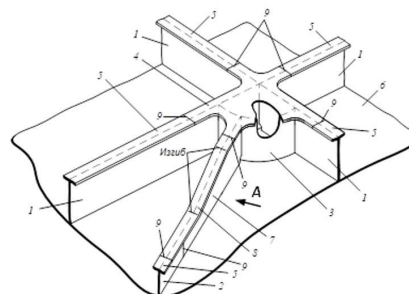


Рис. 15. Узел соединения разновысоких рамных балок с диагональным элементом

Результаты исследования местной прочности узла, показанного на рис. 14, опубликованы в работе [5]. Для иллюстрации цветовая визуализация напряженного состояния конструктивных элементов этого узла при действии силы вдоль оси диагональной балки приведена на рис. 16.

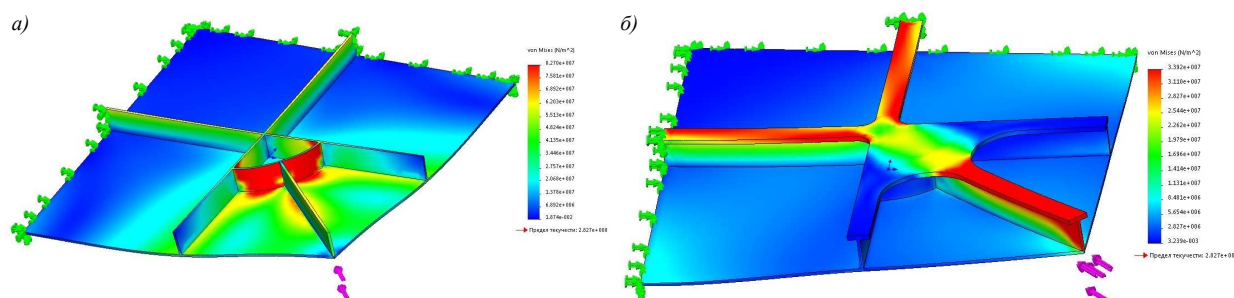


Рис. 16. Напряженное состояние конструктивных элементов узла пересечения набора, включающего диагональную балку: а — балки без свободного пояса (полосы); б — балки таврового сечения [5]

Видно, что при отсутствии свободных поясков цилиндрическая вставка, передающая осевую силу с диагональной балки на смежный набор, испытывает высокие напряжения и сильно деформирована. Именно свободные пояски передают основную часть нагрузки, а крестовина в значительной степени разгружает узел пересечения балок, оставаясь малонапряженной, что свидетельствует об эффективности разработанной конструкции.

При оптимизации весовых параметров конструкции с диагональными элементами возможна ситуация, когда напряженное состояние отдельных балок будет заметно отличаться от остальных. В этом случае встает вопрос об уменьшении или увеличении их сечения, то есть о соединении в одном узле разновысоких балок.

Исследование напряженного состояния этого узла выполнялось с использованием программного комплекса SolidWorks во вкладке Simulation.

Во всех представленных далее вариантах модели по аналогии с [5] приняты одинаковые размеры конструктивных элементов:

- лист наружной обшивки — $s = 10$ мм, 1400×1400 мм;
- стенка продольной неразрезной балки — $s = 10$ мм, $h = 100$ мм;
- стенки поперечных разрезных балок — $s = 10$ мм, $h = 100$ мм;
- цилиндрическая вставка — $s = 10$, $h = 100$ мм, $r = 240$ мм;
- стенка диагональной балки — $s = 10$ мм, $h = 70$ мм;
- полки балок — $s = 15$ мм, $b = 70$ мм.

Здесь s — толщина конструктивного элемента; h — высота сечения; r — радиус цилиндрической вставки; b — ширина сечения.

Такие же варианты приняты для случая, когда стенка диагональной балки имеет большую высоту, чем остальные стенки балок в узле. В этом случае диагональная балка имеет следующие размеры:

- стенка диагональной балки — $s = 10$ мм, $h = 130$ мм.

Предел текучести малоуглеродистой стали — 235 МПа, модуль Юнга — 2×10^5 МПа.

На рис. 17 приведены варианты нагружения исследуемой конструкции.

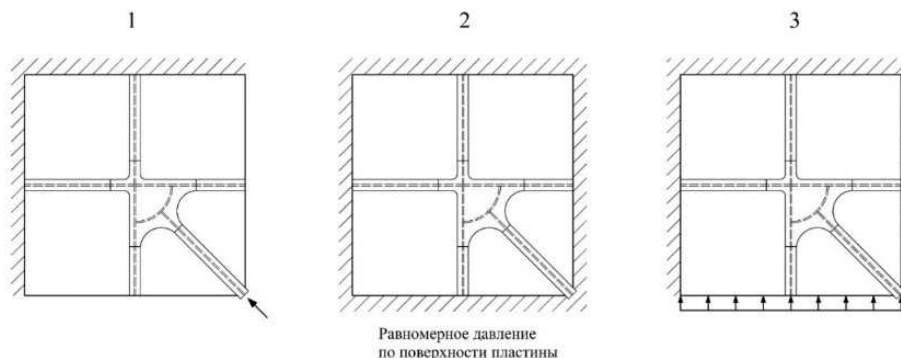


Рис. 17. Варианты нагружения исследуемой конструкции

Схема 1. Конструкция жестко заделана на двух смежных кромках и свободна на двух других. Вдоль диагональной балки действует осевая сила в плоскости конструкции. Подобная схема имеет место в бортовом перекрытии судна при скручивании корпуса.

Схема 2. Конструкция жестко заделана по периметру. На поверхность обшивки действует равномерно распределенное давление. Схема характерна для конструкций, находящихся ниже ватерлинии.

Схема 3. Конструкция жестко заделана на трех кромках. К свободной кромке в плоскости конструкции приложена равномерно распределенная нагрузка. Такое нагружение возникает в конструкциях, участвующих в общем изгибе корпуса судна.

Анализ результатов исследования приведен в табл. 5. В первом столбце приведены соответствующие выдержки из опубликованного ранее исследования [5] для конструкции с балками одной высоты. В столбцах 2 и 3 приведены результаты, полученные в данной работе.

Таблица 5

Сводные данные по результатам расчетов напряженного состояния узлов

Схема нагружения	Узел балок с одинаковой высотой стенок основных рамных и диагональных элементов [5]	Узел балок с разной высотой стенки (высота стенки диагонального элемента меньше прочих)	Узел балок с разной высотой стенки (высота стенки диагонального элемента больше прочих)
Схема 1	Нагрузка передается главным образом полками балок и цилиндрической вставки. Наибольшие напряжения возникают в диагональной балке, цилиндрической вставке и наружной обшивке в месте присоединения к цилиндрической вставке.	Наибольшие напряжения возникают в месте изменения сечения переходной brackets с большей высоты на меньшую. Основная нагрузка приходится на стенку и полку переходной brackets и передается через крестовину на полки смежных балок.	Наибольшие напряжения действуют в полке переходной brackets; пик находится в месте изменения высоты brackets с меньшей на большую. Отмечено, что при равных нагрузках меньшие напряжения наблюдаются в узле, где высота стенки диагонального элемента больше, чем высота стенок прочих балок.
Схема 2	В секторе, где установлена диагональная балка, наблюдается заметное снижение напряжений в обшивке. Наибольшие напряжения имеют место в локальных областях сжатой зоны в районе опорных сечений при изгибе основных балок.	Наблюдается снижение напряжений в секторе с диагональной балкой. Серьезных перепадов напряжений в стенке или полке переходной brackets не наблюдается: значения напряжений на порядок ниже, чем в обшивке.	Наблюдается снижение напряжений в секторе с диагональной балкой. Пика напряжений в стенке или полке переходной brackets не зафиксировано. Наблюдается незначительное повышение напряжения на переходной brackets в месте перехода от меньшей к большей высоте стенки.
Схема 3	Наиболее напряженной является балка, вдоль которой действует нагрузка, от места приложения нагрузки до района пересечения с перпендикулярной к ней балкой. Особенно высокие напряжения имеют место в полке и примыкающей к ней части стенки (рис. 16б).	Наибольшие напряжения зафиксированы в балке, вдоль которой приложена нагрузка. Пик напряжений наблюдается в месте присоединения полки балки к стенке. В переходной brackets диагонального элемента высокие напряжения не зафиксированы.	В узле, где высота стенки диагонального элемента больше прочих, также не зафиксированы перепады напряжения в переходной brackets диагональной балки. Наибольшие напряжения действуют по линии присоединения полки к стенке балки, вдоль которой прикладывается нагрузка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Исследованием весовых характеристик бортовых перекрытий с диагональными элементами набора при обеспечении местной прочности по Правилам РС установлено следующее.

При поперечной системе набора.

Суммарные расчетные массы набора панели исходного перекрытия без диагональных элементов составили при основном наборе из полособульба и уголка 2422 кг и 2343 кг соответственно, а для такого же перекрытия с диагональными элементами — 2715 кг и 2671 кг, то есть увеличились на 12,1 % и 14,0 % при том, что масса добавляемых диагональных элементов составила 46,6 % и 47,8 % от масс набора исходного перекрытия.

При продольной системе набора.

Суммарные расчетные массы набора панели исходного перекрытия без диагональных элементов составили при основном наборе из полособульба и уголка соответственно 1909 кг и 1829 кг, а для такого же перекрытия с диагональными элементами — 2361 кг и 2415 кг, то есть увеличились на 23,7 % и 32,0 %

при том, что масса добавляемых диагональных элементов составляет 43,3 % и 47,8 % от масс набора исходного перекрытия.

Балки основного набора из неравнополочного уголка и соответствующие им рамные связи имеют меньшие массы, чем массы тех же элементов при использовании в качестве балок основного набора полособульбов в обоих вариантах системы набора.

2. При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с поперечной системой набора наблюдается снижение массы с увеличением числа групп унифицированных размеров балок. За базу сравнения принята масса неунифицированного набора, являющаяся минимально возможной (все балки изготовлены из одинакового профиля разных размеров, выбранных из условия их минимального веса). Если все балки одинакового сечения — один типоразмер, то их масса на 28,9 % и 31,4 % больше массы варианта конструкции с минимальной массой. При двух типоразмерах превышение массы составляет 9,0 % и 12,6 %, а при трех — 5,4 % и 7,0 %. Первое значение соответствует балкам набора, изготовленным из полособульба, а второе — из неравнополочного уголка.

При унификации размеров балок основного набора панели перекрытия с продольной системой набора также наблюдается снижение массы с увеличением числа групп унифицированных размеров балок при таком же базовом варианте. Если все балки одинакового сечения — один типоразмер, то их масса на 36,5 % и 40,9 % больше массы варианта конструкции с минимальной массой. При двух типоразмерах превышение массы составляет 11,9 % и 15,7 %, а при трех — 8,1 % и 9,0 %.

3. Исследование прочности и жесткости бортового перекрытия при кручении дали следующие результаты.

При расчетах по упрощенной методике для рассмотренного отсека при одинарных бортах установка диагональных балок рамного набора приблизительно в два раза увеличивает жесткость корпуса при кручении, а при двойных бортах — почти в три раза.

При расчете методом конечных элементов получены следующие результаты.

При продольной системе набора.

При введении диагональных элементов в бортовое перекрытие, набранное по продольной системе набора, жесткость и прочность корпуса увеличиваются в 2,48 и 2,37 раза при балках основного набора, изготовленных из полособульба и неравнополочного уголка соответственно.

При поперечной системе набора.

При введении диагональных элементов в бортовое перекрытие, набранное по поперечной системе набора, жесткость и прочность корпуса увеличиваются в 2,36 и 2,28 раза для балок основного набора перекрытия из полособульба и уголка соответственно.

Погрешности вычисления по упрощенной методике в сравнении с расчетом МКЭ составляют 5,1 % и 4 % для перекрытия с поперечной системой набора при основном наборе из полособульба и уголка соответственно и 9,3 % и 4,4 % для перекрытия с продольной системой набора при тех же профилях. При этом погрешности идут в запас прочности и составляют менее 10 %. Это означает, что приближенная методика вполне применима в оценочных расчетах общей прочности при кручении.

При продольной системе набора увеличение крутильной жесткости корпуса с введением в бортовые перекрытия диагональных элементов больше, чем при поперечной системе набора, на 4,53 %.

Использование полособульба в качестве балок основного набора дает большее увеличение прочности перекрытия в сравнении с балками из неравнополочного уголка. Увеличение жесткости при использовании балок из полособульба больше на 4,44 % и 3,39 % при продольной и поперечной системах набора соответственно.

4. Исследование напряженного состояния узла пересечения рамных балок с диагональным элементом подтвердило эффективность конструктивного решения. Обеспечена передача усилий при допустимой концентрации напряжений в переходной brackets разноразмерных балок. В случае, когда пик напряжений приходится на место изменения высоты, его значение не выходит за пределы других напряжений в узле. С практической точки зрения узел обеспечивает эффективную передачу усилий между рамными балками набора, нормальные условия для проведения технологических операций и разнесение сварных швов на необходимое расстояние, исключающее наложение друг на друга полей их напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аносов А.П. Влияние бортовых перекрытий, подкрепленных диагональными балками рамного набора, на жесткость корпуса судна при кручении / А.П. Аносов, Т.А. Макарова // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 3, ч. 2. — С. 49—53.
2. Аносов А.П. Влияние диагональных элементов набора бортового перекрытия на его местную прочность и весовые характеристики / А.П. Аносов, Т.А. Макарова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 67 — 80.
3. Аносов А.П. Влияние диагональных элементов рамного набора на жесткость бортового перекрытия при сдвиге / А.П. Аносов, Т.А. Макарова // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 3, ч. 2. — С. 44 — 48.
4. Власов В.З. Теория упругости тонкостенных пространственных конструкций / В.З. Власов. — М.: Госстройиздат, 1959. — 384 с.
5. Климов С.О. Исследование напряженного состояния узла соединения рамных балок набора, включающего диагональный элемент / С.О. Климов, А.П. Аносов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — Специальный выпуск 2. — С. 41 — 46.
6. Пантюшин Д.И., Козырев Д.В., Восковщук Н.И., Аносов А.П. Узел соединения балок. Патент на изобретение № 2667203 / БИ № 15, 27.05.2015.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II «Корпус» / Российский морской регистр судоходства. СПб., 2025.
8. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов / С.П. Фесик. — Киев: Будівельник, 1970. — 308 с.

REFERENCES

1. Anosov A.P., Makarova T.A. The influence of side grillages, supported with diagonal framing members, on the hull rigidity under torsion. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 3, p. 2. P. 49 — 53. (In Russ.)
2. Anosov A.P., Makarova T.A. Influence of diagonal framing members of side grillage on its weight characteristics. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 67 — 80. (In Russ.)
3. Anosov A.P., Makarova T.A. Influence of diagonal framing members on the rigidity of the side grillage under shear. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 3, p. 2. P. 44 — 48.
4. Vlasov V.Z. *Teoriya uprugosti tonkostennykh prostranstvennykh konstrukttsii*. Moscow: Gosstroizdat, 1959. 384 p.
5. Klimov S., Anosov A. Stressed state of webbed framing joints with diagonal element. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2020. Special Edition 2. P. 41 — 46. (In Russ.)
6. Pantyushin D.I., Kozyrev D.V., Voskovshchuk N.I., Anosov A.P. Uzel soedineniya balok. Patent na izobretenie № 2667203 / BI №15, 27.05.2015 [Beam connection unit. Patent for invention No. 2667203].
7. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II: Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
8. Fesik S.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference book on resistance of materials]. Kiev: Budivel'nik, 1970. 308 p.