

УДК 629.5.011

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОЧНОСТЬ БОРТОВ СУДОВ НА ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ

Кузнецов Эдуард Александрович<sup>1</sup>, аспирант

e-mail: [eduard-kuz.555@mail.ru](mailto:eduard-kuz.555@mail.ru)

Кулеш Виктор Анатольевич<sup>1</sup>, доктор технических наук, профессор

e-mail: [vkulesh@mail.ru](mailto:vkulesh@mail.ru)

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности моделирования и прямых расчетов прочности бортовых перекрытий на действие экстремальных нагрузок при работе судов во льдах и швартовках в море. Особое внимание уделено сравнению стержневых и пластинчатых конечно-элементных моделей. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут служить основой для развития регламентации при оценках напряженно-деформированного состояния бортовых перекрытий с помощью балочных и пластинчатых моделей методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** бортовые перекрытия, расчеты прочности, экстремальные нагрузки, балочные модели, пластинчатые модели.

## MODELING AND STRENGTH OF THE SIDES OF SHIPS FOR EXTREME LOADS

Kuznecov Eduard Aleksandrovich<sup>1</sup>, Doctoral Student

e-mail: [eduard-kuz.555@mail.ru](mailto:eduard-kuz.555@mail.ru)

Kulesh Viktor Anatolevich<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor

e-mail: [vkulesh@mail.ru](mailto:vkulesh@mail.ru)

<sup>1</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

**Abstract.** The article considers the features of modeling and direct calculations of the strength of the side floors to the effect of extreme loads during the operation of ships in ice and mooring at sea. Special attention is paid to the comparison of rod and plate finite element models. The results obtained are of practical importance and can serve as a basis for the development of regulation in assessing the stress-strain state of side ceilings using beam and plate models by the finite element method.

**Keywords:** side ceilings, calculations of strength, extreme loads, frame models, plate models.

Бортовые перекрытия большинства судов, в особенности эксплуатирующихся в условиях экспедиционных промыслов Дальневосточного бассейна, подвергаются различного рода экстремальным нагрузкам. К ним можно отнести давления при работе во

льдах и от действия кранцев при швартовках на волнении. При выборе размеров набора бортовых перекрытий по Правилам [1] с учетом действия регламентируемых расчетных нагрузок проектант вынужден следовать дополнительным условиям, которые часто ограничивают возможности применения полезных решений. Например, принять высоту стенки рамного набора меньше удвоенной высоты основного набора, компенсируя снижение прочности за счет утолщения стенок или более развитых полок. Иногда для уменьшения объема изоляции полезно вообще отказаться от высокого рамного набора с компенсацией потерь прочности за счет увеличения числа компактных разносящих стрингеров по опыту советских и иностранных проектов [2].

Подобные конструктивные решения безусловно требуют обоснований, которые можно получить с помощью прямых расчетов прочности, чаще в программах на основе метода конечных элементов (МКЭ). Одной из сертифицированных Регистром программ является FESTA. С позиции нормативного документа Регистра [3] такие расчеты для перекрытий следует произвести для балочной или балочно-стержневой модели. Полагается, что нормирующие прочность значения коэффициентов допускаемых напряжений в Правилах ориентированы на балочные модели.

Модели такого рода используют концепцию учета обшивки в виде «присоединенных поясков» балок. В рамках этой концепции нельзя учесть изгиб обшивки между набором и соответственно оценить её прочность. Разрезая обшивку на присоединенные пояски для каждой балки, исключается и взаимосвязь между балками через обшивку. Эта связь полагается несущественной в условиях близких к цилиндрическому изгибу перекрытий под равномерными давлениями (моря, грузов), распределенными по всей площади. Для локальных нагрузок типа ледовых и от кранцев роль этих связей может быть существенной и это важно учитывать, особенно при наличии дополнительных промежуточных балок.

Широкие возможности и распространение, особенно в зарубежной практике, дают и получают расчеты на основе пластинчатых 3D-моделей перекрытий. В рамках таких моделей обеспечена одновременная оценка напряжений как в балках, так и в обшивке. Эти модели представляются более перспективными [4], особенно в задачах с локальными экстремальными нагрузками, но для них есть проблемы назначения коэффициентов допускаемых напряжений, влияния размеров сетки конечных элементов, вырезов и концентраторов напряжений.

В данной работе выполнен сравнительный анализ результатов прямых расчетов прочности с помощью стержневой и пластинчатой идеализации бортового перекрытия со сложной и нерегулярной системой набора рефрижератора серии «Таврия» проекта 582. Данная серия большая и показала многолетний опыт успешной эксплуатации. Даже в возрасте более 40 лет эти суда оставались в эксплуатации и многие проходили процедуру обновления (реновации) [5] до уровней 10 и 15-летнего возраста.

### **Общие сведения о судне**

**Общие сведения о судне и перекрытии.** Судно имеет водоизмещение 5270 т и главные размеры  $L \times V \times H \times d = 90,0 \times 14,0 \times 7,2 \times 5,53$  м. Корпус спроектирован на старый ледовый класс УЛ. Для этого по всей длине судна установлены промежуточные шпангоуты (полособульб 14б) меньшей высоты в сравнении с основными шпангоутами (тавр  $8 \times 210/12 \times 100$ ), а толщина наружной обшивки в ледовом поясе увеличена до 13 мм и более. Шпация основных шпангоутов 0,6 м. Бортовое перекрытие (40-55 шп.) в твиндеке носового трюма между 2 и верхней палубами находится в районе действия как ледовых нагрузок, так и нагрузок от кранцев. Кроме шпангоутов перекрытие включает разносящий стрингер (тавр  $8 \times 210/12 \times 100$ ) на уровне 0,375 м выше ГВЛ, а также интеркостельный стрингер



(полособульб 14б) на уровне 0,825 м выше ГВЛ, на котором заканчиваются промежуточные шпангоуты. Общий вид судна дан на рисунке 1.

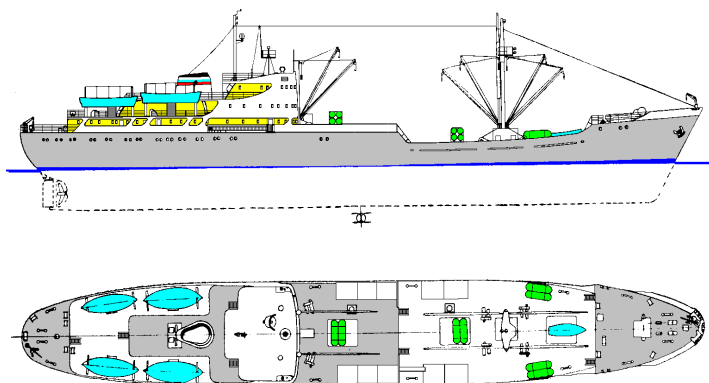


Рисунок 1 – Общий вид д/х серии «Таврия»

### Расчетные нагрузки и граничные условия

Расчеты прочности участка бортового перекрытия длиной 9 м выполнены в программах FESTA (балочная модель) и SolidWorks (пластинчатая модель). Ледовая нагрузка соответствует параметрам для класса Ice2 (интенсивность – 839 кПа, высота – 0,69 м, длина – 3,96 м). Центр зоны ледовых давлений принят на  $43^{1/2}$  шп и на 0,375 м ниже разносящего стрингера. Расчеты выполнены для двух эпюр ледовых давлений в виде треугольной призмы (пиковая) и равномерно по зоне контакта. Величина давлений краев 350 кПа соответствует швартовкам судна при полном водоизмещении на волнении 6 баллов. Размеры зоны контакта приняты  $1,5 \times 1,5$  м с центром на  $43^{1/2}$  шп и на уровне 0,375 м выше разносящего стрингера. Давления равномерны по зоне контакта краев.

Граничные условия (рисунок 2) для кромок и торцов балок на поперечной переборке 40 шп и на уровне палуб приняты без смещений (жестко заделаны). Кницы в обоих моделях не учитывались, что в сочетании с соответствующим завышением пролетов является допущением в безопасную сторону. Сетка для пластинчатой модели составляла  $50 \times 50$  мм.

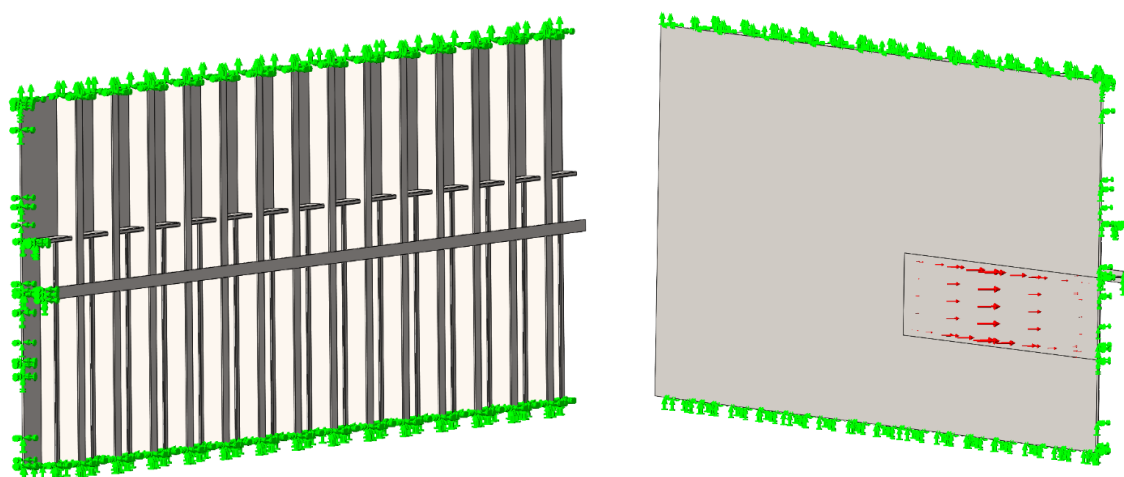


Рисунок 2 – Модель бортового перекрытия, закрепления кромок и зона ледовых давлений

Для оценки возможностей учета взаимосвязей промежуточных и основных шпангоутов через обшивку и уровня напряжений в ней балочная модель перекрытия дополнена двумя балками-полосками конечной ширины. Первая полоса обшивки размерами 13×645 мм размещена на уровне нижней кромки зоны ледовых давлений и к ней приложена половина нагрузки. Другая половина ледовой нагрузки прикладывалась на уровне верхней кромки зоны ледовых давлений. Вторая полоса обшивки размерами 21×600 мм размещена на уровне верхней кромки зоны давлений кранцев (ширстрек). Давления от кранцев прилагались на 5 шпангоутов равномерно по высоте зоны.

### Анализ результатов

Ниже представлены результаты прямых расчетов прочности балочной и пластинчатой модели, выполненные с помощью FESTA и SolidWorks соответственно (см. таблицу 1). Фрагменты эпюры напряжений с указанными максимальными значениями напряжений для каждой конкретной связи при действии ледовой нагрузки (пиковая эпюра) представлены на рисунке 3.

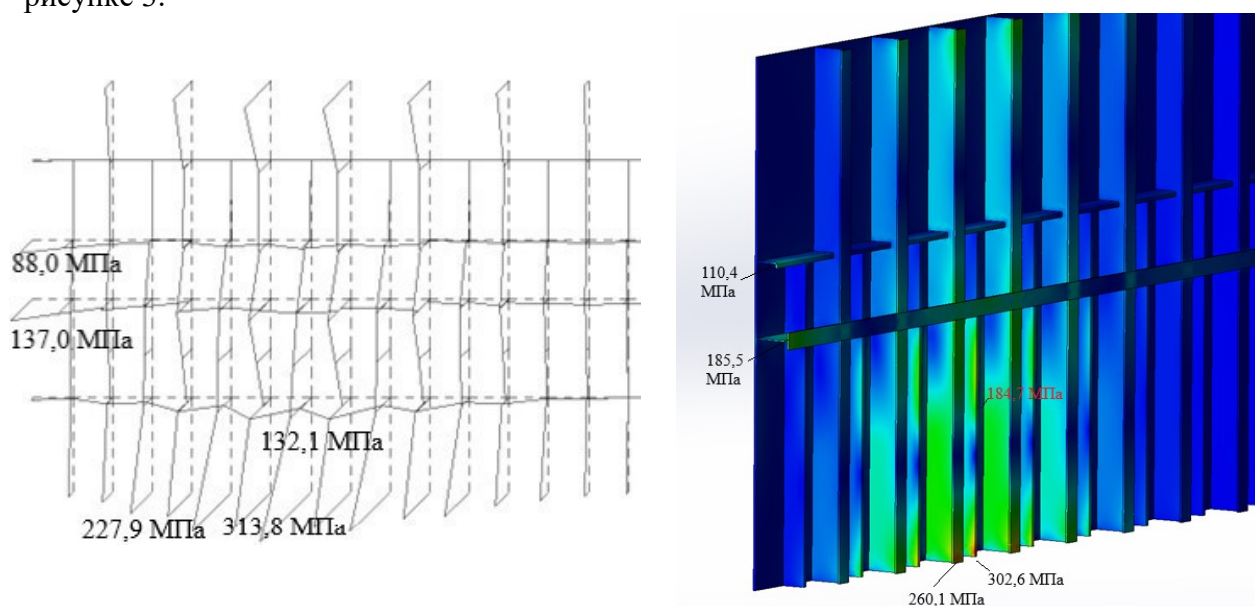


Рисунок 3 – Эпюры напряжений при действии ледовой нагрузки (FESTA – слева; SolidWorks – справа)

Таблица 1

### Результаты расчетов и сравнения

Сценар., эпюра	Программа, отличия	Нагрузка, тонн	Наибольшие напряжения, МПа				
			Наружная обшивка	Промеж. шпангоуты	Основные шпангоуты	Интеркос. стрингер	Разнос. стрингер
Лед, пиковая	FESTA	116,5	132,1	313,8	227,9	88,0	137,0
	SolidWorks		184,7	302,6	260,1	110,4	185,5
	отличие, %	-	<b>39,8</b>	<b>-3,6</b>	<b>14,1</b>	<b>25,5</b>	<b>35,4</b>
Лед, равномерно	FESTA	233	202,5	377,8	310,4	179,2	342,9
	SolidWorks		209,7	372,7	346,3	201,3	402,8
	отличие, %	-	<b>3,5</b>	<b>-1,3</b>	<b>11,6</b>	<b>12,4</b>	<b>17,4</b>

Кранцы, равно- мерно	FESTA	80	203,4	148,4	264,0	153,4	113,1
	SolidWorks		142,7	128,6	274,4	148,3	126,4
	отличие, %	-	<b>-29,8</b>	<b>-13,4</b>	<b>3,9</b>	<b>-3,3</b>	<b>11,8</b>

По результатам расчетов и сравнений можно сделать следующие основные выводы.

1. Сценарий пиковой ледовой нагрузки показывает напряжения существенно ниже во всех связях – от 1,2 раза для промежуточных шпангоутов (ПШ) до 2,5 раз в разносящих стрингерах (РС). Такие эпюры явно предпочтительнее равномерных в анализах прочности.

2. Для пиковой ледовой нагрузки «слабым звеном» перекрытия являются ПШ, в которых напряжения в 1,3 раза больше, а в ОШ практически на уровне напряжений текучести. При этом отличия по балочным и пластинчатым моделям всего 3,6% для ПШ, а для ОШ 14,1%. В других связях отличия больше, но сам уровень напряжений в них менее 0,80 от напряжений текучести.

3. Для сценария давлений от кранцев «слабым звеном» перекрытия являются ОШ, в которых наибольшие напряжения в среднем на 15% превышают напряжения текучести. При этом отличия по балочным и пластинчатым моделям также невелики 3,9% у ОШ. В других балках набора уровень напряжений менее 0,65 от напряжений текучести.

4. Прием введения в балочную модель перекрытия продольных полос обшивки под нагрузкой и для «перевязки» шпангоутов в принципе позволяет сравнительно адекватно оценивать наибольшие напряжения в ней. При сценарии давления льда отличие по балочным и пластинчатым моделям доходит до 40%, а при давлении кранцев – до 30%. Отличия существенны, но их можно уменьшить соответствующим изменением ширины полос. Регламента назначения ширин эти полос нет, но он представляется перспективным.

5. Результаты расчетов и сравнений показывают, что прямые оценки прочности бортовых перекрытий со сложной системой балок на экстремальные и локальные нагрузки могут выполняться как при балочном, так и при пластинчатом моделировании с учетом отмеченных условий. Уровень напряжений может превышать напряжения текучести – в данном примере не более 1,4 раза. Это вполне приемлемо, так как параметры расчетных нагрузок по Правилам соответствуют условиям работы перекрытий в области пластических деформаций и нормирования прочности по критериям предельного состояния.

### Заключение

Анализ показал, что для оценки напряженно-деформированного состояния бортовых перекрытий на действие экстремальных локальных нагрузок от льда и кранцев можно использовать как балочные, так и пластинчатые модели с соблюдением определенных условий. Для двойственной оценки напряжений в балках и в обшивке, а также их взаимосвязей, рекомендуется дополнять балочные модели полосами обшивки. Коэффициенты допускаемых напряжений в таких расчетах могут достигать 1 и более.

### Список литературы:

1. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства, СПб., 2024.

2. Кузнецов Э.А., Кулеш В.А., Суров О.Э., Фам Ч.Х. Проблемы ледовой регламентации «не эталонных» конструкций, Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3 часть 3, 23 – 29 с.



3. Руководство по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов, НД № 2-030101-045. РМРС, СПб., 2021, 11 с.

4. Сутырин В.И. Метод приведения в практике расчетов корпусных конструкций // Судостроение. 2008. № 4 (779), 17 – 21 с.

5. Расчеты проектной прочности и нормы технического состояния корпуса т/х «Гуцул» на уровень обновления 3SS (15 лет). Отчет ООО «Центр НТБ», № 09-4по/Гуц, руководитель Кулеш В.А., Владивосток, 2009, 240 с.

