

УДК 629.5.04; 624.042

## **РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ НОВОГО НОРМАТИВНОГО ДОКУМЕНТА РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА ПО РАСЧЕТАМ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**А. А. Петров**, заведующий отделом конструктивной надежности и защиты судов от коррозии

В статье приведены основные результаты научно-исследовательской работы, направленной на разработку Руководства Российского морского регистра судоходства по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций с помощью метода конечных элементов. Обозначены основные положения и требования нового нормативного документа, продемонстрированы результаты расчетов прочности конструкций судна (несамоходной баржи), выполненные в соответствии с проектом Руководства, намечены направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, МКЭ, Руководство РС, расчеты прочности, ANSYS.

### ***Введение***

На сегодняшний день практически все проектные и научные организации судостроительной промышленности, как в России, так и за рубежом, в той или иной степени используют в своей деятельности программные средства, реализующие численные методы. Для решения задач, связанных с обеспечением прочности и надежности корпусных конструкций, наибольшее распространение получил метод конечных элементов (далее – МКЭ), позволяющий оценивать напряженно-деформированное состояние конструкций произвольных форм и размеров, причем уровень идеализации геометрии объекта и точность решения ограничиваются при использовании МКЭ только производительностью ЭВМ. Применение МКЭ в судостроении можно условно разделить на две основные области: научную, когда он используется в теоретических и экспериментальных исследованиях, и практическую, когда с помощью МКЭ обосновываются различные конструктивные решения, определяется несущая способность отдельных узлов или конструкций и т. д. В последнем случае, применительно к морским судам, использование МКЭ должно быть регламентировано нормативными документами органа, осуществляющего техническое наблюдение за

проектированием, постройкой и эксплуатацией судна, – классификационным обществом. Большинство иностранных классификационных обществ – членов МАКО (далее – ИКО – члены МАКО) достаточно давно имеют либо соответствующие разделы правил классификации и постройки судов (например, [1, 2]), либо отдельные руководства (например, [3, 4]), подробно описывающие алгоритм выполнения расчета МКЭ и оценки его результатов. Российский морской регистр судоходства (далее – РС) до 2019 г. регламентировал применение МКЭ только в некоторых случаях, например, при расчете буксирных и швартовых устройств или люковых закрытий грузовых трюмов, в связи с чем разработка всеобъемлющего документа по расчетам МКЭ являлась весьма актуальной задачей.

### ***Общее описание научно-исследовательской работы***

Решение обозначенной задачи выполнялось в рамках научно-исследовательской работы (далее – НИР) по договору с РС специалистами отдела конструктивной надежности и защиты судов от коррозии АО «ЦНИИМФ» при участии коллег из АО «ЦИФРА». На первом этапе были проанализированы основные нормативные документы ИКО – членов МАКО и выполнен тестовый расчет прочности судна (несамоходной баржи) в соответствии с одним из них [4]. Кроме того, была проведена комплексная оценка известных зарубежных и российских программных продуктов, реализующих МКЭ, показавшая, что при близких основных функциональных характеристиках программные комплексы ANSYS и NX Nastran имеют больший набор специфических настроек и опций, позволяющих решать узкоспециализированные задачи, а также внушительную базу справочной и обучающей информации. Также было определено, что российские судостроительные и научные организации отдают предпочтение программному обеспечению ANSYS, а европейские и азиатские – NX Nastran.

Второй этап НИР заключался в разработке проекта Руководства РС по оценке напряженно-деформированного состояния корпусных конструкций МКЭ и его апробации в нескольких тестовых задачах.

Необходимо отметить, что по состоянию на декабрь 2019 г. разработка окончательной редакции проекта Руководства РС еще не завершена в связи с тем, что полученные авторским коллективом результаты вызвали интерес у профессионального сообщества, что повлекло развитие дискуссии по данной теме. Как было выявлено в ходе обсуждений представленных специалистами АО «ЦНИИМФ» результатов, для всестороннего решения поставленной задачи потребуются дополнительные исследования, ввиду чего область возможного применения МКЭ для анализа прочности судовых конструкций на данном этапе может быть ограничена.

В настоящей статье приведены основные результаты работы, вынесенные на обсуждение заинтересованных организаций отрасли.

### ***Структура проекта Руководства РС***

Принципиально в Руководстве предложено выделить четыре типа анализа прочности судовых корпусных конструкций с помощью МКЭ:

- **глобальный**, когда моделируется весь корпус судна, с обоснованным уровнем идеализации, рисунок 1 (не учитываются мелкие детали, конструктивное оформление соединения балок набора, вырезы и т. п.);

- **частичный**, модель для которого включает часть корпуса, рисунок 2 (возможно моделирование бортового или палубного перекрытия, а также произвольного участка корпусной конструкции в районе воздействия специфических нагрузок от оборудования, судовых устройств и т. п.);

- **локальный**, в котором рассматриваются зоны с концентраторами напряжений, рисунок 3 (проводится на мелкой сетке и, как правило, выполняется методом субмоделирования);

- **стержневой**, применимый только для расчета отдельных типов корпусных перекрытий (ввиду того, что стержневая идеализация имеет ряд допущений, данный тип анализа рекомендован к применению только для тех случаев, когда это предусмотрено действующими Правилами РС).

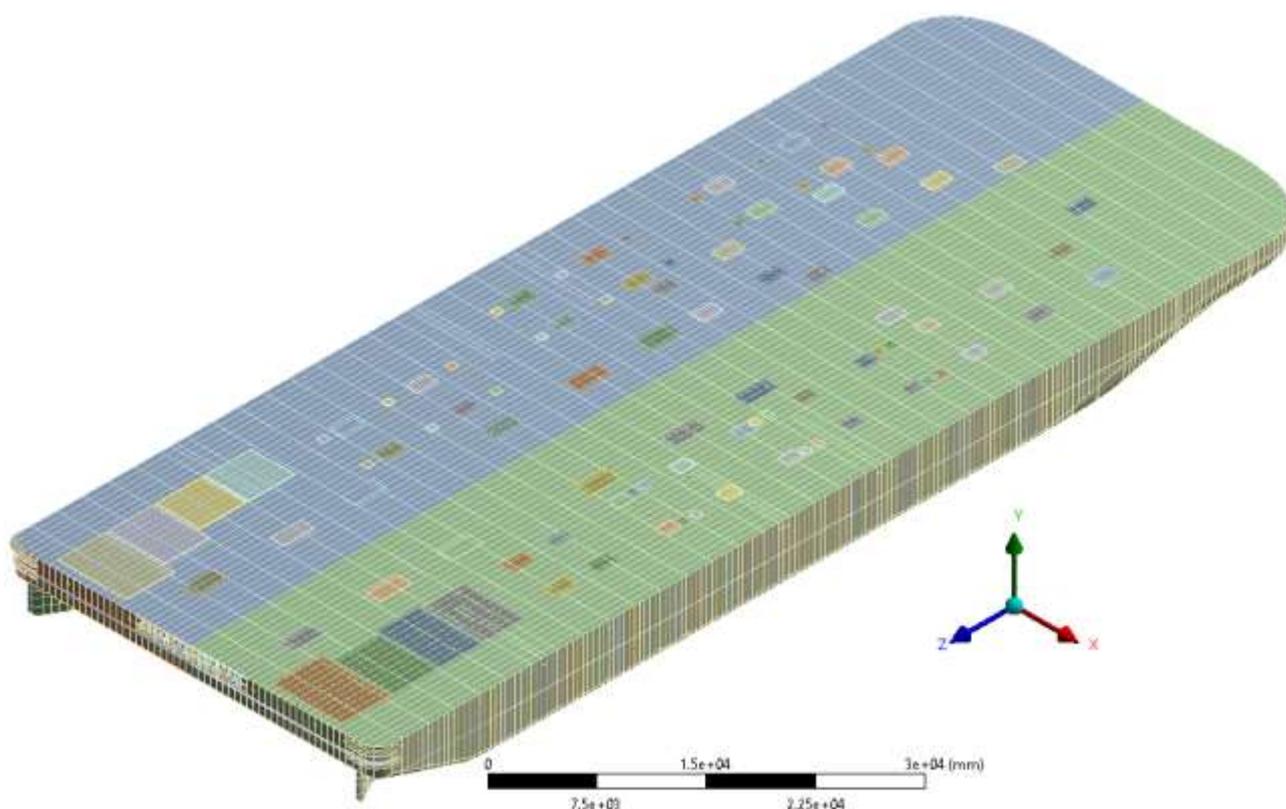


Рисунок 1 – Пример модели для глобального анализа – корпус судна (баржи) целиком

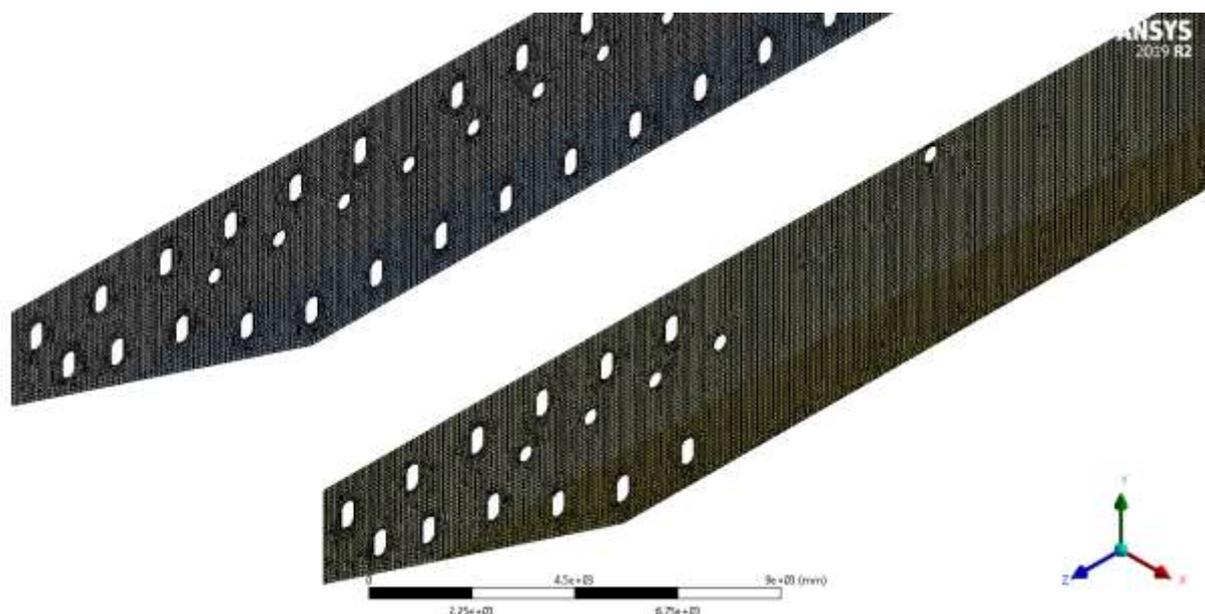


Рисунок 2 – Пример модели для частичного анализа – продольные переборки

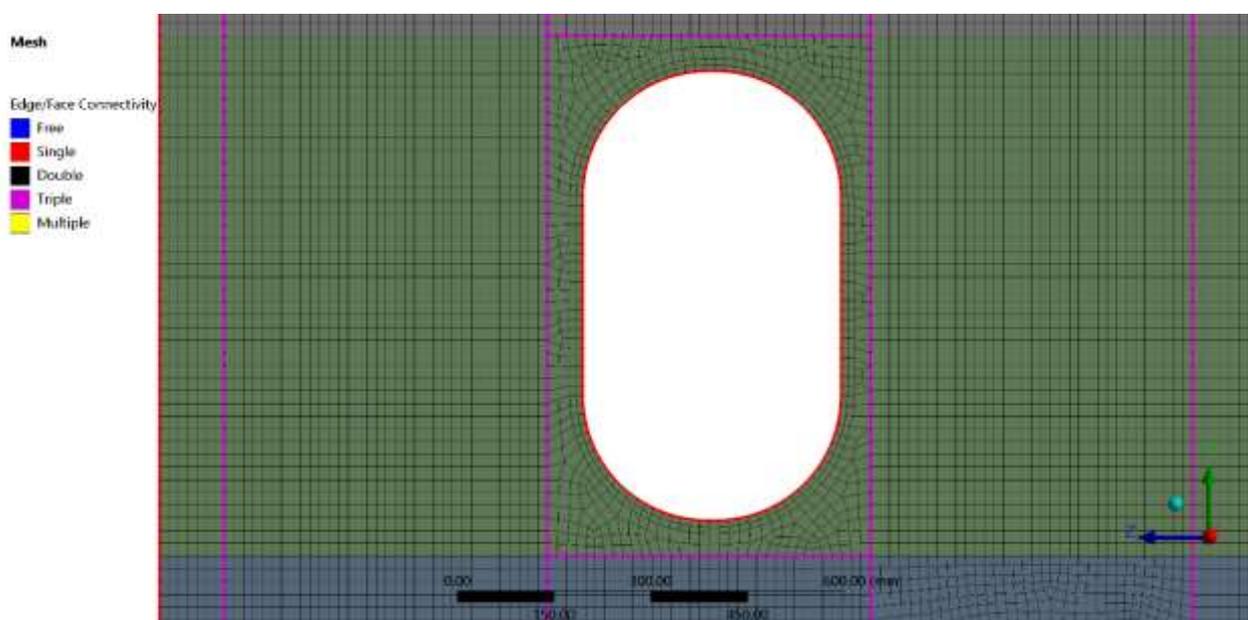


Рисунок 3 – Пример модели для локального анализа (субмодели) – вырез в продольной переборке

Основные требования, ограничения и критерии оценки результатов для первых трех типов анализа приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Основные требования для глобального, частичного и локального анализов**

Требование	Глобальный анализ	Частичный анализ	Локальный анализ
Элементы конструкции, включаемые в модель	Наружная обшивка, настилы палуб / платформ, продольные и поперечные переборки, элементы рамного набора, люки и	В дополнение к конструкциям для глобального анализа: продольные и поперечные элементы основного набора и ребра жесткости,	В дополнение к конструкциям для частичного анализа: полки и фланцы книц и бракет, срезки «на ус», все отверстия и вырезы,

	отверстия с $l \geq 2,5$ и/или $b \geq 1,2$ ( $l$ и $b$ –	бракеты и кницы, люки и отверстия	полки по контурам вырезов, сварные швы
--	---	-----------------------------------	--

Продолжение таблицы 1

Требование	Глобальный анализ	Частичный анализ	Локальный анализ
	длина и ширина отверстия, м)	размеров, сопоставимых с размерами КЭ (моделируются путем удаления КЭ)	(опционально и только при использовании КЭ типа SOLID
Требования к сетке	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Типы КЭ: ROD, BEAM, SHELL, SOLID</li> <li>▪ Размеры КЭ: не более расстояний между рамными связями</li> <li>▪ Прочее: геометрические характеристики балок, исключенных из модели, учитываются в балочных элементах, расположенных по границам листовых</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Типы КЭ: ROD, BEAM, SHELL, SOLID</li> <li>▪ Размеры КЭ: не более расстояний между ребрами жесткости, для рамных балок – не менее трех КЭ по длине пролета</li> <li>▪ Прочее: фланцы бракет могут быть смоделированы КЭ типа ROD или BEAM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Типы КЭ: SHELL и SOLID – в рассматриваемой области; за ее пределами – допускается BEAM</li> <li>▪ Размеры КЭ: не более 50 × 50 мм</li> <li>▪ Прочее: фланцы бракет должны быть смоделированы КЭ типа SHELL или SOLID, не менее двух КЭ по ширине</li> </ul>
Закрепление модели в пространстве	Комбинация ограничений перемещений трех характерных точек на корпусе (положение точек определено исходя из типа судна)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Для модели перекрытия – закрепление по ближайшим переборкам</li> <li>▪ Для иной модели – обосновывается в каждом конкретном случае</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Когда локальный анализ выполняется в рамках глобального или частичного (в составе макромодели) – так же как для соответствующего типа анализа</li> <li>▪ Когда локальный анализ выполняется в рамках субмоделирования – граничные условия – узловые перемещения из глобальной или частичной модели</li> </ul>
Критерии оценки прочности	$\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{glob}$ $[\sigma]_{glob} = \frac{175}{\eta}, \text{ МПа}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ В линейной постановке: <math display="block">\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{part}</math> <math display="block">[\sigma]_{part} = \frac{235}{\eta}, \text{ МПа}</math> </li> <li>▪ В нелинейной постановке: выполняется оценка несущей способности в</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ В линейной постановке, при использовании оболочечных КЭ: <math display="block">\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{loc}</math> <math display="block">[\sigma]_{loc} = \frac{289}{\eta} - \text{ для}</math> </li> <li>района сварного шва, МПа;</li> </ul>

		соответствии с принятой в Правилах РС методикой (см.	$[\sigma]_{loc} = \frac{367}{\eta}$ – вдали от сварного шва, МПа
--	--	--	--

Окончание таблицы 1

Требование	Глобальный анализ	Частичный анализ	Локальный анализ
		п. 1.2.17 части XVII [5])	$\sigma_{eqv}$ – осредняется на площадке 50 × 50 мм В линейной постановке, при использовании объемных КЭ: $\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{loc} [\sigma]_{loc} = \sigma_T$ , МПа $\sigma_T$ – предел текучести материала <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ В нелинейной постановке: выполняется оценка несущей способности в соответствии с принятой в Правилах РС методикой (см. п. 1.2.17 части XVII [5])</li> </ul>

\* В целях повышения эффективности производства при расчетах судостроительных конструкций целесообразно проводить линейные расчеты, так как нелинейные – значительно более ресурсоемкие. Известной особенностью МКЭ расчетов в линейной постановке являются точки сингулярности. Вместе с тем, сингулярность поддается интегрированию. То есть, средние напряжения могут быть определены, если задаться площадкой интегрирования. В рассмотренных нормативных документах ИКО – членов МАКО, в частности [1 и 3], для линейного локального анализа на мелкой сетке допускалось превышение предела текучести вплоть до 1,7 раза. Поскольку численные значения соответствующих коэффициентов превышения в рассмотренных документах не приводились, для решения этой задачи было выполнено следующее исследование: рассмотрено Т-образное соединение оболочек, являющееся линией сингулярности. Конструкция была рассчитана на максимальную нагрузку, при которой в зоне шва начиналась пластическая деформация без упрочнения. Расчет выполнялся в двух постановках:

- численное моделирование эксперимента (нелинейные расчеты с учетом пластичности стали и определением предельного состояния);
- оболочечная постановка без швов. Определение напряжений, осредненных на площадке 50 × 50 мм, соответствующих предельному состоянию.

Размер площадки осреднения принят исходя из следующего: наиболее характерные максимальные толщины конструктивных элементов для большинства судов – 20 мм (для наружной обшивки или листовых конструкций крупнотоннажных судов или судов ледового плавания – до 30–40 мм), поэтому целесообразно ограничить этот размер ближайшей большей характерной величиной – 50 мм. Это же значение является максимально возможным для использования оболочечных элементов, конструкции с толщинами более 50 мм должны моделироваться только объемными КЭ.

### **Пример расчета прочности конструкций корпуса несамоходной баржи**

Для оценки удобства пользования Руководством и корректности получаемых результатов в программном комплексе ANSYS Mechanical были выполнены тестовые расчеты прочности несамоходной баржи (рисунок 1) с учетом всех рекомендаций и требований Руководства. Баржа, предназначенная для перевозки различных грузов на палубе, была нагружена внешним гидростатическим давлением, значение которого определялось в соответствии с ч. II [5], давлением на внутренние поверхности от балласта (в соответствии и с принятым случаем загрузки из судовой Информации об остойчивости, рисунок 4), а также распределенными давлениями на палубу от перевозимого груза.

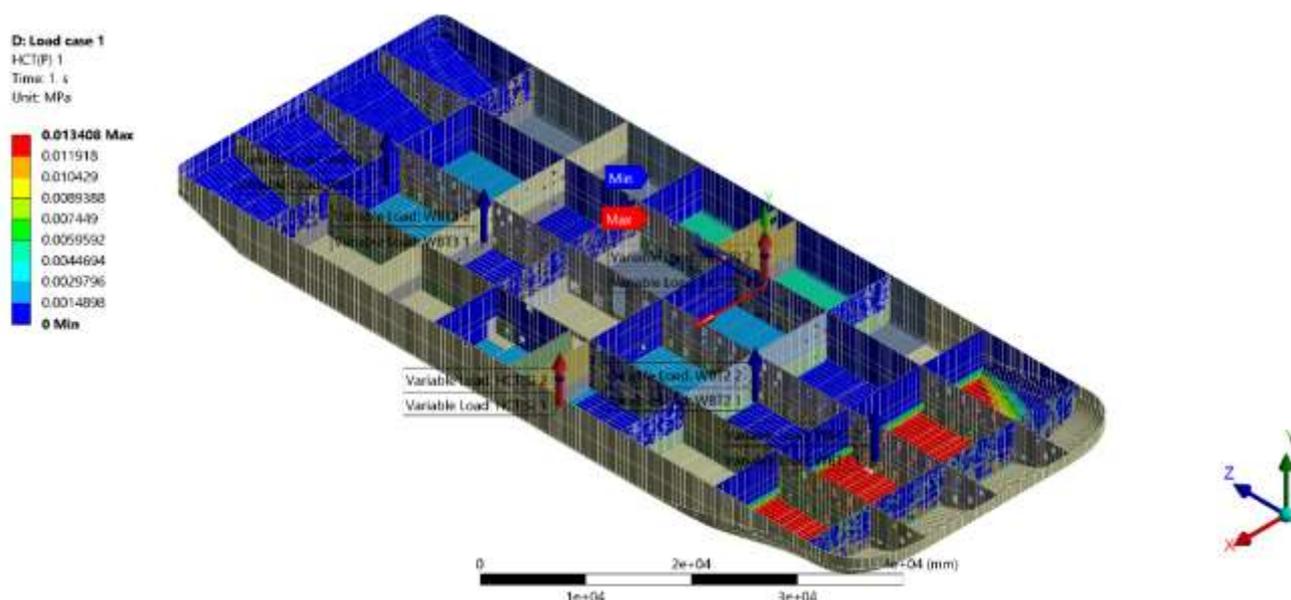
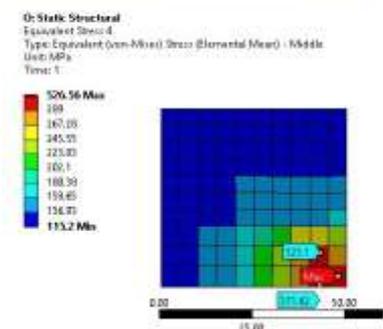
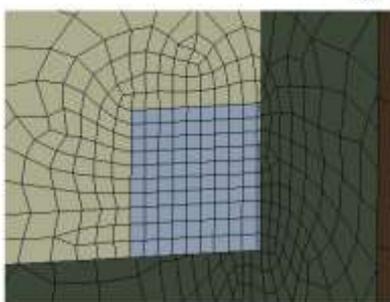
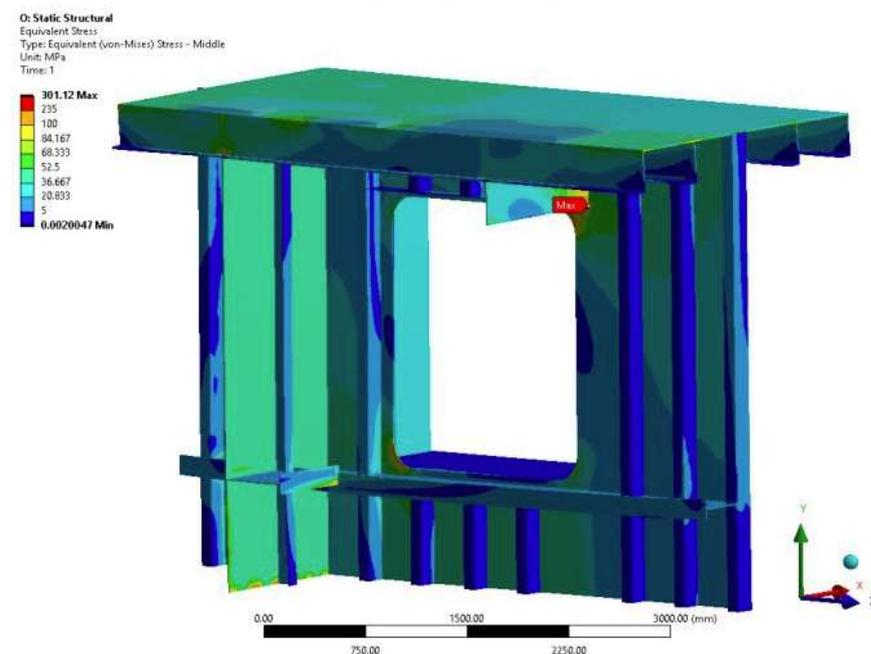


Рисунок 4 – Схема распределения давлений на внутренние поверхности конструкции баржи от балласта

После выполнения глобального и частичного анализа в модели был идентифицирован район, где не выполнялись критерии прочности (таблица 1) для соответствующего типа анализа, а именно пересечение рамного бимса с продольной переборкой, имеющей вырез для двери (рисунок 5а). Данный узел был выделен в отдельную субмодель, на которой был произведен расчет в соответствии с рекомендациями для локального анализа и применением соответствующих критериев. Для выполнения требований руководства в области концентрации напряжений создана площадка размером  $50 \times 50 \text{ мм}^2$  (рисунок 5б), на которой выполнено осреднение напряжений. Значение средних напряжений составило 154 МПа, что удовлетворяет требованиям локального анализа (290 МПа). Это подтвердило эффективность и

обоснованность предложенной классификации типов анализа и соответствующих им критериев прочности.



а)

б)

Рисунок 5 – Результаты локального анализа, а) – рассматриваемая конструкция, б) – площадка осреднения напряжений

### *Результаты обсуждения проекта Руководства в профессиональном сообществе*

В соответствии с Техническим заданием на выполнение НИР проект Руководства был разослан на отзывы в десять ведущих российских научных и проектных организаций, от пяти были получены развернутые ответы: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГБОУ ВО «СПбГМТУ», АО «ЦКБ «Коралл», ООО «МИБ-СПб» и АО «ЦКБ «Лазурит». Все рецензенты отметили актуальность и важность выполненной работы и дали ряд практически значимых предложений и замечаний,

учтенных авторами при подготовке доработанной редакции Руководства. Одно из таких замечаний относилось к использованию в Руководстве расчетных нагрузок со стороны моря (гидростатических и волновых), определяемых в соответствии с частью II [5], поскольку они являются в некоторой степени условными величинами, методологически связанными с допускаемыми напряжениями. Эти величины при разработке Правил РС корректировались таким образом, чтобы при достаточном уровне надежности, подтверждаемом практикой наблюдения за судами в эксплуатации, приводить к разумному уровню металлоемкости судовых конструкций. В самом деле, некоторые нормативные документы ИКО – членов МАКО по расчетам МКЭ приводят отдельные зависимости для определения расчетных нагрузок, однако неизвестно, насколько глубокие и долгосрочные исследования предшествовали их формулировкам. При этом совершенно очевидно, что в рамках поставленных РС задач и сроков выполнения НИР подобные исследования не могли быть выполнены (что подтверждается, например, отзывом ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»). В этой связи на первом этапе внедрения Руководства в практику РС было принято решение ограничить область его применения только статическими расчетами прочности («на тихой воде»). Кроме того, ввиду недостаточной изученности вопроса учета общего изгиба в прямых расчетах прочности корпуса судна конструкции, вовлеченные в общий изгиб, также вынесены за рамки области применения Руководства. В ходе рассмотрения результатов работы на секции «Прочность и конструкция корпусов морских судов и плавучих сооружений» Научно-технического совета РС было обозначено, что решение указанных вопросов требует отдельной научной проработки.

### ***Заключение***

В результате совместной работы АО «ЦНИИМФ» и АО «ЦИФРА», а также ряда других научных и проектных организаций разработан проект нового нормативного документа РС, регламентирующего применение МКЭ в расчетах прочности судовых корпусных конструкций. Верификационный расчет прочности корпуса судна подтвердил практическое удобство использования нового Руководства РС и его согласованность с аналогичным документом [4]. Вместе с тем разработанный проект Руководства стоит считать первым шагом к нормативному закреплению МКЭ в деятельности РС, и после должного периода его апробации оно может и должно быть усовершенствовано, что было подтверждено отзывами ведущих организаций отрасли.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:**

- 1 DNV GL Rules for Classification: Ships, Part 3 Hull, Chapter 7 Finite element analysis, 2016. – 22 p.
- 2 Bureau Veritas Rules for the Classification of Steel Ships Part B – Hull and Stability, Chapter 7 – Hull Scantlings, App. 1 – Analyses Based on Three Dimensional Models, 2018. – 528 p.

- 3 ABS SafeHull Finite Element Analysis of Hull Structures, 2014. – 50 p.
- 4 Class guideline – DNVGL-CG-0127 Finite element analysis, 2015. – 93 p.
- 5 Правила классификации и постройки морских судов: в 17 ч. – СПб.: РМРС, 2019.