

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.04; 624.042

РАЗРАБОТКА РУКОВОДСТВА РС ПО ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Петров, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

Е.А. Морозова, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: MorozovaEA@cniimf.ru

А.В. Соклаков, АО «ЦИФРА», Санкт-Петербург, e-mail: alexander@multiphysics.ru

В.А. Суворов, АО «ЦИФРА», Санкт-Петербург, e-mail: suvorov1303@mail.ru

В работе представлены результаты НИР по разработке нормативного документа РС, регламентирующего применение метода конечных элементов (МКЭ) в расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусных конструкций судов с классом РС. На основе анализа действующих нормативных документов иных классификационных обществ (ИКО) и существующего опыта расчета НДС судовых конструкций предложено руководство, в котором выделено четыре типа анализа: глобальный, частичный, локальный и стержневой. Для каждого типа анализа разработаны требования по включению элементов конструкции в модель, требования к КЭ сетке и закреплению модели в пространстве, даны критерии оценки прочности. Руководство апробировано на расчете прочности перекрытия как стержневой системы и на расчете прочности корпуса судна (несамоходной баржи) на действие проектных нагрузок со стороны моря и от балласта, а также от груза, перевозимого на палубе. Корректность моделирования общего изгиба корпуса судна при предлагаемых граничных условиях верифицирована путем сопоставления величин перерезывающих сил и изгибающих моментов, полученных аналитическим методом и МКЭ.

Ключевые слова: МКЭ, руководство РС, НДС, прямые расчеты прочности, численное моделирование

DEVELOPMENT OF RS GUIDELINES ON FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHIP HULL STRUCTURES

A.A. Petrov, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

E.A. Morozova, JSC "CNIIMF", St. Petersburg, e-mail: MorozovaEA@cniimf.ru

A.V. Soklakov, JSC "CIFRA", St. Petersburg, e-mail: alexander@multiphysics.ru

V.A. Suvorov, JSC "CIFRA", St. Petersburg, e-mail: suvorov1303@mail.ru

The paper presents the project for developing a RS normative document on application of the finite element analysis (FEA) method for calculating the stress-strain state of hull structures of the RS-classed ships. Based on the analysis of the current FEA calculation rules of the other classification societies and the existing experience of calculating stress-strain state of vessel structures, guidelines have been proposed with four types of analysis proposed: the global, partial, local and beam-based. For each type of analysis particular requirements for the inclusion of construction elements in the model have been developed along with requirements for the FE mesh and boundary conditions. Criteria for assessing the strength have also been given. The guidelines have been tried out on calculating the strength of the grillage as a beam system and on calculating the strength of a ship (barge) hull under the design wave-impact and ballast loading, as well as under the deck cargo load. The correctness of modeling the hull girder bending under the proposed boundary conditions has been verified by correlation of the values of the shear forces with bending moments obtained by the analytical method and FEA.

Keywords: FEA, RMRS guidelines, stress-strain state, direct strength calculations, numerical modelling

ВВЕДЕНИЕ

Численное моделирование различных физических процессов достаточно давно стало неотъемлемой частью инженерной деятельности практически во всех отраслях промышленности, среди которых судостроение не является исключением. Использование численных методов, реализованных в специализированных программных комплексах, позволяет решать широкий спектр задач, в первую очередь связанных с обоснованием мореходных качеств судов и прочности судовых конструкций. Последнее обеспечивается за счет применения метода конечных элементов (МКЭ) при оценке прочности и надежности как для отдельных типов судов (например, для судов, построенных по гармонизированным правилам МАКО), так и для различных конструкций, для которых в правилах классификационного общества (КО) либо не приводятся зависимости для назначения прочных размеров, либо не описываются способы определения специфических нагрузок, действующих на них. В первом случае, требования к расчетам МКЭ описаны в самих правилах, для второго же случая нормирование расчетов МКЭ в правилах Регистра распространяется на ограниченное число объектов. Таким образом, разработка универсального нормативного документа, расширяющего область применения МКЭ по отношению к объектам технического наблюдения Регистра, является востребованной и практически значимой задачей.

Для ее решения в 2018 — 2019 гг. по заказу Регистра АО «ЦНИИМФ» и АО «ЦИФРА» выполнили научно-исследовательскую работу, в результате которой был разработан проект нового нормативного документа РС, регламентирующего применение МКЭ в расчетах прочности корпусных конструкций судов с классом РС.

1. АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА

На первом этапе НИР проанализированы действующие нормативные документы иностранных классификационных обществ (ИКО): American Bureau of Shipping (ABS) [1, 2], Bureau Veritas (BV) [3] и Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd (DNV-GL) [4, 5]. Все рассмотренные ИКО имеют либо отдельные руководства по выполнению расчетов МКЭ, либо соответствующие главы в основных правилах классификации и постройки судов. Краткое сравнение рассмотренных документов приведено в табл. 1.

Отличительной особенностью всех рассмотренных документов является указание для проведения расчетов только в линейной постановке, однако в документах ABS и DNV-GL допускается превышение предела текучести материала при выполнении расчетов на мелкой сетке. В результате предварительного рассмотрения НИР на секции технического совета АО «ЦНИИМФ» с участием представителей Регистра принято решение предусмотреть в проекте Руководства возможность выполнять расчеты как в линейной постановке, так и с учетом нелинейных свойств материала.

Таблица 1

Краткое сравнение рассмотренных документов ИКО

	ABS	BV	DNV-GL
Область применения	Применимо только к танкерам, контейнеровозам и навалочным судам с $L \geq 150$ м	Применимо ко всем судам	Применимо ко всем судам
Размеры геометрической модели	Трехотсечная модель	Трехотсечная/одноотсечная модель	Глобальная, трехотсечная или локальная модель в зависимости от вида анализа
Требования к конечно-элементной сетке	Общие требования к сетке с указанием зон, в которых следует улучшить сетку	Требования к грубой, стандартной и детализированной сетке	Требования к сетке для каждого вида анализа
Прочее	Возможность превышения R_{eH} при анализе на мелкой сетке	Отдельная методика расчетов нагрузок со стороны моря для наклоненного судна	Возможность превышения R_{eH} при анализе на мелкой сетке

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РУКОВОДСТВА

В Руководстве выделяется четыре типа анализа напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций с помощью МКЭ:

- **глобальный**, когда моделируется весь корпус судна, с обоснованным уровнем идеализации, см. рис. 1 (не учитываются мелкие детали, конструктивное оформление соединения балок набора, вырезы и т.п.);
- **частичный**, модель для которого включает часть корпуса, см. рис. 2 (возможно моделирование носовой/кормовой оконечности или иной части корпуса судна, не участвующей в общем изгибе, в районе воздействия специфических нагрузок от оборудования, судовых устройств и т.п.);
- **локальный**, в котором рассматриваются зоны с концентраторами напряжений, см. рис. 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 типа анализа рекомендован к применению только для тех случаев, когда это предусмотрено действующим Правилами РС).

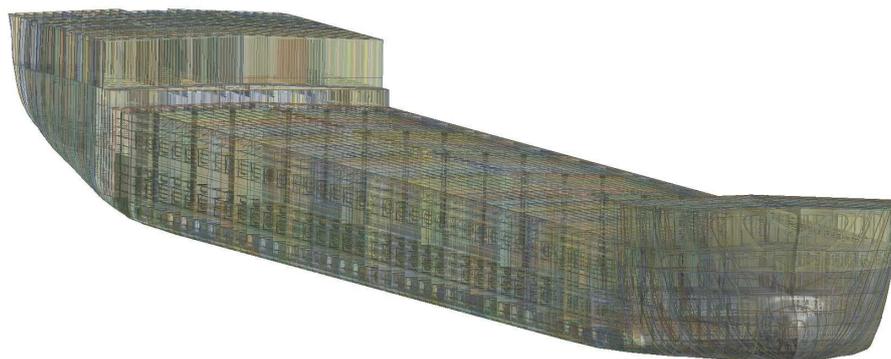


Рис. 1 Пример модели для глобального анализа — корпус судна целиком



Рис. 2 Пример модели для частичного анализа — платформа под грузовую лебедку

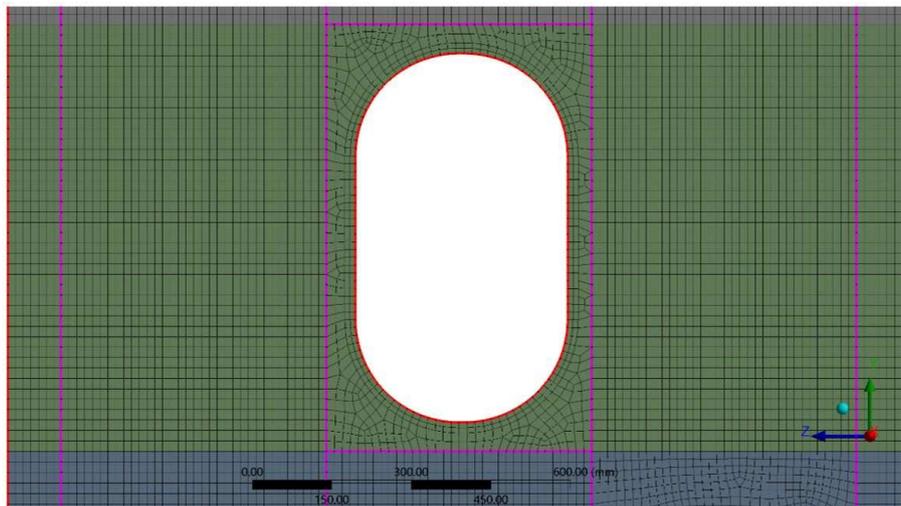


Рис. 3 Пример модели для локального анализа (субмодели) — вырез в продольной переборке

При использовании Руководства для проверки прочности судовых конструкций используются т.н. «нетто-размеры», т.е. размеры конструкций за вычетом надбавки на износ.

В Руководстве рассматривается только случай воздействия статических нагрузок на корпус судна. Расчетные нагрузки разделяются на два типа — проектные (статическая составляющая нагрузки со стороны моря, от перевозимого груза и т.д.), и специфические, для определения которых требуются специальные методики или отдельные обоснования.

Основные требования, ограничения и критерии оценки результатов для первых трех типов анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные требования для глобального, частичного и локального анализа

	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 отверстия с $l \geq 2,5$ и/или $b \geq 1,2$ (l и b — длина и ширина отверстия, м)	В дополнение к конструкциям для глобального анализа: продольные и поперечные элементы основного набора и ребра жесткости, бракетки и кницы, люки и отверстия размеров, сопоставимых с размерами КЭ (моделируются путем удаления КЭ)	В дополнение к конструкциям для частичного анализа: полки и фланцы книц и бракет, срезки «на ус», все отверстия и вырезы, полки по контурам вырезов, сварные швы (опционально и только при использовании КЭ типа "SOLID")
Требования к сетке	Типы КЭ: "ROD", "BEAM", "SHELL", "SOLID"; Размеры КЭ: не более расстояний между рамными связями; Прочее: геометрические характеристики балок, исключенных из модели, учитываются в балочных элементах, расположенных по границам листовых	Типы КЭ: "ROD", "BEAM", "SHELL", "SOLID"; Размеры КЭ: не более расстояний между ребрами жесткости, для рамных балок — не менее трех КЭ по длине пролета; Прочее: фланцы бракет могут быть смоделированы КЭ типа "ROD" или "BEAM"	Типы КЭ: "SHELL" и "SOLID" — в рассматриваемой области; за ее пределами — допускается "BEAM"; Размеры КЭ: не более 50 × 50 мм; Прочее: фланцы бракет должны быть смоделированы КЭ типа "SHELL" или "SOLID", не менее двух КЭ по ширине
Закрепление модели в пространстве	Комбинация ограничений перемещений трех характерных точек на корпусе (положение точек определено исходя из типа судна)	Для модели носовой/кормовой оконечности — комбинация ограничений перемещений двух точек по краям модели, связанных со всеми продольными элементами; Для модели перекрытия — закрепление по ближайшим переборкам; Для иной модели — обосновывается в каждом конкретном случае	Когда локальный анализ выполняется в рамках глобального или частичного (в составе макромоделей) — так же как для соответствующего типа анализа; Когда локальный анализ выполняется в рамках субмоделирования — граничные условия — узловые перемещения из глобальной или частичной модели
Критерии оценки прочности	$\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{glob}$ $[\sigma]_{glob} = 175/\eta$, МПа η — в соответствии с 1.1.4.3 части II Правил РС [6].	в линейной постановке: $\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{part}$ $[\sigma]_{part} = 188/\eta$, МПа в нелинейной постановке: выполняется оценка несущей способности в соответствии с 1.2.17 части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС [6]	в линейной постановке, при использовании оболочечных КЭ: $\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{loc}$ $[\sigma]_{loc} = 289/\eta$ — для района сварного шва, МПа; $[\sigma]_{loc} = 367/\eta$ — вдали от сварного шва, МПа σ_{eqv} — осредняется на площадке 50 × 50 мм; в линейной постановке, при использовании объемных КЭ: $\sigma_{eqv} \leq [\sigma]_{loc}$ $[\sigma]_{loc} = \sigma_T$, МПа σ_T — предел текучести материала в нелинейной постановке: выполняется оценка несущей способности в соответствии с 1.2.17 части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» Правил РС [6]

Примечание. В целях повышения эффективности производства при расчетах судостроительных конструкций целесообразно проводить расчеты в линейной постановке, так как расчеты в нелинейной постановке значительно более ресурсоемки. Известной особенностью МКЭ расчетов в линейной постановке являются точки сингулярности. Вместе с тем, сингулярность поддается интегрированию. В рассмотренных нормативных документах ИКО, в частности [2, 5] для линейного локального анализа на мелкой сетке допускалось превышение предела текучести вплоть до 1,7 раз. Поскольку обоснования численных значений соответствующих коэффициентов превышения в рассмотренных документах не приводилось, для решения этой задачи выполнено следующее исследование: рассмотрено Т-образное соединение оболочек, являющееся линией сингулярности. Конструкция 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. В результате получены значения коэффициентов допускаемых напряжений для локального анализа, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов допускаемых напряжений для локального анализа

Конструкции	ABS	DNV-GL	PC
Вдали от сварных швов	1,19 — 1,43 ¹	1,36	1,56
В районе сварных швов	1,19 — 1,43 ¹	1,20	1,23

¹В зависимости от размера КЭ.

3. АПРОБАЦИЯ РУКОВОДСТВА

В целях проверки обоснованности требования и рекомендаций Руководства, а также оценки удобства его практического использования в рамках второго этапа НИР произведено сравнение расчета МКЭ, выполненного в соответствии с Руководством, с аналитическим решением той же задачи. Оценивалась прочность конструкции палубы под грузовую лебедку (см. рис. 2). В результате аналитического решения (расчет перекрытия как стержневой системы) получены значения максимальных эквивалентных напряжений в бимсах палубы равные 62,3 МПа. В расчете МКЭ получены значения 69,4 МПа (см. рис. 4), то есть разница между двумя результатами составила порядка 5 %.

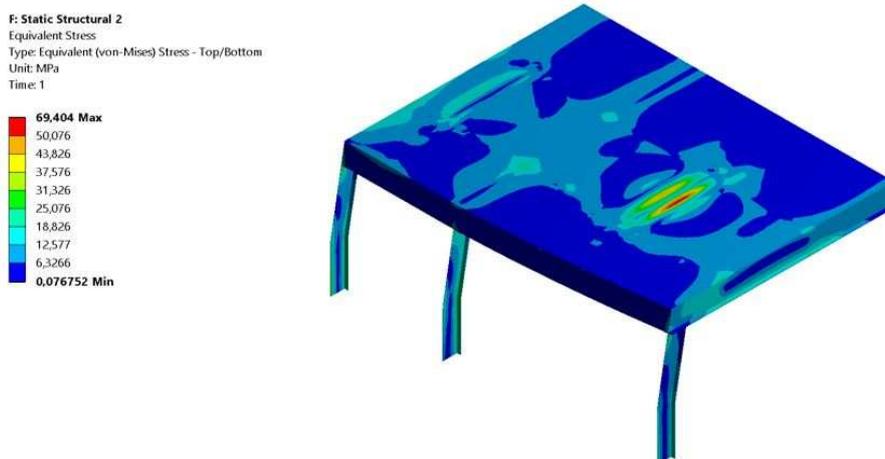


Рис. 4 Результаты расчета прочности палубы МКЭ

Помимо описанного выше примера, в рамках НИР также выполнен поэтапный расчет прочности корпуса судна (несамоходной баржи) на действие проектных нагрузок со стороны моря и от балласта, а также от груза, перевозимого на палубе. Этапы расчета соответствовали глобальному, частичному и локальному анализам, с выполнением всех требований и положений разработанного Руководства. Глобальный и частичный анализ показали неудовлетворительные результаты, после чего выполнен локальный анализ с применением критериев для линейной постановки и использования оболочечных элементов.

Максимальные напряжения возникли вблизи пересечения рамных бимсов с продольной переборкой, имеющей вырез для двери. В глобальном анализе в этом месте наблюдались значения 212 МПа, что превышает уровень допускаемых напряжений для глобального анализа в 175 МПа. В результате частичного анализа в этом же месте определен уровень напряжений 252 МПа, что превышает уровень допускаемых напряжений в частичном анализе, который составляет 188 МПа. Сравнение результатов глобального и частичного анализа представлено на рис. 5.

Поскольку в результате глобального и частичного анализов действующие напряжения превысили допускаемые, был выполнен локальный анализ в «проблемной» зоне. При его выполнении использована технология субмоделирования (см. рис. 6). Для выполнения требований руководства в области концентрации

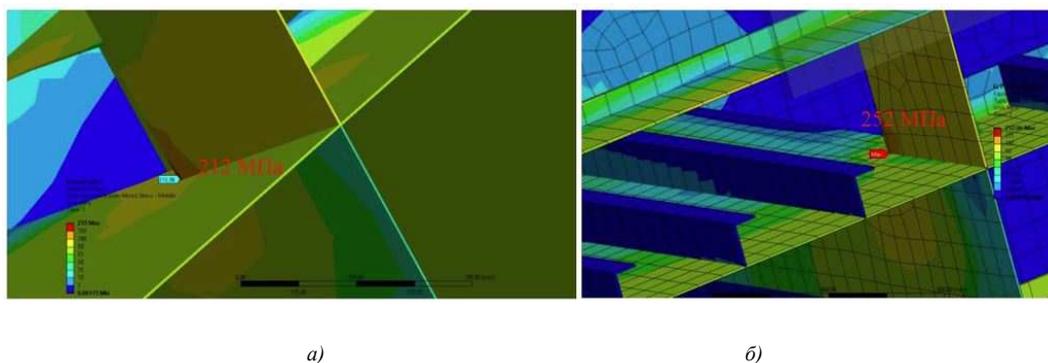


Рис. 5 Сравнение результатов глобального (а) и частичного (б) анализов

напряжений создана площадка размером $50 \times 50 \text{ мм}^2$ (см. рис. 6б), на которой выполнено осреднение напряжений. Значение средних напряжений составило 154 МПа, что удовлетворяет требованиям локального анализа (289 МПа).

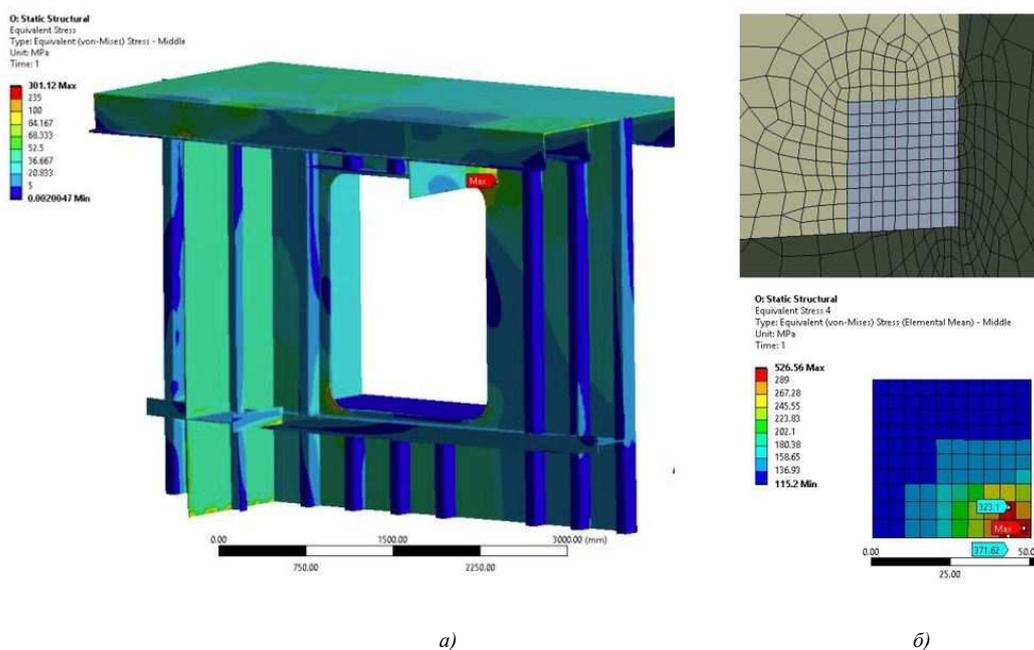


Рис. 6 Результаты локального анализа:
 а) — рассматриваемая конструкция, б) — площадка осреднения напряжений

В рамках НИР была проведена верификация корректности моделирования изгиба корпуса судна на тихой воде. Для этого решена тестовая задача для глобальной модели условного судна с упрощенной конструкцией: судно без набора с двойными бортами и усиленным двойным дном, продольной переборкой в ДП и тремя поперечными переборками. КЭ-сетка отвечает критериям качества, приведенным в Руководстве. Граничные условия выбраны в соответствии с требованиями соответствующих глав Руководства. Значения перерезывающих сил и изгибающих моментов на тихой воде, полученные в результате КЭ расчета, сравнивались со значениями, определенными аналитически в ПО для расчетов посадки и остойчивости StabEdit Pro 3.2, сертифицированным Регистром, СТО № 15.00903.314 от 16.09.2015.

В результате получены эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил аналитическим и численным методом (см. рис. 7 и 8). В аналитическом расчете не учитывается момент, образованный давлением со стороны моря на торцевые поверхности корпуса судна, который можно вычислить по формуле

$$M_{\Delta} = \frac{pBd}{2}(z - d/3)10^{-3}, \text{ кНм},$$

где $p = \rho g d$ — давление на уровне ОП на торцевой поверхности судна, Па;
 ρ — плотность воды, кг/м³;
 g — ускорение свободного падения, м/с²;
 d — осадка на торцевой поверхности судна, м;
 B — ширина торцевой поверхности судна, м;
 z — отстояние нейтральной оси по высоте от ОП, м.

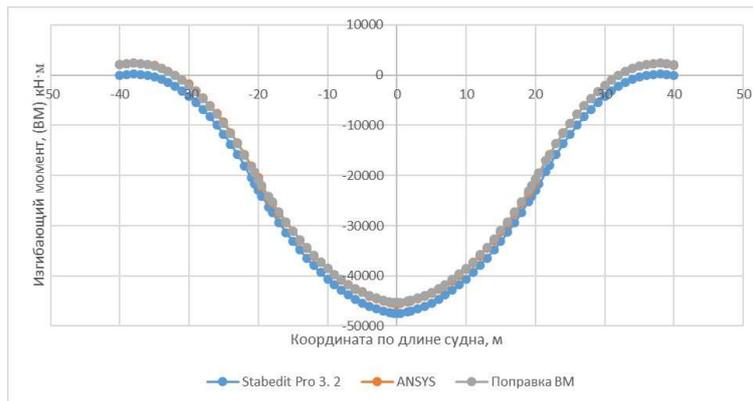


Рис. 7 Эпюра изгибающих моментов

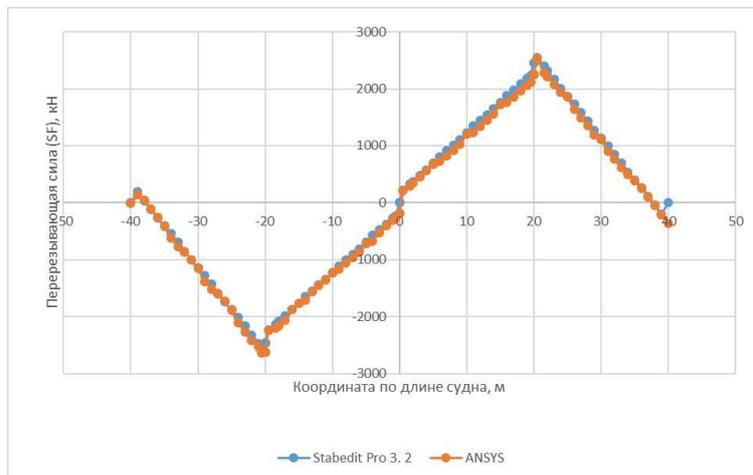


Рис. 8 Эпюра перерезывающих сил

Графики показывают хорошую сходимость расчета МКЭ с аналитическим решением с учетом поправки M_{Δ} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате рассмотренной НИР был разработан проект Руководства РС по оценке НДС судовых корпусных конструкций МКЭ. Расчет прочности корпуса судна, выполненный в соответствии с проектом Руководства, показал удобство его практического использования и достоверность полученных результатов.

Верификация моделирования изгиба корпуса на тихой воде показала корректность требований к граничным условиям, приведенных в Руководстве. Также достигнута поставленная задача гармонизации нового нормативного документа с действующими Правилами РС.

Стоит отметить роль других научных и проектных организаций в достижении основной цели НИР — полученные отзывы от «ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГБОУ ВО «СПбГМТУ», АО «ЦКБ «Коралл», ООО «МИБ-СПб» и АО «ЦКБ «Лазурит» содержали ряд практически ценных и значимых комментариев и предложений, учтенных авторами при разработке проекта Руководства. Вместе с тем, основываясь на мнении признанных специалистов в области численного моделирования и строительной механики корабля, стоит полагать, что в результате апробации Руководства впоследствии может потребоваться отступление от принятой гармонизации с действующими Правилами РС и выделение численного моделирования в более обособленное направление деятельности как проектных, так и контролирующих организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ABS SafeHull Finite Element Analysis of Hull Structures, 2014.
2. ABS Guide for "SafeHull-Dynamic Loading Approach" for Vessels, 2017.
3. Bureau Veritas Rules for the Classification of Steel Ships Part B — Hull and Stability, 2018.
4. Class guideline — DNVGL-CG-0127 Finite element analysis, 2015.
5. DNV GL Rules for Classification: Ships, 2016.
6. Правила классификации и постройки морских судов: в 17 ч. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2019.

REFERENCES

1. ABS SafeHull Finite Element Analysis of Hull Structures, 2014.
2. ABS Guide for "SafeHull-Dynamic Loading Approach" for Vessels, 2017.
3. Bureau Veritas Rules for the Classification of Steel Ships Part B – Hull and Stability, 2018.
4. Class guideline – DNVGL-CG-0127 Finite element analysis, 2015.
5. DNV GL Rules for Classification: Ships, 2016.
6. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, RS, 2019. (In Russian)