

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-24-28
УДК 629.5.011

Д.А. Алексашин, М.А. Кутейников
ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, Россия

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГИСТРОМ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ATLAS HULL 3D ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТОВ МКЭ СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ОБЩИХ ПРАВИЛ МАКО

В статье приведен анализ требований Общих Правил МАКО для расчетов МКЭ корпусных конструкций. Приведены примеры использования ПО ATLAS HULL 3D для выполнения соответствующих расчетов.

Ключевые слова: Общие Правила МАКО, Российский морской регистр судоходства, ПО ATLAS HULL 3D, нефтеналивные суда, навалочные суда.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-24-28
UDC 629.5.011

D.A. Alexashin, M.A. Kuteinikov
Russian Maritime Register of Shipping (RS), St. Petersburg, Russia

RS EXPERIENCE IN APPLICATION OF ATLAS HULL 3D SPECIAL SOFTWARE FOR FE-CALCULATIONS AS PER IACS CSR

This paper analyzes Common Structural Rules (CSR) of IACS for finite-element calculations of hull structures and discusses the examples of Atlas Hull 3D application for corresponding calculations.

Keywords: IACS, Common Structural Rules, Russian Maritime Register of Shipping, Atlas Hull 3D software, tankers, bulkers.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение. О МАКО, Общих Правилах МАКО и Программном Обеспечении

В современном мире международное сотрудничество является неотъемлемой частью процесса обеспечения безопасности мореплавания. Для упрощения процесса международного взаимодействия в 1968 году была создана Международная Ассоциация Классификационных Обществ (МАКО), целью которой является повышение стандартов мореплавания,

обеспечение гарантии морской безопасности через разработку и внедрение технических норм, проверку соответствия указанным нормам, внедрение результатов исследований и научных разработок. Российский морской регистр судоходства (Регистр) является полноправным членом МАКО с 1969 года и активно участвует в работе по всем направлениям деятельности этого международного объединения.

Результатом многолетней совместной работы классификационных обществ стало вступление

Для цитирования: Алексашин Д.А., Кутейников М.А. Опыт использования регистром специализированного программного обеспечения ATLAS HULL 3D для выполнения расчетов МКЭ согласно требованиям общих правил МАКО. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; Специальный выпуск 1: 24–28.

For citations: Alexashin D.A., Kuteinikov M.A. RS experience in application of Atlas Hull 3D special software for FE-calculations as per IACS CSR. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; Special Edition 1: 24–28 (in Russian).

1 июля 2015 года в силу Общих Правил МАКО [1], которые являются нормативным документом, предполагающим комплексный подход к анализу прочности и надежности судовых корпусных конструкций. Структурно Правила подразумевают два этапа расчета конструкции – первый этап (англ. *prescriptive*), на котором при помощи относительно простых аналитических зависимостей проектант может оценить размеры будущей конструкции, а также этап прямого расчета прочности, устойчивости и усталостной долговечности при помощи метода конечных элементов (МКЭ) (англ. *direct strength/buckling/fatigue analysis*) на котором проектант верифицирует размеры конструкции, полученные на первом этапе. Общие Правила МАКО как нормативный документ постоянно совершенствуются, и РМРС активно принимает участие в этом процессе.

Выполнение проверочных расчетов корпусных конструкций на соответствие требованиям Общих Правил МАКО требует использования специализированного программного обеспечения. Ведущие классификационные общества мира имеют в своем распоряжении собственные программные комплексы: DNV-GL – Nauticus Hull, Bureau Veritas – VeriSTAR Hull, ABS и LR – Common CSR Software, RINA – Leonardo Hull и другие. Регистр использует собственный программный комплекс ATLAS.

Программный комплекс ATLAS состоит из двух программных модулей: ATLAS PRESCRIPTIVE и ATLAS HULL 3D, которые позволяют проводить проверку соответствия корпусных конструкций требованиям Общих Правил МАКО на стадиях *prescriptive* и *direct strength/buckling/fatigue analysis* соответственно. В данной статье пойдет речь о требованиях Общих Правил МАКО расчетам прочности и устойчивости с применением МКЭ (усталостная долговечность в силу своей сложности может быть темой отдельной статьи) и возможностях модуля ATLAS HULL 3D.

Алгоритм процесса расчета, представленный в Правилах. Требования Правил к построению модели

В соответствии с требованиями Общих Правил МАКО анализ результатов расчетов МКЭ состоит из трех этапов:

- Анализ грузового трюма (*Cargo hold analysis*) для верификации конструктивных размеров продольных элементов конструкции корпуса, рамного набора и переборок.

- *Fine mesh analysis* для оценки полей напряжений в оговоренных в тексте Общих Правил МАКО конструктивных узлах, в которых на основе опыта эксплуатации предполагается появление больших напряжений.
- *Very fine mesh analysis* проводится для оценки усталостной долговечности улов пересечения балок основного и рамного набора.

При анализе грузового трюма необходимо проинвестировать моделирование не только проверяемого отсека, но и отсека кормовое и носовое для уменьшения влияния граничных условий на результаты расчета.

В процессе формирования геометрии модели должны быть сформированы все основные продольные и поперечные элементы конструкции корпуса такие как:

- Внутренняя и внешняя обшивка.
- Палуба.
- Флоры и стрингеры.
- Балки основного и рамного набора.
- Продольные и поперечные переборки.
- Другие связи, включаемые в эквивалентный брус.

Модель должна повторять форму корпуса судна в рассматриваемом районе, а также покрывать всю ширину и высоту рассматриваемого судна, для того чтобы имелась возможность прикладывать несимметричные случаи нагружения, предусмотренные Общими Правилами МАКО.

Fine mesh analysis подразумевает, в основном, выделение из предварительно рассчитанной основной модели для анализа грузового трюма локальной модели, на граничные узлы которой передается информация о перемещениях от основной модели.

Расчет внутренних усилий производится путем решения задачи в линейной постановке с использованием трехмерной модели.

Для моделирования листовых элементов необходимо использовать элементы типа SHELL, для моделирования балок основного набора, ребер жесткости и свободных поясков необходимо использовать элементы типа BEAM или ROD. Требования Общих Правил МАКО основаны на применении двух-узловых элементов для моделирования балочных конструкций и четырех-узловых элементов для моделирования листовых конструкций. Применение других типов элементов Общими Правилами МАКО допускается, однако, руководств к оценке получаемых при этом результатов МАКО на данный момент составлено не было.

Граничные условия

Граничные условия при анализе грузового трюма моделируют ограничения, связанные с отброшенными частями корпуса. Согласно требованиям Общих Правил МАКО, к модели должны быть приложены два вида граничных условий:

- *End constraint beams.*
- *Rigid links/Independent point.*

End constraint beams представляют собой дополнительные балочные элементы, создающиеся в сечениях, являющихся границами модели. Указанные балочные элементы создаются таким образом, чтобы соединить между собой концевые узлы каждого продольного конструктивного элемента. Геометрические характеристики добавочных балочных элементов определяются исходя из геометрических характеристик поперечного сечения корпуса судна:

$$I_{yy-n50} = I_{zz-n50} = I / 25;$$

$$A_{y-n50} = A_{z-n50} = A / 80,$$

где I – момент инерции рассматриваемого поперечного сечения относительно вертикальной оси, m^4 ; A – площадь рассматриваемого поперечного сечения, m^2 .

Граничные условия типа *end constraint beams* необходимы для учета деформаций при кручении.

Ограничение типа *rigid links/independent point* подразумевает, что в концевых сечениях, как правило, в точке пересечения нейтральной оси и ДП рассматриваемого сечения (особые случаи отдельно обговорены в Общих Правилах МАКО) создается узел на

перемещения которого накладываются дополнительные ограничения. Этот узел (*independent point*) соединяется с концевыми узлами каждого продольного конструктивного элемента несжимаемыми стержнями (*rigid links*). Данный тип граничных условий обеспечивает ограничение перемещения модели в пространстве и выполнение гипотезы плоских сечений.

Требования Правил к приложению нагрузок

После завершения формирования геометрии и закрепления модели к ней необходимо приложить расчетные нагрузки. Анализ грузового трюма и *Fine mesh analysis* основаны на приложении к модели состояний нагрузки, описываемых в Общих Правилах МАКО (*Rule loading condition*) (см. рис. 1).

Расчетные состояния нагрузки представляют собой комбинацию следующих элементов:

- *Loading pattern* (комбинация условий загрузки трюмов и расчетных осадок).
- Комбинации нагрузок на тихой воде (процент от допускаемых значений изгибающего момента и перерезывающих сил на тихой воде).
- Внешние инерционные (в тексте Общих Правил МАКО называются динамическими) давления.

Приложение вышеуказанных нагрузок приводит к тому, что модель оказывается нагружена неуравновешенными нагрузками. Несбалансированные нагрузки должны быть в этом случае уравновешены дополнительными нагрузками (*Adjustment loads*), прикладываемыми в концевых сечениях модели.

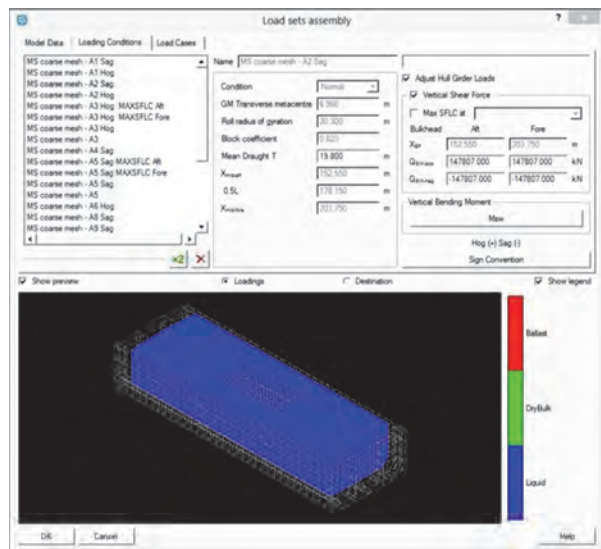


Рис. 1. Приложение нагрузок в ПО ATLAS HULL 3D

| | HSM | HSA | FSM | BSR | BSP | Ost | OSA | Static | | | |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|----|----|----|
| 1 | 2 | 1 | 2 | 1P | 2P | 1S | 2S | 1P | 2P | 1S | 2S |
| MS coarse mesh - A1 Sag | 1 | | | | | 2 | 3 | | | | |
| MS coarse mesh - A1 Hog | | | | | | | | 4 | | | |
| MS coarse mesh - A2 Sag | 5 | | 6 | 14 | 15 | 16 | 17 | | 9 | 10 | 11 |
| MS coarse mesh - A2 Hog | 13 | | | | | | | | | | 12 |
| MS coarse mesh - A3 Hog | 18 | | | 19 | 20 | 21 | 22 | | | | |
| MS coarse mesh - A3 Hog M | 24 | | | | | | | | | | |
| MS coarse mesh - A3 Hog M | 25 | | | | | | | | | | |
| MS coarse mesh - A3 Hog | | | | | | | | 26 | | 27 | |
| MS coarse mesh - A3 | | | | | | | | 28 | | 29 | |
| MS coarse mesh - A3 Hog M | 30 | | | 31 | 32 | 33 | 34 | | | | 35 |
| MS coarse mesh - A3 Sag MA | 37 | | | | | | | | | | 36 |
| MS coarse mesh - A5 Sag MA | 38 | | | | | | | | | | |
| MS coarse mesh - A5 Sag | | | | | | | | 39 | | 40 | |
| MS coarse mesh - A5 | | | | | | | | 41 | | 42 | |
| MS coarse mesh - A6 Hog | 43 | | | 44 | 45 | 46 | 47 | | | | 48 |
| MS coarse mesh - A6 Sag | 50 | | | 51 | 52 | 53 | 54 | | | | 55 |
| MS coarse mesh - A9 Sag | | | | | | | | | | | 57 |
| MS coarse mesh - A10 Sag | | | | | | | | | | | 58 |
| MS coarse mesh - A11 Sag | | | | | | | | | | | 59 |
| MS coarse mesh - A11 Hog | | | | | | | | | | | 60 |
| MS coarse mesh - A12 a | | | | | | | | | | | 61 |
| MS coarse mesh - A12 b | | | | | | | | | | | 62 |
| MS coarse mesh - A13 Hog M | | | | | | | | | | | 63 |
| MS coarse mesh - A13 Hog M | | | | | | | | | | | 64 |
| MS coarse mesh - A14 Hog | | | | | | | | | | | 65 |
| MS coarse mesh - A1 F Full | | | | | | | | | | | |
| MS coarse mesh - A2 F Num | | | | | | | | | | | |

В требованиях Общих Правил МАКО определены так называемые целевые значения (*target values*) для изгибающих моментов и перерезывающих сил. Именно на действие этих величин проверяются корпусные конструкции, и именно достижение целевых значений нагрузок для каждого элемента конструкции позволяет уравновесить модель. Дополнительные нагрузки прикладываются через распределение продольных осевых сил, действующих на все продольные элементы конструкции корпуса, участвующие в общей прочности.

Расчет coarse-модели. Алгоритм верификации

Прочность следующих конструктивных элементов может быть оценена при анализе грузового трюма (Cargo hold analysis):

- Все продольные элементы конструкции корпуса, участвующие в общей прочности.
- Элементы рамного набора и переборки, расположенные в среднем трюме трех-отсечной модели.
- Все конструктивные элементы, являющиеся частью конструкции поперечной переборки.
- При оценке носовой части: все конструктивные элементы, являющиеся частью конструкции танранной переборки.
- При оценке кормовой части: все конструктивные элементы, являющиеся частью конструкции носовой переборки машинного отделения и все продольные элементы конструкции корпуса, участвующие в общей прочности на расстоянии 15 % от длины кормового грузового трюма (за исключением элементов, расположенных в слоп-танках).

Для всех листовых конструктивных элементов должны быть рассчитаны напряжения по фон Мизеса (см. рис. 2):

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2},$$

где σ_x , σ_y – нормальные напряжения, МПа; τ_{xy} – касательные напряжения, МПа.

Согласно требованиям Общих Правил МАКО, расчетными являются напряжения, определенные в центре площади элемента в среднем слое (*middle layer*).

Для балочных элементов осевые напряжения σ_{axial} , МПа, определяются на основе только действующей осевой силы. Осевые напряжения определяются в сечении на середине длины рассматриваемого балочного элемента.

Проверка соответствия прочности конструктивных элементов требованиям Общих Правил

МАКО производится на основе коэффициентов запаса. (см. таблицу).

Условием выполнения критерия прочности является:

$$\lambda_y \leq \lambda_{yperm},$$

где для листовых элементов:

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_Y};$$

для балочных элементов:

$$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_Y}, \text{ при этом } R_Y = \frac{235}{k},$$

где k – коэффициент использования механических свойств материала.

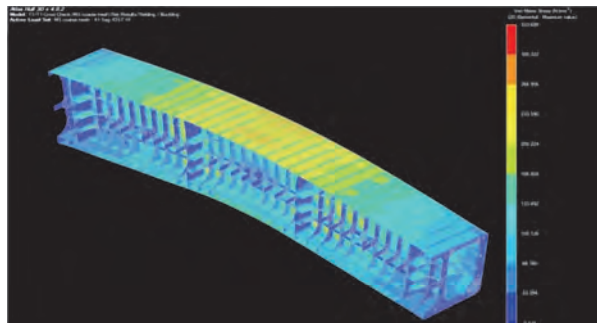


Рис. 2. Общий вид трех-отсечной модели после расчета

Значение коэффициент запаса в зависимости от типа конструктивного элемента

| Конструктивный элемент | Коэффициент запаса для оценки прочности λ_{yperm} |
|--|--|
| Листовые элементы, участвующие в обеспечении общей прочности, рамные связи и переборки. Свободные пояски балок рамного набора. | 1,0 для статических и инерционных случаев нагрузки 0,8 для статических случаев нагрузки |
| Гофрированные элементы корпусных конструкций или переборки с горизонтальными гофрами без нижнего стула под действием бокового давления от жидких грузов. | 0,9 для статических и инерционных случаев нагрузки 0,72 для статических случаев нагрузки |
| Гофрированные элементы корпусных конструкций или переборки с вертикальными гофрами без нижнего стула под действием бокового давления от жидких грузов. | 0,81 для статических и инерционных случаев нагрузки 0,65 для статических случаев нагрузки |

Выводы

Программный комплекс ATLAS HULL 3D прошел успешную апробацию на тестовых проектах и каждые пять лет будет проходить проверку в ходе работы проектной команды Cross-check панели МАКО Корпус, что позволяет в настоящее время специалистам РМРС использовать комплекс ATLAS HULL 3D для рассмотрения проектов судов.

Библиографический список

1. IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 2018.

Сведения об авторах

Алексагин Дмитрий Александрович, эксперт ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Адрес: 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 8. Телефон: +7 (812) 312-85-72.

E-mail: aleksashin.da@rs-class.org.

Кутейников Михаил Анатольевич, д.т.н., начальник отдела ФАУ «Российский морской регистр судоходства». Адрес: 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 8. Телефон: +7 (812) 312-85-72.

E-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org.

Поступила / Received: 25.03.19
Принята в печать / Accepted: 08.04.19
© Коллектив авторов, 2019