

УДК 629

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС СУДНА

Елисеева Ольга Владимировна,старший преподаватель
кафедра кораблестроения
o.eliseeva@narfu.ru**Мостов Арсений Михайлович**Студент 4 курса факультета «Кораблестроение»
mostov.a.@edu.narfu.ru**Алиев Всеволод Дмитриевич**Студент 4 курса факультета «Кораблестроение»
aliev.v@edu.narfu.ruФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова»
Россия, г. Северодвинск

Аннотация

Статья посвящена исследованию гидродинамического воздействия волновых нагрузок на корпус судна в условиях интенсивного морского волнения. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эксплуатационной надежности и безопасности морских судов, а также снижения рисков усталостных повреждений корпусных конструкций.

Ключевые слова: гидродинамика судна, волновые нагрузки, численное моделирование, CFD, прочность корпуса, морское волнение, изгибающий момент, безопасность мореплавания.

ANALYSIS OF THE HYDRODYNAMIC IMPACT OF WAVE LOADS ON A SHIP'S HULL

Eliseeva Olga Vladimirovna,Senior Lecturer
of the Department of Shipbuilding
o.eliseeva@narfu.ru**Mostov Arseniy Mikhailovich,**A 4th-year student of the Shipbuilding Faculty
mostov.a.@edu.narfu.ru

Aliyev Vsevolod Dmitrievich,

A 4th-year student of the Shipbuilding Faculty

aliyev.v@edu.narfu.ru

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov»

ABSTRACT

This article investigates the hydrodynamic impact of wave loads on a ship's hull under conditions of severe sea states. The study is motivated by the need to enhance the operational reliability and safety of marine vessels and to reduce the risk of fatigue damage to hull structures.

Keywords: ship hydrodynamics, wave loads, numerical modeling, CFD, hull strength, sea state, bending moment, navigation safety.

Мировой океан - это агрессивная и непредсказуемая среда. Для инженеров анализ гидродинамических нагрузок является главным условием безопасного проектирования судов. Понимание того, как именно волны воздействуют на металл, критически важно для предотвращения катастрофических разрушений корпуса. Ситуация осложняется тем, что современные суда (например, крупные контейнеровозы) регулярно работают в экстремальных условиях. Так, район Северной Атлантики официально признан одной из самых опасных зон в мире по версии классификационного общества DNV. Здесь судно сталкивается со случайными состояниями моря, где энергия волн распределяется нелинейно, создавая колоссальные изгибающие моменты.

При анализе воздействий необходимо рассмотреть характерные зоны концентрации напряжений в корпусных конструкциях.

Так, гидродинамическое воздействие волновых нагрузок распределяется по длине и высоте корпуса крайне неравномерно. Конструкция судна ведет себя как упругая балка, в которой из-за сложной геометрии обводов и вырезов возникают локальные очаги повышенного напряжения. [3] На основе анализа прочности элементов судового набора выделяются следующие критические зоны, наиболее подверженные деформациям и усталостному разрушению:

- Днищевая часть и перекрытия двойного дна:

Район миделевого сечения (середины судна) испытывает максимальные общие изгибающие моменты. При продольном волнении продольные балки днищевого набора (стрингера) попеременно работают на растяжение и сжатие в условиях знакопеременного изгиба (перегиб/прогиб). Ситуация усугубляется гидростатическим давлением снизу. Постоянный циклический изгиб делает двойное дно главным очагом накопления усталостных трещин в судовой стали.

- Стык бортов в носовой оконечности (форштевень):

Носовая часть судна первой принимает на себя кинетическую энергию набегающего потока. В этой зоне происходит жесткое столкновение конструкций с водяной массой. Динамические лобовые удары волн создают экстремальные локальные давления на наружную обшивку. При недостаточном подкреплении это приводит к потере устойчивости листов обшивки и разрушению внутренних связей форштевня.

- Область скулы (переход днища в борт):

Скуловые перекрытия находятся на стыке двух различных систем давлений: вертикальных сил выталкивания снизу и горизонтального давления масс воды сбоку. В условиях косого волнения скула подвергается сложному сопряженному скручиванию и изгибу. Резкое изменение геометрии корпуса в этой точке предопределяет высокий коэффициент концентрации напряжений, что требует особого внимания при проектировании скуловых килей и продольных ребер жесткости.

- Бортовые перекрытия в районе носового развала:

Особую опасность для протяженных бортовых перекрытий представляет бортовой слеминг, характерный для судов с наклонной или выпуклой формой носовых обводов (например, контейнеровозов). При сильной килевой качке носовая часть выходит из воды, а при последующем падении развал борта плавно, но с колоссальным усилием сминает водяную массу под собой. Возникающий при этом ударный импульс провоцирует явление виппинга — высокочастотной вибрации всего корпуса, резко увеличивающей пиковые напряжения в бортах и палубном стрингере. [1]

Процесс проектирования судна должен обеспечивать целостность корпуса, в которую существенный вклад вносят волновые нагрузки. Эти нагрузки должны отражать условия окружающей среды и эксплуатационные факторы, встречающиеся на протяжении всего жизненного цикла судна, что требует статистического описания среды и возникающих нагрузок, а также вычислительных эффективных методов моделирования подходящих расчетных условий.

Стохастическое (вероятностное) описание нагрузок необходимо для спектрального анализа усталости и расчета экстремальных нагрузок при проектировании судов, а также для применения методов оценки надежности судовых конструкций. При оценке продольной прочности большинства типов судов основными учитываемыми переменными нагрузками являются VWBM (Vertical Wave Bending Moments - вертикальные волновые изгибающие моменты) и SWBM (Still Water Bending Moments - изгибающие моменты на тихой воде). Также рассматривается комбинация этих двух компонентов с учетом того факта, что их максимальные значения не возникают одновременно. Значения SWBM меняются от рейса к рейсу, а также очень медленно изменяются в течение каждого отдельного рейса из-за расхода судовых запасов (топлива, воды и т.д.). Однако такими изменениями в рамках одного рейса обычно пренебрегают при исследовании комбинаций нагрузок. Важное значение также имеет комбинирование различных компонентов общих волновых нагрузок, таких как вертикальные и горизонтальные изгибающие моменты (HBM - Horizontal Bending Moments) и крутящие моменты, а также комбинирование глобальных и локальных компонентов волновых нагрузок (Mohammed et al., 2012). [2] В последние годы внимание исследователей в значительной степени сосредоточено на крупных контейнеровозах, где важную роль приобретают вибрационные нагрузки. У этих гибких судов, работающих на высоких скоростях, частота встречи с волной может совпадать с собственной частотой вибрации корпуса судна и вызывать резонанс, называемый спрингингом (springing - волновой резонансный изгиб). Эта установившаяся резонансная вибрация может возникать из-за двух узловой формы изгибных колебаний или связанных горизонтально-крутильных колебаний (последние исследованы относительно слабо). Как спрингинг, так и переходные вибрационные характеристики - виппинг (whipping - динамический изгиб от удара волны / слеминга), важны для проверки предельного состояния по усталости. Для проверки предельного состояния по несущей способности (предельной прочности) реакция в виде виппинга более важна, поскольку она может значительно увеличить экстремальный вертикальный волновой изгибающий момент (VWBM) жесткого тела. В последние годы в значительном количестве исследований рассматривалось стохастическое описание комбинированных реакций жесткого тела и вибрационных реакций сверхкрупных контейнеровозов (ULCS). [5] Наблюдается

тенденция рассматривать эти два компонента нагрузки совместно, а не изучать их по отдельности и затем объединять с использованием принципов комбинации нагрузок. Это частично связано с ростом популярности связанных гидродинамических и прочностных анализов, обеспечивающих результаты обоснованной/приемлемой точности, а частично — с характером модельных или натурных измерений. В этих случаях реакции жесткого тела и вибрационные реакции явно включаются в анализ, и нет необходимости их комбинировать. Вклад вибрационной составляющей можно оценить либо путем проведения анализа с учетом и без учета упругих эффектов, либо путем разделения низкочастотных и высокочастотных сигналов.

Общие волновые конструкционные нагрузки в конкретном поперечном сечении рассчитываются как разность между силой/моментом инерции и суммой гидродинамических и гидростатических сил/моментов, действующих на часть корпуса, расположенную новее (впереди) этого поперечного сечения.

$$M_k(t) = I_k(t) - R_k(t) - D_k(t) - K_k(t) - G_k(t)$$

$$M_k(t) = I_k(t) - R_k(t) - D_k(t) - K_k(t) - H_k(t) - G_k(t)$$

где I_k - сила, связанная с массой судна новее исследуемого поперечного сечения. Как и было принято для расчета движений судна, гидродинамические составляющие радиационных R_k и дифракционных D_k нагрузок являются линейными и нелинейными по форме корпуса соответственно для частично и полностью нелинейных программных кодов во временной области. Составляющие сил Фруда - Крылова K_k и гидростатических сил H_k всегда принимаются нелинейными по форме корпуса и рассчитываются по «точной» смоченной поверхности корпуса на каждом временном шаге. G_k - сила от заливания палубы.

Экспериментальные набегающие волны также служат исходными данными для численного моделирования. Экспериментальное волновое профилирование принимается стационарным и состоящим из бесконечного числа гармонических составляющих. Гармонические компоненты выделяются с помощью преобразования Фурье. [4] На нерегулярном длиннонакатном волнении профиль волны может быть записан в виде:

$$\zeta(t) = \sum (\zeta_a)_n \cos[(\omega_e)nt + k_n x \cos \beta + \varepsilon_n]$$

где ζ_a , ω_e , ε и k - амплитуда волны, частота встречи, фазовый угол и волновое число n -й гармонической составляющей соответственно;

β и x — курсовой угол судна относительно волнения и расстояние от центра тяжести судна по длине.

Одной из важных задач является исследование гидродинамических характеристик и эффекта распространения давления слеминга.

Слеминг представляет собой явление высокоинтенсивного волнового удара с крайне малой продолжительностью и большой амплитудой, возникающее вследствие относительного движения между поверхностью волны и корпусом судна. Точное прогнозирование пиковых значений ударного давления критически важно, поскольку локальные нагрузки могут вызывать остаточные пластические деформации и повреждения судовой обшивки, а вызываемый ими глобальный отклик балки корпуса способен привести к её полному катастрофическому разрушению.

Экспериментальные исследования наклонного входа тел в воду (испытания клиновидных моделей со свободным падением - выявили ключевые закономерности поведения нагрузок в зависимости от угла килеватости и упругости конструкций:

Влияние угла килеватости на параметры импульса:

При малых углах килеватости (от 0,2° до 4°) по мере продвижения фронта волны вдоль борта пиковое давления и коэффициент слеминга постепенно возрастают. При достижении критического угла в районе 10° коэффициент давления лавинообразно достигает своего максимума, а продолжительность импульса резко сокращается.

При больших углах килеватости (от 40 до 45°) форма и профиль бегущего импульса давления остаются практически неизменными в процессе распространения, однако сама амплитуда пика давления начинает затухать по мере удаления от точки первоначального контакта. При сверхбольших углах (больше 45°) импульс слеминга уплощается и затухает крайне медленно.

В настоящее время существует несколько конструктивных и эксплуатационных методов снижения нагрузок:

Изменение геометрии судна - Ложкообразная и инверсивная форма носа: вместо классического форштевня носовая часть заваливается назад (обратный наклон). Судно не взбирается на попутную волну и не падает с нее, а плавно прорезает толщу воды. Это практически ликвидирует днищевой слеминг.

Конструктивное усиление и подбор материалов - Применение сталей повышенной прочности (АН32, АН36, ДН36). Сгущение связей набора (Усиленный набор): в зонах слеминг (днище в носу, скуловые перекрытия) уменьшают шаг между продольными балками (стрингерами) и поперечными флорами. Это перераспределяет локальный точечный удар волны на большую площадь.

Активные и пассивные стабилизаторы качки - Скуловые кили: длинные стальные пластины, приваренные вдоль скулы судна. Они увеличивают гидродинамическое сопротивление при бортовой качке, гася энергию волн. Активные бортовые рули (Успокоители качки): выдвижные подводные крылья с компьютерным управлением. Они динамически меняют угол атаки прямо в шторм, создавая подъемную силу, противодействующую наклону судна. Интерцепторы и транцевые плиты: системы в кормовой части, которые оптимизируют продольную (pitch).

Интеллектуальные системы судовождения - Системы мониторинга напряжений (Hull Stress Monitoring): на днище, палубу и скулы тензодатчики. Если компьютер видит, что частота встречных волн начинает входить в резонанс с корпусом (спрингинг), он дает сигнал судоводителю. Изменение курса и скорости. Это выводит судно из зоны резонансных вибраций и снижает пиковые изгибающие моменты. [6]

На основе проведенного анализа гидродинамического воздействия волновых нагрузок на корпус судна и методов их минимизации можно сформулировать основные аспекты влияния:

- Неравномерность нагружения критических зон. Корпус судна в условиях интенсивного волнения ведет себя как упругая балка, испытывающая колоссальные знакопеременные нагрузки. Концентрация напряжений распределяется неравномерно и локализуется в характерных точках: в днищевой части миделя, на форштевне, в области скулы и бортовых перекрытий носового развала. Эти зоны являются главными очагами деформаций и долгосрочного накопления усталостных трещин в судовой стали.

- Критическая роль резонансных вибраций. Для современных крупных судов, работающих на высоких скоростях, гидродинамические силы инерции I_k и нелинейные составляющие Фруда — Крылова K_k и гидростатических сил H_k формируют сложный спектр нагружения. В этих условиях установившийся волновой резонанс (спрингинг) и динамический хлыстовой изгиб от ударов волн (вишпинг) способны резко увеличить пиковый вертикальный изгибающий момент (VWBM) жесткого тела, что создает прямую угрозу для предельной прочности и несущей способности конструкций корпуса.

- Зависимость слеминга от геометрии. Характер волнового удара (слеминга) предопределяется углом килеватости конструкций. При малых углах (до 40°) коэффициент слеминга лавинообразно возрастает, в то время как при больших углах (от 40 до 45°) форма бегущего импульса стабилизируется, а его амплитуда затухает по мере удаления от точки контакта.

- Необходимость комплексного противодействия нагрузкам. Обеспечение конструктивной безопасности судна требует совмещения пассивных и активных методов защиты. Снижение изгибающих моментов и интенсивности вибрирования достигается оптимизацией геометрии обводов (уменьшением развала бортов, использованием инверсивного носа), конструктивным усилением набора и применением высокопрочных сталей (марки АН32, АН36, ДН36) в миделевом сечении. Для гашения энергии качки эффективны скуловые кили и успокоители, а интеграция систем мониторинга напряжений позволяет судоводителю оперативно скорректировать курс и скорость для вывода из опасной зоны резонанса.

Список литературы:

1. Parunov, J. Benchmark study and uncertainty assessment of numerical predictions of global wave loads on damaged ships / J. Parunov, M. Ćorak, C. M. Guedes Soares, H. Jafaryeganeh, S. Kalske, Y. Lee, S. Liu, A. Papanikolaou, D. Prentice, J. Prpić-Oršić, P. Ruponen, N. Vitali // Ocean Engineering. 2019. No. 106876. DOI 10.1016/j.oceaneng.2019.106876.
2. Temarel, P. Prediction of wave-induced loads on ships: Progress and challenges / P. Temarel, W. Bai, A. Bruns, Q. Derbanne, D. Dessi, S. Dhavalikar, N. Fonseca, T. Fukasawa, X. Gu, A. Nestegård, A. Papanikolaou, J. Parunov, K. H. Song, S. Wang // Ocean Engineering. 2016. No. 3.030. DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.03.030.
3. Rajendran, S. Effect of bow flare on the vertical ship responses in abnormal waves and extreme seas / S. Rajendran, G. Vásquez, C. Guedes Soares // Ocean Engineering. 2016. No. 7.020. DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.07.020.
4. Liwång, H. Exposure, vulnerability and recoverability in relation to a ship's intact stability / H. Liwång // Ocean Engineering. 2019. No. 106218. DOI 10.1016/j.oceaneng.2019.106218.
5. Parunov, J. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships / J. Parunov, C. Guedes Soares, S. Hirdaris, X. Wang // Marine Structures. 2022. No. 103307. DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103307.
6. Duan, L. Experimental study on the propagation characteristics of the slamming pressures / L. Duan, L. Zhu, M. Chen, P. T. Pedersen // Ocean Engineering. 2020. No. 107868. DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.107868.

References:

1. Parunov, J. Benchmark study and uncertainty assessment of numerical predictions of global wave loads on damaged ships / J. Parunov, M. Ćorak, C. M. Guedes Soares, H. Jafaryeganeh, S. Kalske, Y. Lee, S. Liu, A. Papanikolaou, D. Prentice, J. Prpić Oršić, P. Ruponen, N. Vitali // Ocean Engineering. 2019. No. 106876. DOI 10.1016/j.oceaneng.2019.106876.
2. Temarel, P. Prediction of wave induced loads on ships: Progress and challenges / P. Temarel, W. Bai, A. Bruns, Q. Derbanne, D. Dessi, S. Dhavalikar, N. Fonseca, T. Fukasawa, X. Gu, A. Nestegård, A. Papanikolaou, J. Parunov, K. H. Song, S. Wang // Ocean Engineering. 2016. No. 3.030. DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.03.030.

3. Rajendran, S. Effect of bow flare on the vertical ship responses in abnormal waves and extreme seas / S. Rajendran, G. Vásquez, C. Guedes Soares // Ocean Engineering. 2016. No. 7.020. DOI 10.1016/j.oceaneng.2016.07.020.
4. Liwång, H. Exposure, vulnerability and recoverability in relation to a ship's intact stability / H. Liwång // Ocean Engineering. 2019. No. 106218. DOI 10.1016/j.oceaneng.2019.106218.
5. Parunov, J. Uncertainties in modeling the low frequency wave induced global loads in ships / J. Parunov, C. Guedes Soares, S. Hirdaris, X. Wang // Marine Structures. 2022. No. 103307. DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103307.
6. Duan, L. Experimental study on the propagation characteristics of the slamming pressures / L. Duan, L. Zhu, M. Chen, P. T. Pedersen // Ocean Engineering. 2020. No. 107868. DOI 10.1016/j.oceaneng.2020.107868.