

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5.015.4
EDN IXNQHS

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НОВЫХ ДАННЫХ О МОРСКОМ ВОЛНЕНИИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА ДОЛГОВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС СУДНА

М.С. Бойко, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

В.Н. Тряскин, д-р. техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121 Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

В декабре 2022 г. вступила в силу новая ревизия документа Международной ассоциации классификационных обществ — Рекомендации 34. Рекомендация включает полностью обновленные данные о статистике морского волнения в северной части Атлантического океана (Северная Атлантика). Новая ревизия документа, с одной стороны, позволила учесть современные методы прогнозирования морского волнения и особенности движения судов на трассах Северной Атлантики, а с другой стороны, вызвала опасения ряда международных профессиональных объединений. Ряд публикаций показывает, что расчетные долговременные параметры волнения в новой ревизии снизились по отношению к предыдущей ревизии Рекомендации. В настоящей статье выполнены независимые сопоставительные расчеты долговременного распределения волнового изгибающего момента и волновой перерезывающей силы для четырех судов разных размеров и архитектурно-конструктивного типа. Получены результаты сравнения расчетных значений волновых нагрузок с применением данных о морском волнении в предыдущей ревизии Рекомендации и в новой ревизии. Показано, что снижение значений волновых нагрузок может достигать 20 %. Проведены также расчеты волновых нагрузок для рассмотренных судов в соответствии с требованиями нормативных документов. Показано, что, несмотря на снижение расчетных волновых нагрузок, полученное с применением методов прямого расчета, при использовании новой ревизии Рекомендации обеспечивается хорошее согласование волновых нагрузок с требованиями нормативных документов.

Ключевые слова: *нерегулярное волнение, корпус судна, волновые нагрузки, долговременное распределение.*

Для цитирования: Бойко М.С. Оценка влияния новых данных о морском волнении в Северной Атлантике на долговременное распределение волновых нагрузок на корпус судна / М.С. Бойко, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 79. — С. 74 — 86. — EDN IXNQHS.

IMPACT ASSESSMENT OF THE NEW NORTH ATLANTIC WAVE DATA ON LONG-TERM HULL GIRDER WAVE LOADS

M.S. Boyko, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: boyko.ms@rs-class.org

V.N. Tryaskin, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190121 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

In December 2022, a new revision of International Association of Classification Societies Recommendation 34 came into force. The Recommendation includes completely updated data on wave statistics in the North Atlantic. The new revision of the document, on the one hand, made it possible to take into account modern methods of forecasting sea waves and the peculiarities of ship traffic on the North Atlantic routes; and on the other hand, it raised concerns among a number of international professional associations. A number of publications show that the calculated long-term wave parameters in the new revision have decreased compared to the previous revision of the Recommendation. In this article, independent comparative calculations of the long-term distribution of wave bending moment and wave shear force for four ships of different sizes and architectural and structural types are performed. The comparison between the values of wave loads using wave data in the previous revision of the Recommendation and the new revision are obtained. It is shown that the decrease in wave load values can reach up to 20 %. Additionally, the calculations of wave loads for the considered vessels were carried out in accordance with the requirements of regulatory documents. It was shown that despite the reduction in the wave loads obtained using direct calculation methods, good agreement of wave loads with the requirements of regulatory documents is ensured when using the new revision of the Recommendation.

Key words: *irregular waves, ship hull, wave loads, long-term distribution.*

For citation: Boyko M.S., Tryaskin V.N. Impact assessment of the new North Atlantic wave data on long-term hull girder wave loads. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 74 — 86. EDN IXNQHS.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с требованиями Правил классификации и постройки морских судов [1], величина волнового изгибающего момента и перерезывающей силы должна определяться по приведенным в Правилах формулам. Требования Правил основаны на международном стандарте общей продольной прочности судов, который сформулирован в документах Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО):

- для судов неограниченного района плавания разработано Унифицированное требование МАКО S11 «Longitudinal Strength Standard» [2];
- для контейнеровозов разработано Унифицированное требование МАКО S11A «Longitudinal Strength Standard for Container Ship» [3];
- для навалочных судов и нефтеналивных судов разработаны соответствующие Общие правила МАКО [4].

Перечисленные нормативные документы содержат простые для использования аналитические формулы для определения расчетного значения волнового изгибающего момента и волновой перерезывающей силы в корпусе судна.

Кроме применения формул нормативных документов, существует группа «методов прямого расчета» (direct calculations), которые используют аппарат теории вероятностей и математической статистики для построения долговременного распределения искомой нагрузки с учетом качки судна на волнении и позволяют определить экстремальное значение нагрузки с заданным значением обеспеченности [5, 6]. Исходными данными для применения методов прямого расчета является статистика морского волнения: распределение характерных высот волн и характерных периодов волн за длительное время в различных районах Мирового океана. Для унификации исходных данных применительно к судам неограниченного района плавания МАКО была разработана Унифицированная рекомендация 34, которая содержит статистические данные о морском волнении в северной части Атлантического океана (Северная Атлантика, North Atlantic).

Первая ревизия Рекомендации вступила в силу в 1992 г. [7] и широко применялась в судостроительной промышленности при выполнении расчетов волновых нагрузок. Фундаментально новый период развития Рекомендации начался в 2015 г. Импульс для внесения изменений был дан Международной морской организацией (ИМО) по результатам аудита нормативной базы МАКО на предмет соответствия Целевым стандартам конструкции навалочных и нефтеналивных судов. Аудиторы ИМО сформулировали «наблюдение» (observation) [8] к действующей на период аудита первой ревизии Рекомендации [7]. В частности, была отмечена устарелость данных о параметрах волнения, которые собирались в период с 1949 г. по 1986 г. Аудиторами было отмечено, что существует ряд более поздних публикаций, которые свидетельствуют о

фактически наблюдаемых высотах волн, превышающих указанные МАКО значения, а со стороны МАКО не выполнялись действия по обновлению рекомендуемой к использованию статистики волнения.

Для того чтобы ответить на ожидания международной морской общественности, выраженные в виде наблюдений аудиторов, МАКО разработала новую ревизию Рекомендации 34 [9], которая вступила в силу в декабре 2022 г. В новую ревизию внесены следующие изменения [10]:

- полная переработка исходных данных по повторяемости волнения в Северной Атлантике, которая в новой ревизии основана на данных численного моделирования, в отличие от применявшихся ранее данных визуальных наблюдений;

- при разработке данных о повторяемости волнения учтено, что судоводитель стремится проводить судно наиболее выгодным путем с учетом погоды (т.н. weather routing), поэтому фактически существующие условия могут не совпадать с теми, которые встречает судно;

- изменено аналитическое выражение для спектральной плотности волнения: спектр Пирсона — Московича изменен на спектр JONSWAP с параметром пиковатости $\gamma = 1,5$;

- изменен ряд рекомендаций по выбору параметров расчета: учету трехмерности волнения, выбору расчетной скорости и расчетной обеспеченности волновой нагрузки.

Новая ревизия вызвала озабоченность ряда профессиональных международных объединений. Следует отметить документ, представленный совместно Международной палатой судоходства, Международной ассоциацией независимых владельцев нефтеналивных судов, Международной ассоциацией владельцев сухогрузных судов и Королевским обществом морских инженеров на 108-й сессии Комитета по безопасности на море ИМО [11]. В документе отмечено, что новая ревизия Рекомендации может привести к снижению расчетных параметров морского волнения и, соответственно, снижению значений волновых нагрузок. Для подтверждения выполнены сопоставления значений значительной высоты волны с интервалом повторения 1 раз в год, 1 раз в 10 лет и 1 раз в 100 лет. В статье [12] группа авторов выполнила независимые расчеты долговременных распределений волнового изгибающего момента с применением упрощенных формул для его АЧХ. Показано, что применение новой ревизии Рекомендации может привести к снижению величины изгибающего момента на 13 — 19 % для нефтеналивных судов и 16 — 23 % для контейнеровозов по сравнению с расчетами по предыдущей ревизии. Качественно схожие результаты также получены в работе [10] для экстремальных нагрузок, а для усталостных нагрузок получено более существенное снижение до 40 %.

Аудиторами ИМО был сделан положительный вывод об отработке МАКО обозначенного ранее наблюдения. При этом, учитывая возникшее беспокойство о снижении нагрузок, было обозначено, что при дальнейшем аудите Рекомендации 34 МАКО следует оценить влияние новых данных о морском волнении на требования к судам, попадающим под действие Общих правил [13].

Авторами настоящей статьи была поставлена задача провести независимые сопоставительные расчеты волновых нагрузок на корпус судна на основе предыдущей ревизии Рекомендации 34 и новой ревизии. Для сопоставления были выполнены следующие задачи:

- выбраны четыре тестовых судна разных типов и размеров;
- рассчитаны значения волновых изгибающих моментов и перерезывающих сил в соответствии с требованиями нормативных документов;

- построены долговременные распределения волновых изгибающих моментов и волновых перерезывающих сил с применением метода прямого расчета на основе предыдущей ревизии Рекомендации 34 и новой ревизии;

- проведено сопоставление полученных результатов между собой и с требованиями нормативных документов.

Целью настоящей статьи не является определение расчетных значений волновых нагрузок для рассмотренных судов, так как при выполнении расчетов принимается ряд допущений, которые требуют дополнительной оценки в рамках дальнейших исследований. Целью исследования является в первую очередь получить качественную картину изменений в величине волновых нагрузок в связи со вступлением в силу новой ревизии Рекомендации 34. При выполнении расчетов использовались результаты комплексных исследований, проведенных в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете и Российском морском регистре судоходства, применялось специализированное программное обеспечение и методы теории вероятности и математической статистики.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Рассмотрим методы определения волновой нагрузки волнового изгибающего момента в миделевом сечении судна и волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. в соответствии с требованиями нормативных документов.

По требованиям УТ S11 и Общих правил МАКО величина волнового изгибающего момента в миделевом сечении судна при прогибе, M_{w-sag} , и перегибе, M_{w-hog} , кНм, определяются по следующим формулам:

$$M_{w7sag} = -0,11C_W L^2 B (C_b + 0,7), \quad (1)$$

$$M_{w-hog} = 0,19C_W L^2 B C_b, \quad (2)$$

где L — расчетная длина судна, м;

B — расчетная ширина судна, м;

C_b — коэффициент общей полноты;

коэффициент C_W определяется следующим образом:

$$C_W = 10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}, \text{ если } 90 \leq L \leq 300;$$

$$C_W = 10,75, \text{ если } 300 < L \leq 350;$$

$$C_W = 10,75 - [(L - 350)/150]^{1,5}, \text{ если } 350 < L \leq 500.$$

Величина положительной и отрицательной волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. $F_w(+)$ и $F_w(-)$, кН, определяются, соответственно, по следующим формулам:

$$F_w(+) = 0,3C_W L B (C_b + 0,7), \quad (3)$$

$$F_w(-) = -0,3C_W L B \times \frac{190}{110} C_b. \quad (4)$$

В соответствии с требованиями УТ S11A величина волнового изгибающего момента определяется по следующим формулам:

$$M_{w-sag} = -1,5f_R L^3 C C_\alpha (B/L)^{0,8} f_{NL-sag}, \quad (5)$$

$$M_{w-hog} = 1,5f_R L^3 C C_\alpha (B/L)^{0,8} f_{NL-hog}, \quad (6)$$

где $f_R = 0,85$;

C_α — коэффициент полноты площади ватерлинии;

коэффициент C определяется следующим образом:

$$C = 1 - 1,50(1 - \sqrt{(L/L_{ref})})^{2,2}, \text{ если } L \leq L_{ref};$$

$$C = 1 - 0,45(\sqrt{(L/L_{ref})} - 1)^{1,7}, \text{ если } L > L_{ref};$$

$$L_{ref} = 315C_\alpha^{-1,3};$$

f_{NL-sag} и f_{NL-hog} — поправочные коэффициенты, с помощью которых учитываются нелинейные составляющие изгибающего момента (например, нагрузки от слеминга), величина которых зависит от геометрических параметров корпуса судна.

Величина положительной и отрицательной волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. $F_w(+)$ и $F_w(-)$, кН, определяется, соответственно, по следующим формулам:

$$F_w(+) = 5,7f_R L^2 C C_\alpha (B/L)^{0,8} (0,25 + 0,75f_{NL-sag}), \quad (7)$$

$$F_w(-) = -5,7f_R L^2 C C_\alpha (B/L)^{0,8} f_{NL-hog}. \quad (8)$$

Рассмотрим схему построения долговременных распределений волновых нагрузок с применением методов прямого расчета — на примере волнового изгибающего момента.

Вся совокупность режимов волнения и условий хода судна разбивается на отдельные «краткосрочные» стационарные режимы, в каждом из которых считают, что распределение изгибающего момента подчиняется закону Рэлея. Тогда вероятность превышения выбранного значения M_w в данном стационарном режиме равна:

$$Q_i(M > M_w) = \text{EXP}[-M_w^2 / (2D_{Mi})], \quad (9)$$

где D_{Mi} — дисперсия изгибающего момента в i -м рассматриваемом режиме движения.

Умножив значение, полученное в соответствии с (9), на вероятность существования режима и затем просуммировав по всем режимам и всем возможным районам эксплуатации судна, получают в общем случае полную вероятность превышения выбранного значения M_w :

$$Q(M > M_w) = \sum_m \sum_l \sum_k \sum_j \sum_i \text{EXP}[-M_w / (2D_{Mijklm})] p_{ij} p_k p_l p_m, \quad (10)$$

где p_{ij} — вероятность существования волнового режима, который описывается сочетанием i -го значения характерной высоты волны и соответствующего j -го характерного периода нерегулярного волнения;
 p_k — вероятность движения судна с k -м курсовым углом;
 p_l — вероятность нахождения судна в районе эксплуатации l ;
 p_m — вероятность существования режима загрузки судна m .

Вычисляя значение Q по формуле (10) для ряда значений M_w , строят долговременное распределение искомой реакции корпуса судна. Расчеты по формуле (10) обычно выполняют для ряда постоянных значений скорости судна (или постоянных чисел Фруда Fr), варьируя ее в интервале значений, свойственных рассматриваемому судну. Первая ревизия Рекомендации приводила значение 0 уз как рекомендуемое, в новой ревизии приводится рекомендуемое значение в 5 уз. Расчеты обычно выполняются отдельно для каждого предусмотренного режима загрузки судна, например, отдельно для случаев «в грузу» и «в балласте».

В соответствии с Рекомендацией все курсовые углы движения судна считаются равновероятными, а рекомендуемый шаг между значениями курсового угла при расчетах предлагается принимать не более 30° ; данная рекомендация осталась неизменной в новой ревизии документа. При рассмотрении семи курсовых углов β ($\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$), таким образом, $p_k = 1/7 = 0,1429 = \text{const}$.

Вероятность существования волнового режима p_{ij} в Рекомендации 34 задается в виде двумерных таблиц, в которых указано число характерных сочетаний высоты волны и периода по отношению к общему числу наблюдений. В первой ревизии документа в качестве характерных сочетаний указаны (H_s, T_z) , в новой ревизии приведены сочетания (H_s, T_{0m1}) , где H_s — «значительная» высота волны, м, T_z — средний период между «нулевыми» точками записи волнения, с, T_{0m1} — средний период волнения, с.

Для расчетов по формуле (10) необходимо располагать соответствующими значениями дисперсии D_M во всех рассматриваемых стационарных режимах движения. Для определения D_M пользуются основным уравнением статистической динамики для линейной динамической системы, которое можно записать в следующем виде:

$$S_M(\omega, H_s, T_z, \beta, Fr) = S_\eta(\omega, H_s, T_z) \alpha_M^2(\omega, \beta, Fr), \quad (11)$$

$$D_M = \int_0^\infty S_M(\omega, H_s, T_z, \beta, Fr) d\omega, \quad (12)$$

где S_M — спектральная плотность волнового изгибающего момента («выходного процесса»);
 S_η — спектральная плотность морского волнения («входного процесса»);
 α_M — амплитудно-частотная характеристика изгибающего момента (АЧХ);
 ω — частота волны.

В новой ревизии Рекомендации изменено выражение для спектра морского волнения. В предыдущей ревизии использовалось выражение спектра Пирсона — Московича $S_{PM}(\omega)$, в новой ревизии рекомендуется к применению выражение спектра JONSWAP с параметром пиковатости $\gamma = 1,5$ и нормировочным множителем $\alpha = 0,886$:

$$S_\eta(\omega) = \alpha S_{PM}(\omega) \gamma^{\text{EXP}[-(\omega/\omega_p - 1)^2 / (2\sigma^2)]}, \quad (13)$$

где ω_p — угловая частота между положениями вершин записи волнения, а параметр σ принимает значение $\sigma = 0,07$ при $\omega/\omega_p \leq 1$ и $\sigma = 0,09$ при $\omega/\omega_p > 1$.

В новой ревизии Рекомендации откорректирована формула для учета трехмерности волнения. Для учета трехмерности волнения спектральную плотность приближенно представляют в виде произведения $S_\eta^0(\omega, \theta) = S_\eta(\omega) G(\theta)$, где θ — угол между отдельной составляющей волнения и основным направлением волн, а функция $G(\theta)$ в общем виде записывается следующим образом: $G(\theta) = k(\cos \theta)^n$. Значения коэффициентов k и n приведены в Рекомендации. В новой ревизии приведено рекомендуемое значение $n = 3$, в отличие от рекомендованного ранее значения $n = 2$.

Для применения методов прямого расчета необходимо располагать значениями АЧХ волнового изгибающего момента α_M и в более широком смысле АЧХ всех искомых реакций корпуса судна при качке. В настоящее время задача получения АЧХ при качке с применением специальных математических моделей и программного обеспечения исследована достаточно подробно. Наиболее широкое распространение в практических расчетах получили методы, основанные на потенциальной теории потока: метод плоских

сечений и панельный метод. Для применения методов разработан ряд специализированных программных комплексов: Waveship (DNV), PDStrip, Scores, HydroSTAR (BV), Wasim, Waveload (LR), Aqwa и т.п. В последние годы получены результаты сопоставительных расчетов [14, 15], подтверждающих допустимость применения как метода плоских сечений, так и панельного метода для получения АЧХ волновых нагрузок. При этом отмечаются преимущества панельного метода по учету продольного растекания жидкости и преимущества метода плоских сечений по удобству и простоте применения.

В новой ревизии Рекомендации также изменен критерий выбора расчетного значения обеспеченности волновых нагрузок. В предыдущей ревизии было рекомендовано значение $Q=10^{-8}$ для всех судов. В новой ревизии указано, что расчетной является обеспеченность, соответствующая интервалу повторения нагрузки 1 раз в 25 лет. Это приводит к тому, что для разных по размерам судов значение Q в общем случае окажется разным. В новой редакции также конкретизирован уровень обеспеченности для расчета усталостных нагрузок $Q=10^{-2}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для выполнения тестовых расчетов выбраны четыре судна различного назначения и размеров: контейнеровоз, судно типа RO/RO, навалочное судно, нефтеналивное судно. Форма корпуса рассмотренных судов приведена на рис. 1, а главные размерения приведены в табл. 1 [16].

В табл. 2 приведены результаты расчета волнового изгибающего момента в миделевом сечении и волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. по требованиям нормативных документов. Для судна типа RO/RO применяются требования УТ S11, для нефтеналивного и навалочного судов применяются требования Общих правил МАКО (CSR). Для контейнеровоза применяются требования УТ S14, однако с целью обеспечения корректности сопоставительных расчетов исключается влияние нелинейной составляющей изгибающего момента.

В рамках настоящего исследования для получения АЧХ применяется программный комплекс ДИОЛЬ, разработка которого выполнена в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете. Программное обеспечение реализует метод плоских сечений на основе математической модели, подробно изложенной в литературе [16, 17]. На рис. 2 и рис. 3 приведены примеры результатов расчета АЧХ волнового изгибающего момента в миделевом сечении и волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. контейнеровоза в грузу. Результаты приведены в безразмерном виде. По горизонтальной оси приведена безразмерная относительная длина регулярной волны $\sqrt{L_{pp}/\lambda}$, где λ — длина волны. По вертикальной оси приведено безразмерное значение АЧХ: $k_M = \alpha(M)/(\rho g B L_{pp}^2)$, $k_N = \alpha(N)/(\rho g B L_{pp}^2)$.

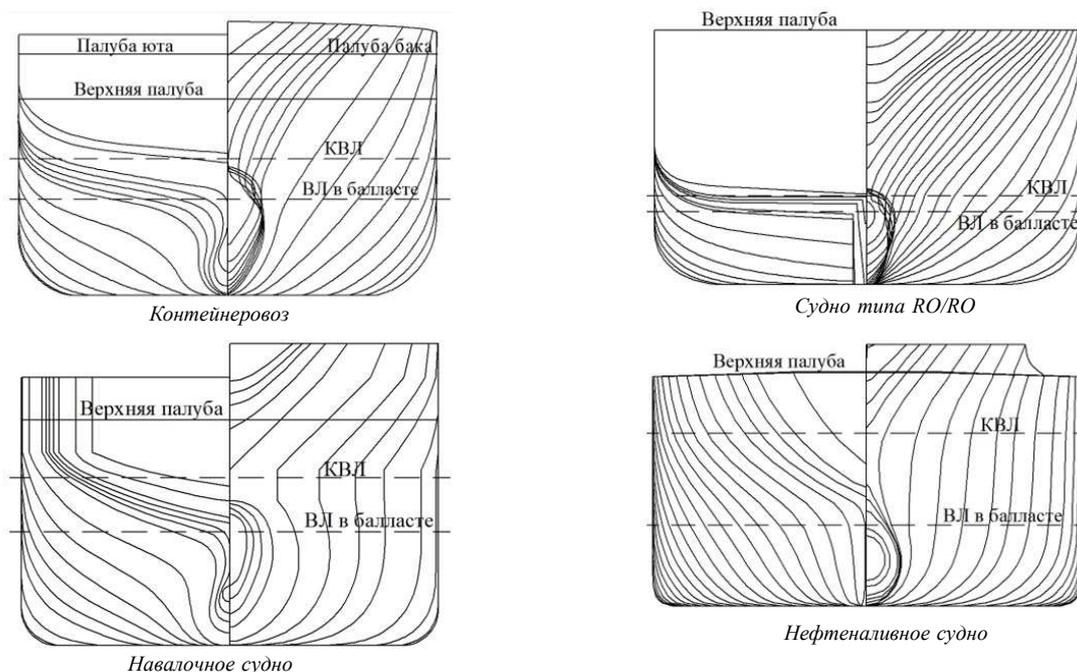


Рис. 1. Форма корпуса тестовых судов

Таблица 1

Главные размерения тестовых судов

Тип судна	Длина между ПП, L_{pp} , м	Ширина, B , м	Высота борта, H , м	Дедвейт, DW , т	Кoeff. общей полноты, C_b
Контейнеровоз	135	25,6	12,2	12 884	0,621
Судно типа RO/RO	125	23	14	4 500	0,618
Навалочное судно	149,2	23,1	12,7	21 000	0,824
Нефтеналивное судно	250,9	40,79	22,2	127 545	0,830

Таблица 2

Волновые нагрузки по требованиям нормативных документов

Величина	Контейнеровоз	Судно типа RO/RO	Навалочное судно	Нефтеналивное судно
	УТ S11A*	УТ S11	CSR	CSR
M_{w-sag} , кНм	$-5,24 \cdot 10^5$	$-4,4 \cdot 10^5$	$-7,69 \cdot 10^5$	$-4,5 \cdot 10^6$
M_{w-hog} , кНм	$5,24 \cdot 10^5$	$3,56 \cdot 10^5$	$7,17 \cdot 10^5$	$4,21 \cdot 10^6$
$F_w(+)$, кН	$1,48 \cdot 10^4$	$9,59 \cdot 10^3$	$1,40 \cdot 10^4$	$4,89 \cdot 10^4$
$F_w(-)$, кН	$-1,48 \cdot 10^4$	$-7,78 \cdot 10^3$	$-1,31 \cdot 10^4$	$-4,58 \cdot 10^4$

* — без учета нелинейной составляющей.

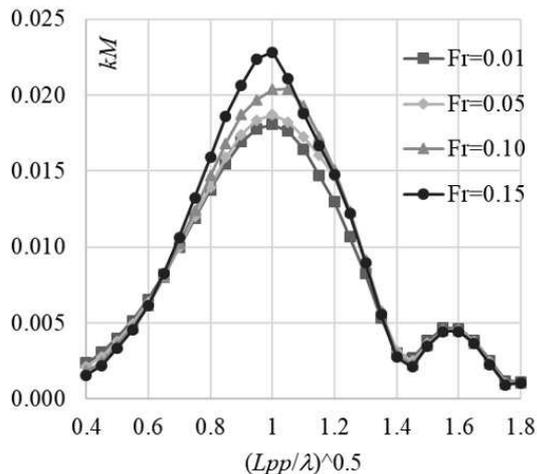
АЧХ на встречном волнении при различных F_f

Рис. 2. АЧХ волнового изгибающего момента в миделевом сечении для контейнеровоза в грузу

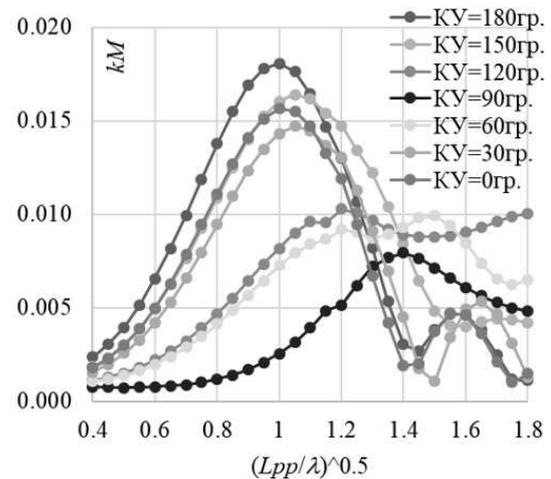
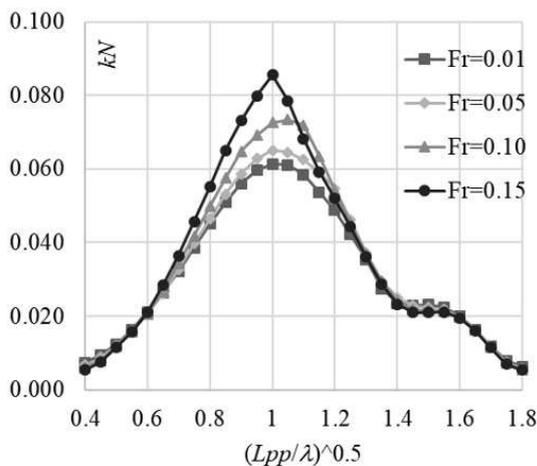
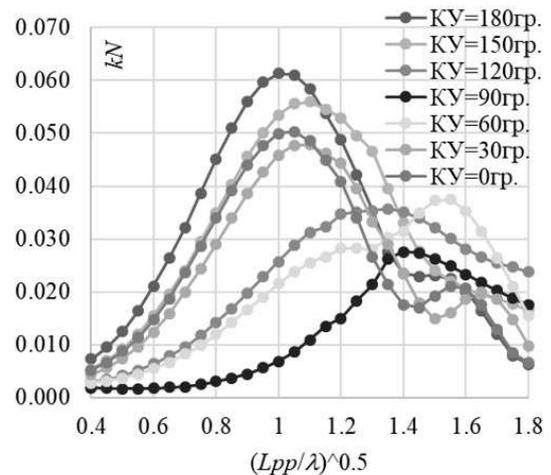
АЧХ при различных курсовых углах и $F_f=0,01$ АЧХ на встречном волнении при различных F_f АЧХ при различных курсовых углах и $F_f=0,01$

Рис. 3. АЧХ волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для контейнеровоза в грузу

Долговременные распределения построены для четырех значений Fr : $Fr=0,01, 0,05, 0,10, 0,15$ — и для двух случаев загрузки судна: в грузу и в балласте. Влияние трехмерности волнения не учитывается в рамках настоящей статьи и является предметом дальнейших исследований. Принятое допущение соответствует ошибке в безопасную сторону, так как на величину волновых изгибающих моментов в наибольшей степени влияет волнение высокой балльности, а с ростом балльности влияние трехмерности волнения уменьшается [17]. Для статистической обработки результатов и построения долговременных распределений используется табличный процессор Microsoft Excel с возможностями VBA.

На рис. 4 — 7 приведено сопоставление долговременного распределения вертикального волнового изгибающего момента в миделевом сечении для рассмотренных судов при использовании предыдущей ревизии Рекомендации и новой ревизии. Для изгибающих моментов получено снижение расчетных значений для всех уровней обеспеченности при всех значениях числа Fr . Для изгибающего момента при обеспеченности $Q=10^{-8}$ снижение составляет 20 — 25 %, причем разница снижается по мере увеличения длины судна. Для изгибающего момента при обеспеченности $Q=10^{-2}$ снижение составило 20 — 30 %, причем наибольшее снижение характерно для судна наибольшей длины — нефтеналивного.

На рис. 8 — 11 приведено сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для рассмотренных судов при использовании предыдущей ревизии Рекомендации и новой ревизии. Характер влияния новой ревизии аналогичен тому, который выявлен для волнового изгибающего момента. Получено снижение расчетных значений для всех уровней обеспеченности при всех значениях числа Fr . Для обеспеченности $Q=10^{-8}$ снижение составляет 20 — 25 %, для обеспеченности $Q=10^{-8}$ снижение также составляет 20 — 25 %.

Полученные результаты в целом хорошо коррелируют с результатами, полученными другими авторами [10].

Также на рис. 4 — 11 нанесены расчетные значения изгибающих моментов и перерезывающих сил, полученные для рассмотренных судов по требованиям нормативных документов. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что вступление в силу новой ревизии Рекомендации характеризуется тенденцией к сближению значений волновых нагрузок, полученных методом прямого расчета и с применением нормативных документов. Ранее ряд авторов [18, 19] указывал на систематические расхождения между требованиями нормативных документов МАКО и результатами применения методов прямого расчета, характер которых виден на рис. 4 — 11. В качестве причин расхождений указывались особенности применяемых математических моделей, а также численные параметры волновых условий. По результатам проведенных в рамках настоящей статьи исследований можно отметить тенденцию на разрешение указанного противоречия в деятельности МАКО. Окончательные выводы о влиянии новой ревизии Рекомендации 34 на размеры корпусных конструкций можно будет сделать после выполнения МАКО соответствующих сопоставительных расчетов, однако существенных изменений в требованиях, то есть существенного увеличения или уменьшения веса корпусных конструкций, как показывают результаты выполненных исследований, не ожидается.

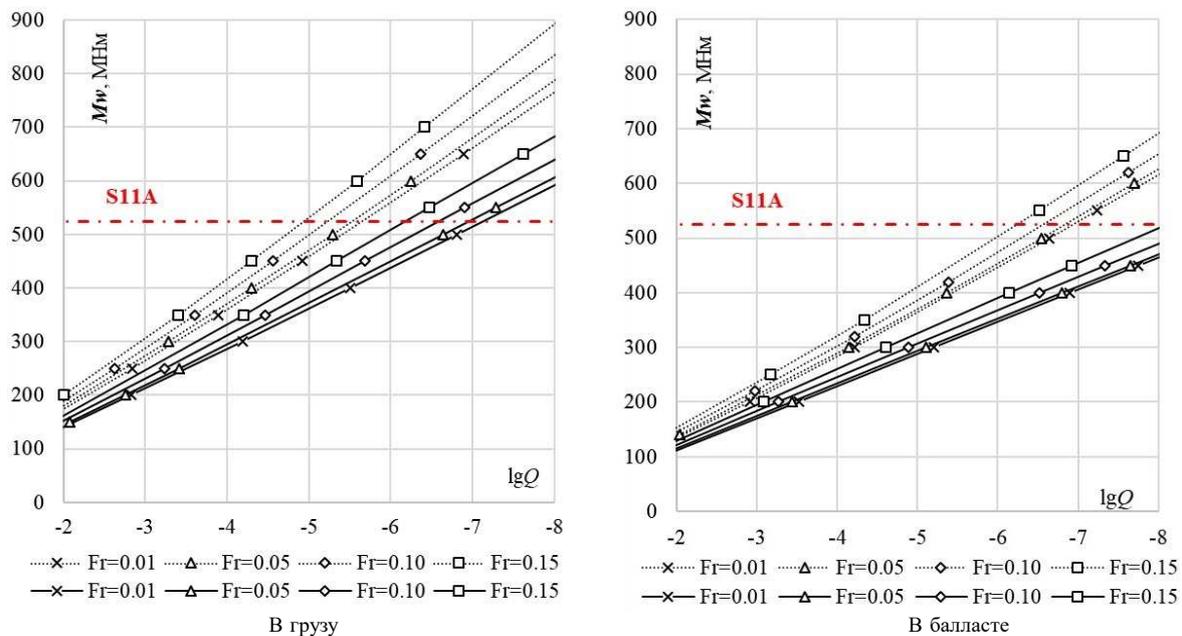


Рис. 4. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для контейнеровоза: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

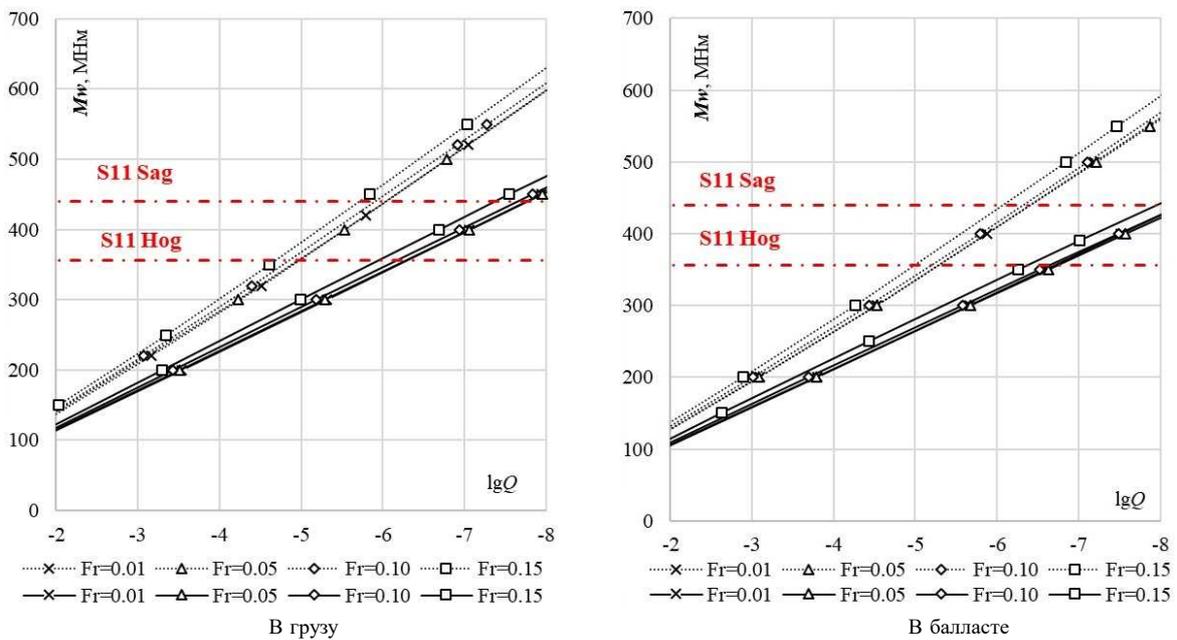


Рис. 5. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для судна типа RO/RO: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

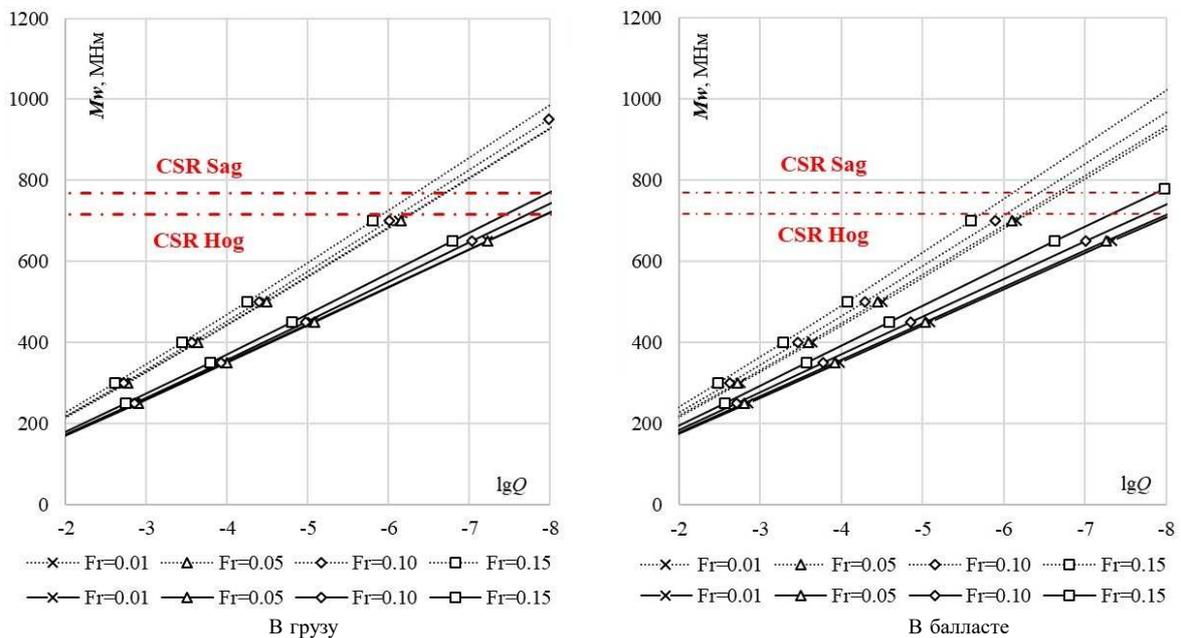


Рис. 6. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для навалочного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

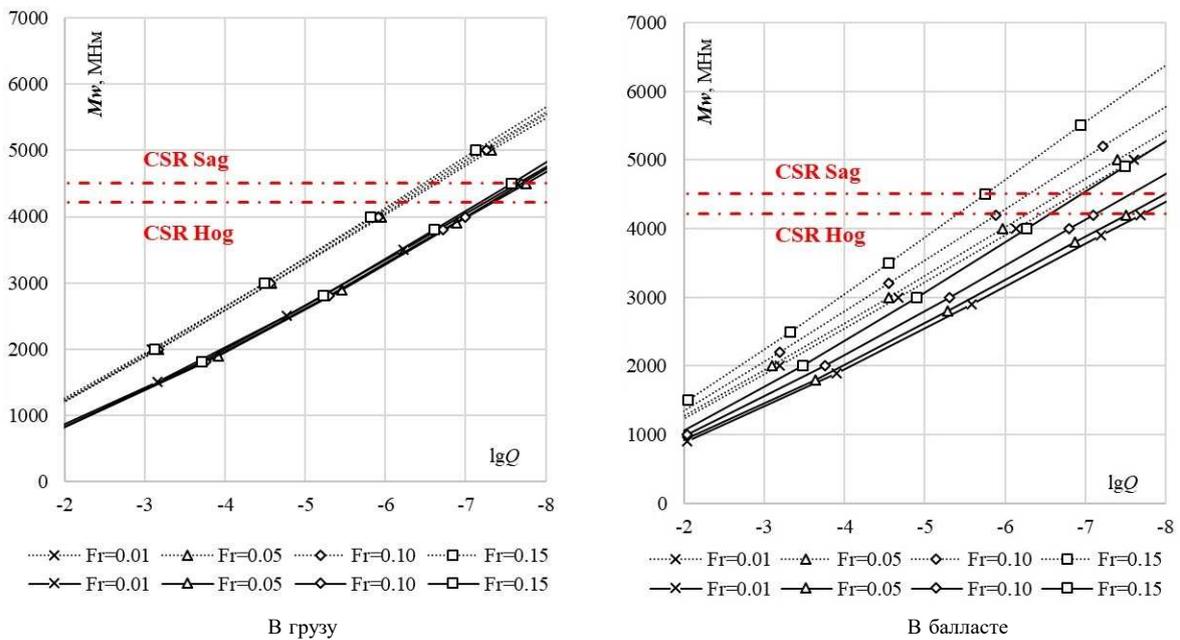


Рис. 7. Сопоставление долговременного распределения волнового изгибающего момента на миделе для нефтеналивного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

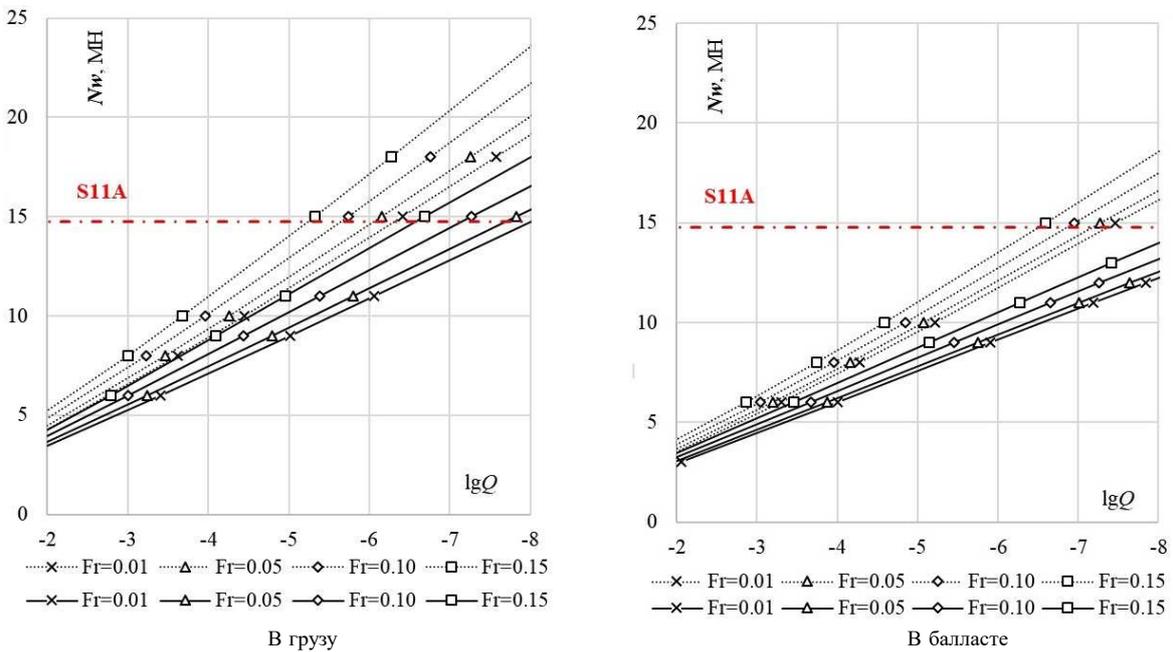


Рис. 8. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для контейнеровоза: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

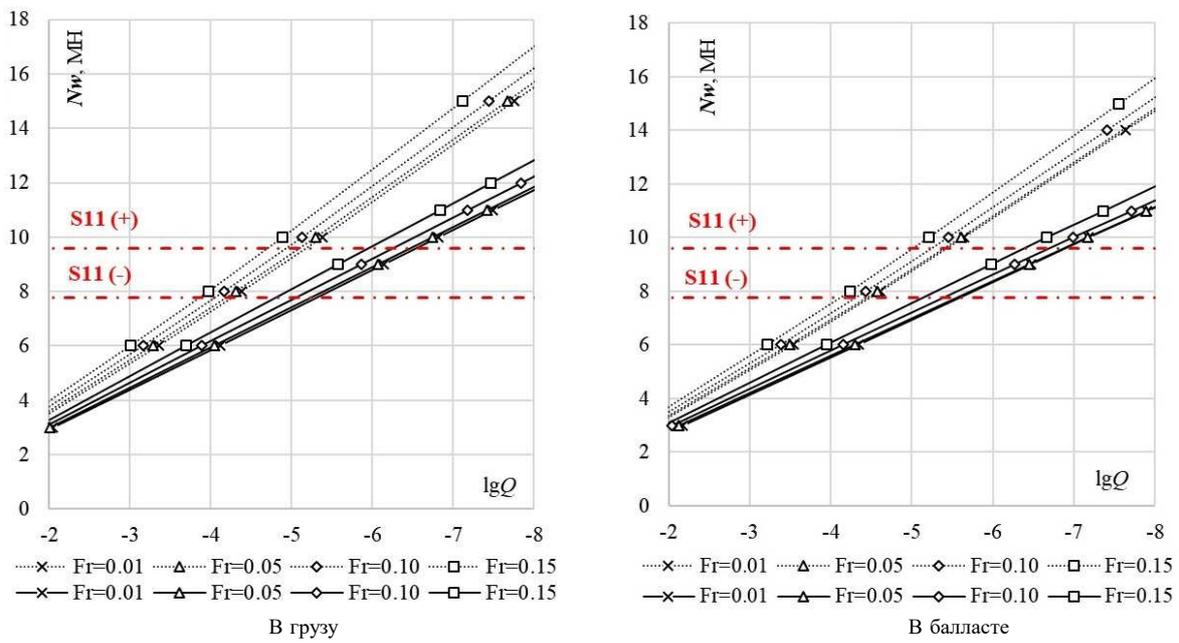


Рис. 9. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для судна типа RO/RO: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

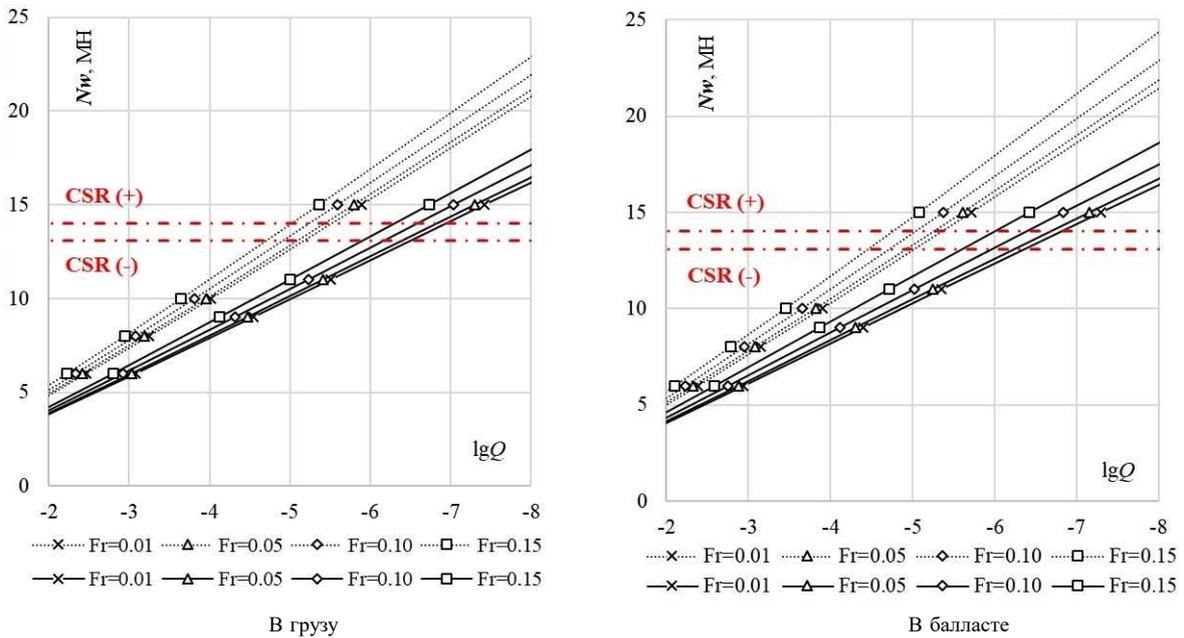


Рис. 10. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для навалочного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

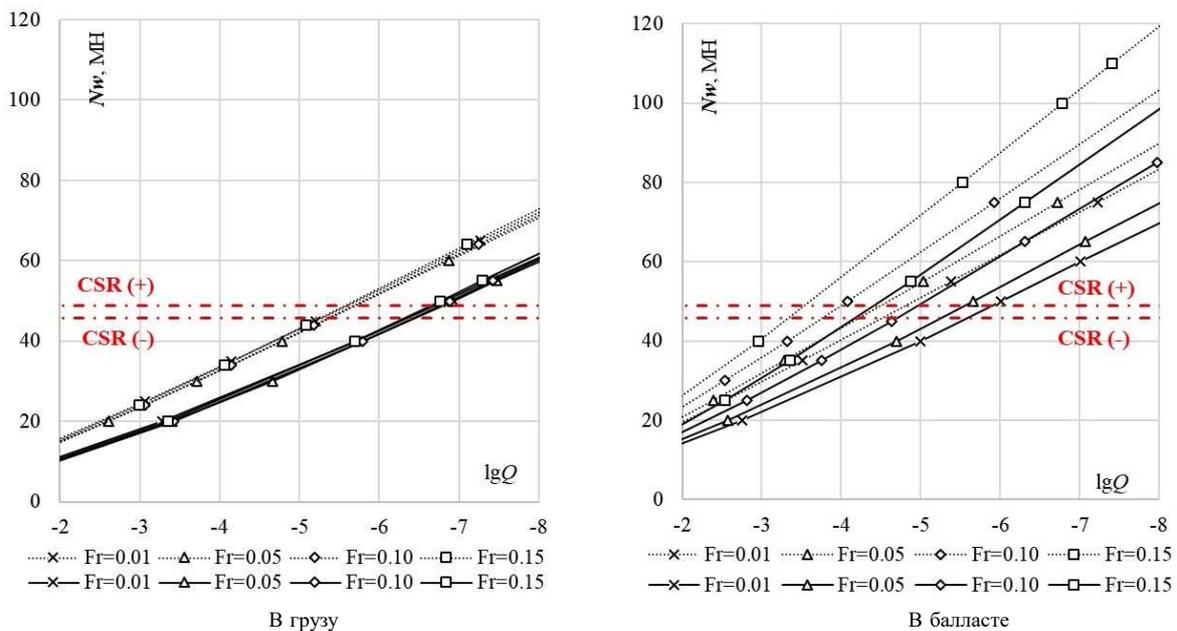


Рис. 11. Сопоставление долговременного распределения волновой перерезывающей силы в сечении 5 теор. шп. для нефтеналивного судна: сплошная линия — новая ревизия; пунктирная линия — предыдущая ревизия; штрихпунктирная линия — требования нормативных документов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В декабре 2022 г. вступила в силу новая ревизия документа МАКО Рекомендации 34. Разработка новой ревизии стала ответом МАКО на запрос международной судостроительной общественности в лице аудиторов ИМО о необходимости обновления данных о морском волнении в северной части Атлантического океана (Северной Атлантики). Новая ревизия приводит существенно измененные параметры морского волнения, которые, с одной стороны, отвечают запросу на обновление параметров в соответствии с современными климатическими данными и особенностями движения судов на трассах Северной Атлантики, а с другой стороны, вызывают озабоченность ряда профессиональных международных объединений. Причиной озабоченности является снижение долговременных параметров волнения.

В настоящей статье выполнено независимое исследование, целью которого является сопоставление долговременных распределений волнового изгибающего момента и волновой перерезывающей силы методами прямого расчета с использованием предыдущей ревизии Рекомендации и новой ревизии. В качестве тестовых выбраны четыре судна разных размерений и разного архитектурно-конструктивного типа. Показано, что применение новой ревизии Рекомендации может привести к снижению расчетного изгибающего момента и перерезывающей силы в диапазоне 20 — 25 %. При выполнении расчетов используется отечественное прикладное программное обеспечение и результаты исследований проблемы внешних сил, выполненных в СПбГМТУ и РС. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами, полученными независимыми зарубежными авторами.

Проведено сопоставление полученных значений изгибающего момента и перерезывающей силы при обеспеченности $Q=10^{-8}$ с требованиями нормативных документов МАКО. Показана тенденция на гармонизацию требований МАКО и результатов расчета волновых нагрузок с применением методов прямого расчета и новой ревизии Рекомендации. Приведено предположение, что, несмотря на существенное изменение волновых условий, применение новой Ревизии не окажет значительного влияния на требования МАКО к конструкции корпуса новых судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
2. IACS. Unified Requirement S11. Longitudinal Strength Standard. Rev.2. — Nov. 2001.
3. IACS. Unified Requirement S11A. Longitudinal Strength Standard for Container Ships. — June 2015.
4. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. — Jan. 2024.
5. BV. Guidance for Long-term Hydro-structure Calculations. NI 638. — Feb. 2019.
6. PRS. Wave Loads on Ships. Informative Publication No. 35/I. — July 2018.
7. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 1, Corr. — Nov. 2001.
8. IMO. GBS verification audit reports submitted by audit teams. Maritime Safety Committee 96th session. MSC 96/5. — Feb. 2016.
9. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 2. — Dec. 2022.
10. Austefjord H.N. Update of wave statistics standards for classification rules / H.N. Austefjord, G. de Hauteclocque, M.C. Johnson, T.Y. Zhu // *Advances in the Analysis and Design of Marine Structures*. — London: CRC Press, 2023. — P. 43 — 52. — DOI 10.1201/9781003399759-5.
11. IMO. Comments on the review of the North Atlantic wave data. Maritime Safety Committee 108th session. MSC 108/19. — Dec. 2023.
12. Parunov J. Comparative analysis of the long-term extreme VWBM calculated according to IACS Rec. No 34 rev 1 and rev 2 / J. Parunov, A. Mikulić, M. Ćorak // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 1288. — DOI 10.1088/1757-899X/1288/1/012030.
13. IMO. Final report of the GBS audit addressing observation No. IACS/2015/FR1-8/OB/02. Maritime Safety Committee 109th session. MSC 109/4/1. — Aug. 2024.
14. Коршунов В.А. Сравнительный анализ различных моделей для прогнозирования волновых нагрузок корпуса судна / В.А. Коршунов, Р.С. Мудрик, Д.А. Пономарев, А.А. Родионов и др. // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2022. — № 2(400). — С. 17 — 23.
15. Parunov J. Benchmark study of global linear wave loads on a container ship with forward speed / J. Parunov, C. Guedes Soares, K. Iijima, X. Wang et al. // *Marine Structures*. — 2022. — Vol. 84. — DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103162.
16. Доан Ким Тхай. Определение расчетных волновых нагрузок при проектировании конструкций корпуса судна: дис. ... канд. техн. наук / Доан Ким Тхай // СПбГМТУ. — СПб., 2007. — 205 с.
17. Короткин Я.И. Волновые нагрузки корпуса судна / Я.И. Короткин, О.Н. Рабинович, Д.М. Ростовцев. — Л.: Судостроение, 1987. — 235 с.
18. Коршунов В.А. Сравнительный анализ давлений и параметров качки, полученных на основе прямых методов расчета, с величинами из нормативных документов DNV / В.А. Коршунов, М.А. Кутейников, Р.С. Мудрик, Д.А. Пономарев и др. // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2023. — № 70/71. — С. 58 — 66.
19. 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. — Vol. 86. — DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103307.

REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea-going ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2025.
2. IACS. Unified Requirement S11. Longitudinal Strength Standard. Rev.2, Nov. 2001.
3. IACS. Unified Requirement S11A. Longitudinal Strength Standard for Container Ships, June 2015.
4. IACS. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. Jan. 2024.
5. BV. Guidance for Long-term Hydro-structure Calculations. NI 638. Feb. 2019.
6. PRS. Wave Loads on Ships. Informative Publication No. 35/I. July 2018.
7. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 1, Corr. Nov. 2001.
8. IMO. GBS verification audit reports submitted by audit teams. Maritime Safety Committee 96th session. MSC 96/5. Feb. 2016.
9. IACS. Recommendation 34. Standard Wave Data. Rev. 2. Dec. 2022.
10. Austefjord H.N., de Hauteclocque G., Johnson M.C., Zhu T.Y. Update of wave statistics standards for classification rules. *Advances in the Analysis and Design of Marine Structures*. London: CRC Press, 2023. P. 43 — 52. DOI 10.1201/9781003399759-5.
11. IMO. Comments on the review of the North Atlantic wave data. Maritime Safety Committee 108th session. MSC 108/19. Dec. 2023.
12. Parunov J., Mikulić A., Ćorak M. Comparative analysis of the long-term extreme VWBM calculated according to IACS Rec. No 34 rev 1 and rev 2. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 1288. DOI 10.1088/1757-899X/1288/1/012030.
13. IMO. Final report of the GBS audit addressing observation No. IACS/2015/FR1-8/OB/02. Maritime Safety Committee 109th session. MSC 109/4/1. Aug. 2024.
14. Korshunov V.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A., Rodionov A.A. et al. Comparative analysis of various models for predicting wave loads on ship hull. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022. No. 2(400). P. 17 — 23. (In Russ.)
15. Parunov J., Guedes Soares C., Iijima K., Wang X. et al. Benchmark study of global linear wave loads on a container ship with forward speed. *Marine Structures*. 2022. Vol. 84. DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103162.
16. Doan Kim Tkhai. *Opređenje raschetnykh volnovykh nagruzok pri proektirovanii konstruktsii korpusa sudna* [Calculation of wave loads in ship hull structure design: PhD thesis]. St. Petersburg: SPBGMTU, 2007. 205 p.
17. Korotkin Ya.I., Rabinovich O.N., Rostovtsev D.M. *Volnovye nagruzki korpusa sudna* [Wave loads on ship hull]. Leningrad: Sudostroenie, 1987. 235 p.
18. Korshunov V.A., Kuteynikov M.A., Mudrik R.S., Ponomarev D.A. et al. Comparative analysis of pressures and ship motion parameters obtained on the basis of direct calculations and the values from DNV normative documents. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2023. No. 70/71. P. 58 — 66. (In Russ.)
19. Parunov J., Guedes Soares C., Hirdaris S., Wang X. Uncertainties in modelling the low-frequency wave-induced global loads in ships. *Marine Structures*. 2022. 86. DOI 10.1016/j.marstruc.2022.103307.