

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-679-689

RESEARCH OF ASSESSING THE RELIABILITY OF CONTAINERS SECURING TAKING INTO ACCOUNT THE ACTUAL METACENTRIC HEIGHT OF THE CONTAINER SHIP

R. S. Tsarik

Maritime State University named after admiral G. A. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The study focuses on the impact of the metacentric height of container ships on the reliability of container securing systems in order to prevent container loss overboard, which is a significant issue in the shipping industry. It is noted that the increase in ship capacity is achieved by increasing the number of layers of containers stacked on deck. Dynamic loads on the securing means of containers stowed in the upper tiers of container stacks are increasing, that can be particularly dangerous in the intense rolling conditions. It is noted that the international shipping community is well aware of the significance of this issue and is working to develop solutions. Assessment of the expected reliability of securing systems and prevent container loss through a comprehensive analysis of relevant factors is considered. The complexity of this assessment lies in the presence of many uncertainties in the calculation algorithm. These uncertainties are supposed to be quantified taking into account the accumulated experience and statistical data within the framework of the TopTier industry project. Existing methods and calculation algorithms do not take into account the fact that the actual height of the center of gravity of containers differs from the accepted value. The goal of this article is to study the effect of the actual metacentric height of a container ship on the parameters of rolling and the loads on containers and their securing means depending on it. To do this, using the example of a real ultra large container ship, a comparative analysis of the effect of metacentric height on the rolling acceleration was performed. The effect of the rolling acceleration on the loads acting on the deck container stack has been shown. The necessity to take into account the actual height of the center of gravity of containers is justified for the correct determination the metacentric height of the container ship and calculation loads in order to ensure the safety of operation of container ships and prevent containers from being lost overboard.

Keywords: container ship, container, stability, metacentric height, rolling, safe transportation, container loss

For citation:

Tsarik, Ruslan Stanislavovich "Research of assessing the reliability of containers securing taking into account the actual metacentric height of the container ship" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 679–689. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-679-689.

УДК 656.61.052

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ КРЕПЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКОЙ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ КОНТЕЙНЕРОВОЗА

Р. С. Царик

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»,
Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является влияние фактической метацентрической высоты контейнеровоза на надежность средств крепления контейнеров в контексте предотвращения их потери за борт — проблемы, которая является в настоящее время одной из наиболее актуальных в отрасли. Отмечается, что рост контейнероёмкости судов во многом обеспечивается за счет увеличения количества ярусов в палубных контейнерных штабелях. Динамические нагрузки на средства крепления контейнеров, расположенных в верхних ярусах контейнерных штабелей, возрастают, что является особенно опасным в условиях интенсивной бортовой качки. Отмечается, что международное профессиональное сообщество в полной мере осознает важность и актуальность этой проблемы и разрабатывает план ее решения. Рассмотрен вопрос

оценки предполагаемой надежности систем и средств крепления контейнеров на контейнеровозах в контексте предотвращения потери контейнеров за борт. Сложность этой оценки заключается в наличии множества неопределенностей в расчетном алгоритме. Предполагается эти неопределенности квантифицировать с учетом имеющегося опыта и статистических данных в рамках отраслевого проекта TopTier. Существующие методы и расчетные алгоритмы не учитывают, что фактическая аппликата центра тяжести контейнеров отличается от расчетной. Целью настоящей работы является исследование влияния фактической метацентрической высоты контейнеровоза на параметры бортовой качки и зависящие от нее нагрузки на контейнеры и средства их крепления. Для этого на примере реального ультрабольшого контейнеровоза выполнен сравнительный анализ влияния метацентрической высоты на ускорение бортовой качки. Показано влияние ускорения бортовой качки на нагрузки, действующие на палубный контейнерный штабель. Обоснована необходимость учета фактической аппликаты центра тяжести контейнеров для корректного определения метацентрической высоты контейнеровоза и расчета нагрузок с целью обеспечения безопасности эксплуатации контейнеровозов и предотвращения потери контейнеров за борт.

Ключевые слова: контейнеровоз, контейнер, остойчивость, метацентрическая высота, бортовая качка, сохранная перевозка, потеря контейнеров.

Для цитирования:

Царик Р. С. Исследование оценки надежности крепления контейнеров с учетом фактической метацентрической высоты контейнеровоза / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 679–689. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-679-689.

Введение (Introduction)

Морские контейнерные перевозки имеют важнейшее значение для современной мировой экономики. Количество инцидентов в отрасли в процентном отношении крайне низкое, абсолютные значения при этом очень высоки. Крупнейшим контейнеровозом, находящимся в эксплуатации в настоящий момент, является MSC Irina и пять однотипных ему судов, принадлежащих компании Mediterranean Shipping Company (MSC). Их контейнеровместимость составляет 24346 ДФЭ (ДФЭ — двадцатифутовый эквивалент контейнеровместимости). За последние годы растущая контейнеровместимость обеспечивалась увеличением длины и ширины судна, но в большей степени — за счет увеличения количества ярусов в палубных штабелях, которая теперь достигает 11. Ограниченные глубины в важнейших акваториях не позволяют существенно увеличить осадку судов [1]. Доля палубных контейнеров достигает 60 % от общего количества контейнеров, перевозимых на судне. Типовые размеры современного крупнейшего контейнеровоза следующие: длина — 400 м, ширина — 61,5 м, осадка — 17,0 м. Рост контейнеровместимости судов опережает развитие соответствующих технологий, обеспечивающих безопасность эксплуатации контейнеровозов этого класса.

Факторы, влияющие на безопасность морских контейнерных перевозок, проанализированы в работе [2]. Планирование загрузки контейнеровозов является сложной задачей, которая до сих пор не нашла удобного и в достаточной мере эффективного решения [3]. Обеспечение безопасной перевозки контейнеров на современных крупнотоннажных контейнеровозах является наиболее значимым вызовом как для членов экипажей, так и для береговых специалистов. За период 2020—2023 гг. потери контейнеров за борт составляют около 23500 единиц, или в среднем 1470 ед. в год. Статистика аварийности за указанный период показала, что оказались за бортом в море и были потеряны более 7000 контейнеров в более чем 30 авариях¹. При этом сотни контейнеров получили повреждения, несмотря на то, что остались на борту судна. Крупнейшие потери произошли на контейнеровозах ONE Apus (1816 контейнеров) и Maersk Essen (750 контейнеров). Данная проблема требует эффективного решения несмотря на то, что в 2022 и 2023 гг. было зафиксировано существенное снижение количества потерянных за борт контейнеров (661 и 221 соответственно).

¹ Containers Lost at Sea — 2024 Update // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://static1.squarespace.com/static/5ff6c5336c885a268148bdcc/t/6667a1b5a8b88c3efac6665e/1718067641677/Containers_Lost_at_Sea_2024_FINAL.pdf (дата обращения 05.09.2024).

Очевидно, что увеличение количества ярусов в палубных контейнерных штабелях повышает риск потери контейнеров за борт при несоблюдении требований к их размещению и креплению. Одним из основных вопросов, который предстоит решить, является соответствие действующих стандартов и правил современным реалиям и угрозам безопасности. Во многом это касается разработки надежных систем крепления контейнеров, проектирования, производства, сертификации и надлежащего использования средств крепления контейнеров [4], [5]. Оценка надежности систем крепления контейнеров является чрезвычайно важной задачей для предотвращения их потери за борт.

Масштабность и актуальность проблемы подтверждается тем, что Международная морская организация (ИМО) взяла ее решение под свой контроль. Так, на базе Морского исследовательского института Нидерландов (Maritime Research Institute Netherlands, MARIN) был запущен совместный отраслевой проект TopTier, который признан ИМО как эффективный инструмент обеспечения безопасности морской перевозки контейнеров, о чем отмечалось в повестке № 13 9-й сессии подкомитета ИМО по перевозке грузов и контейнерам². Участниками проекта TopTier являются операторы судов, судовладельцы, морские администрации государств, операторы контейнерных терминалов, производители контейнеров и средств крепления, страховые компании и различные исследовательские институты. Среди них такие лидеры отрасли, как MSC, Maersk, CMA CGM, Hapag Lloyd, ONE, Evergreen, DNV GL, ABS, Lloyd Register, CCS, ClassNK, Bureau Veritas, Korean Register, MacGregor, ABB и др. Анализ деятельности участников проекта TopTier показал, что в числе исходных данных для оценки параметров бортовой качки судна не учитывается фактическая метацентрическая высота (МЦВ) судна.

Целью настоящей работы является подтверждение необходимости учета фактической МЦВ судна для определения фактических параметров бортовой качки на этапе планирования загрузки судна и в процессе выполнения рейса. Для этого в работе проанализированы существующие методы оценки надежности средств крепления контейнеров и расчета нагрузок, действующих на контейнеры и средства крепления. В расчетные алгоритмы предлагается включить элементы, учитывающие фактическую МЦВ судна. На примере реально существующего ультрабольшого контейнеровоза выполнены расчеты, демонстрирующие влияние МЦВ на ускорение бортовой качки как одного из основных параметров, лежащих в основе расчета нагрузок, действующих на контейнеры и средства крепления.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Решение вопросов, связанных с надежностью систем и средств крепления контейнеров на судне, имеет важнейшее практическое значение для обеспечения безопасности эксплуатации контейнеровозов.

В рамках проекта TopTier осуществляется разработка способов обеспечения надежной и сохранной перевозки контейнеров на современных крупнотоннажных контейнеровозах. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Повышение эффективности конструкций судов и контейнерного оборудования.
2. Повышение эффективности планирования размещения контейнеров на судне и их крепления.
3. Моделирование и расчет нагрузок на контейнерные штабели и средства крепления контейнеров [6], [7].

4. Повышение осведомленности членов экипажа об особенностях эксплуатации контейнеровозов в потенциально опасных условиях.

Основными причинами потери контейнеров за борт являются:

1. Ненадлежащее крепление контейнеров и дефекты средств крепления.
2. Нарушения при размещении контейнеров на судне.
3. Недостаточная квалификация членов экипажа в вопросах управления судном и недостаточная осведомленность о рисках.
4. Неблагоприятные гидрометеорологические условия плавания.

² TopTier Securing container safety // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.marin.nl/en/jips/toptier> (дата обращения 05.09.2024).

Крепление контейнеров на судне должно выполняться в соответствии с Наставлением по креплению контейнеров, разработанным для судна и одобренным классификационным обществом. Однако этот документ представляет собой лишь схему крепления контейнеров, но не дает возможности рассчитать нагрузки, действующие на контейнеры и средства крепления. Для этих целей используется специальное программное обеспечение (ПО). Это ПО может базироваться на разных расчетных алгоритмах, но в их основе лежит один принцип: нагрузки, действующие на контейнер и средства крепления при самом неблагоприятном варианте, не должны превышать допустимые, установленные для контейнера и его средств крепления. В работе [8] указанный принцип описан следующим образом:

$$F_{s_i} = \Phi_i(m_j, a_k) < F_{c_i}, \quad (1)$$

где F_{s_i} — удерживающая сила каждого из средств крепления, используемого для контейнера (i — средство крепления: твистлок, крепежная штанга и т. д. [$1 < i < n$]);

F_{c_i} — максимально допустимая нагрузка на каждое из средств крепления, используемого для контейнера (i — средство крепления: твистлок, крепежная штанга и т. д.);

Φ_i — расчетный алгоритм, используемый для определения величины F_{s_i} ;

m_j — запланированное распределение масс контейнеров в соответствии с грузовым планом судна [$1 < j < m$];

a_k — ускорение каждого элемента контейнера и средства крепления, имеющих движение в процессе перевозки [$1 < k < o$].

Состояние загрузки судна и его МЦВ зависят от распределения массы контейнеров, которая находится в основе расчета динамики судна и нагрузок, действующих на контейнеры и средства крепления. Сложность этих расчетов заключается в неопределенности таких расчетных элементов, как динамика движения судна и контейнеров, исходные данные по весовым нагрузкам, алгоритм расчета нагрузок и критерии отказа. В общем виде расчетный алгоритм с учетом неопределенностей можно описать следующим образом:

$$\Phi_i(m_j + \Delta m_j, a_k + \Delta a_k) + \Delta \Phi_i(m_j + \Delta m_j, a_k + \Delta a_k) < F_{c_i} - \Delta F_{c_i}, \quad (2)$$

Чувствительность рассчитанных нагрузок к различным неопределенностям описывается путем линеаризации выражения относительно некоторого проектного (допустимого) значения, при этом влияние неопределенности входных данных на неопределенность алгоритма игнорируется:

$$\Phi_i(m_j, a_k) - F_{c_i} + \frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta m_j} \Delta m_j + \frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta a_k} \Delta a_k + \Delta \Phi_i(m_j, a_k) + \Delta F_{c_i} < 0. \quad (3)$$

Первые два слагаемых представляют собой идеальную цель планирования загрузки. Она может быть рассчитана таким образом, чтобы каждая нагрузка реакции крепления не превышала его критерий предельного состояния. Остальные слагаемые отражают чувствительность рассчитанных нагрузок к неопределенностям, обусловленным массой контейнеров, экстремальным ускорением, ошибками расчетного алгоритма и более низкими, чем ожидалось, значениями удерживающих сил, обеспечиваемых средствами крепления. Таким образом, надежность крепления контейнеров определяется вероятностью выполнения следующего условия:

$$P \left(\frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta m_j} \Delta m_j + \frac{\delta \Phi_i(m_j, a_k)}{\delta a_k} \Delta a_k + \Delta \Phi_i(m_j, a_k) + \Delta F_{c_i} < 0 \mid \Phi_i(m_j, a_k) = F_{c_i} \right), \quad (4)$$

Важно отметить отсутствие точной информации по неопределенностям, входящим в параметры Δm_j , Δa_k , $\Delta \Phi_i$ и ΔF_{c_i} . Эти неопределенности предполагается определить и квантифицировать в рамках отраслевого проекта TopTier.

Если пренебречь неопределенностями, связанными с вводом значений масс контейнеров, то надежность средств крепления в контексте динамических нагрузок определяется вероятностью

$$P\left(\frac{\delta\Phi_i(m_j, a_k)}{\delta a_k} \Delta a_k + \Delta\Phi_i(m_j, a_k) + \Delta F_{c_i} < 0 \mid \Phi_i(m_j, a_k) = F_{c_i}\right), \quad (5)$$

Здесь определяется вероятность того, что неопределенности, вызванные ускорениями и систематическими погрешностями в алгоритме расчета нагрузок, совокупно превысят коэффициент безопасности ΔF_{c_i} в условиях, когда при планировании загрузки ставится цель использовать всю доступную вместимость судна с моделируемыми ускорениями и массами.

Планирование загрузки и расчет крепления контейнеров выполняются для допустимых динамических нагрузок («in design»). При этом принимается условие, что чрезмерных нагрузок, превышающих допустимые («off design»), удастся избежать, прежде всего при условии безопасной эксплуатации судна экипажем. Это, в том числе, предполагает оценку рисков во избежание попадания в условия чрезмерной бортовой качки судна, в особенности резонансной. Ускорение бортовой качки можно сформулировать следующим образом:

$$a_k = a_{k_{in}} + \Delta a_{k_{in}} + a_{k_{off}} + \Delta a_{k_{off}}, \quad (6)$$

где $a_{k_{in}}$ — ускорение бортовой качки в пределах установленной нормы (in design);

$\Delta a_{k_{in}}$ — неопределенность ускорения бортовой качки в пределах установленной нормы (in design);

$a_{k_{off}}$ — ускорение бортовой качки за пределами установленной нормы (off design);

$\Delta a_{k_{off}}$ — неопределенность ускорения бортовой качки за пределами установленной нормы (off design).

Ускорение бортовой качки судна, в частности, зависит от величины МЦВ. Чем больше МЦВ, тем больше ускорение бортовой качки, и, соответственно, динамические нагрузки на контейнеры и средства крепления. Результаты исследований показали, что влияние МЦВ на нагрузки, действующие на контейнерный штабель, может быть весьма значительным и привести к превышению их допустимых значений [9].

При бортовой качке контейнер и средства крепления испытывают нагрузки, варьирующие в зависимости от подъема или опускания судна на волне (вертикальная качка) и одновременного накренения на правый или левый борт. Можно выделить следующие сочетания нагрузок:

- подъем судна на волне и восходящее движение от накренения;
- подъем судна на волне и нисходящее движение от накренения;
- опускание судна на волне и восходящее движение от накренения;
- опускание судна на волне и нисходящее движение от накренения.

Графически описанные нагрузки представлены на рис. 1. Их расчет выполняется по следующим формулам, где ускорение бортовой качки a_k представлено в виде a_{roll} :

$$1. F_v = M(g \cos \theta + 0,1a_{heave} + |y_i|a_{roll}); \quad (7)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}). \quad (8)$$

$$2. F_v = M(g \cos \theta + 0,1a_{heave} - |y_i|a_{roll}); \quad (9)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}). \quad (10)$$

$$3. F_v = M(g \cos \theta - 0,1a_{heave} + |y_i|a_{roll}); \quad (11)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}). \quad (12)$$

$$4. F_v = M(g \cos \theta - 0,1a_{heave} - |y_i|a_{roll}); \quad (13)$$

$$F_t = C_y M(g \sin \theta + (z_i - Z_{rc})a_{roll}), \quad (14)$$

где z_i — аппликата ЦТ контейнера;

z_{rc} — вертикальное расстояние от днища судна до центра вращения бортовой качки судна (принимает большее значение из следующих: $z_{rc} = 0,5(D/2 + d)$ или $z_{rc} = D/2$;

C_y — коэффициент, учитывающий ускорение носовой оконечности судна при рыскании, $C_y = 1 + (x_i - 0,75L_{pp}) / L_{pp}$ при $x_i \geq 0,75L_{pp}$; $C_y = 1$ при $x_i < 0,75L_{pp}$.

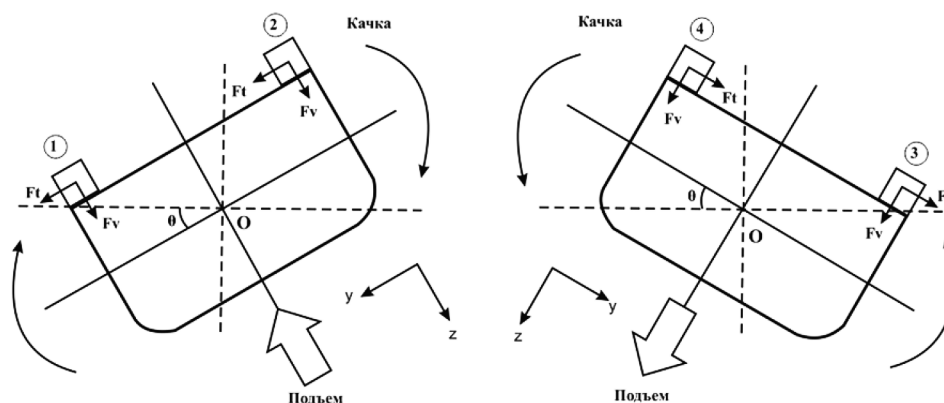


Рис. 1. Распределение основных нагрузок на палубный контейнерный штабель при бортовой качке

Ускорение бортовой качки судна a_{roll} определяется по формуле

$$a_{roll} = \theta \left(\frac{2\pi}{T_\theta} \right)^2, \quad (15)$$

где a_{roll} — ускорение в центре тяжести судна от бортовой качки, рад/с²;

θ — угол крена, рад;

T_θ — период бортовой качки, с.

Период бортовой качки рассчитывается по формуле

$$T_\theta = 1,1 \frac{2K_{xx}}{\sqrt{GM}}, \quad (16)$$

где T_θ — период бортовой качки, с;

K_{xx} — радиус инерции массы судна при бортовой качке, м ($K_{xx} = 0,35B$, где B — ширина судна, м);

GM — МЦВ судна, м.

Угол крена θ рассчитывается по формуле

$$\theta = \frac{2,81C}{T_E \sqrt{B}} \sqrt{\frac{L_0}{L_{pp}} + \frac{gT_E^2}{2\pi L_{pp}} - \frac{125}{L_{pp}}}, \quad (17)$$

где θ — угол крена, рад (значение θ принимается в интервале от 20 до 30 град.);

C — коэффициент, учитывающий высоту волнения:

$C = 10,75 - ((300 - L_{pp}) / 100)^{1,5}$ при $L_{pp} \leq 300$ м;

$C = 10,75$ при $300 \text{ м} < L_{pp} \leq 350$ м;

$C = 10,75 - ((L_{pp} - 350) / 150)^{1,5}$ при $L_{pp} > 350$ м;

L_0 — длина судна, определяемая при максимальной осадке от форштевня до осевой линии баллера руля, м (при $L_0 < 10$ м L_0 принимается равной 110 м);

L_{pp} — длина судна между перпендикулярами, м;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

T_E — период набегания волн на судно, с;

$$\text{при } T_{\theta} > 1,1 \frac{2\pi}{g} V \quad T_E = 0,5 \left(T_{\theta} + \sqrt{T_{\theta}^2 - \frac{2\pi}{g} V T_{\theta}} \right);$$

$$\text{при } T_{\theta} \leq 1,1 \frac{2\pi}{g} V \quad T_E = T_{\theta};$$

V — скорость судна, уз.

Формулы (15) и (16) демонстрируют очевидную зависимость ускорения бортовой качки от МЦВ судна (GM). Исследования, выполненные в работах [10], [11], показали, что аппликата фактического центра тяжести контейнеров может отличаться от нормированной на несколько десятков сантиметров. Это, в свою очередь, приводит к тому, что фактическая МЦВ судна также может отличаться от расчетной на несколько десятков сантиметров.

Незнание экипажем фактической МЦВ судна представляет собой дополнительную неопределенность при расчетах ускорения бортовой качки и нагрузок на контейнеры и средства крепления. Эта неопределенность должна учитываться при расчетах ускорения бортовой качки по выражению (6). Тогда выражение (6) может быть записано в следующем виде:

$$a_k = a_{k_{in}} + \Delta a_{k_{in}} + a_{k_{off}} + \Delta a_{k_{off}} + \Delta a_{k_{GM}}, \quad (18)$$

где $\Delta a_{k_{GM}}$ — неопределенность ускорения бортовой качки, обусловленная значением фактической МЦВ, которое неизвестно.

Знание экипажем значения фактической МЦВ означает, что неопределенность $\Delta a_{k_{GM}}$ может быть принята равной нулю, а итоговое значение ускорения бортовой качки a_k может быть определено более точно, что, в свою очередь, позволит более точно определить нагрузки, которые будут действовать на контейнеры и средства крепления в течение рейса.

Результаты (Results)

В настоящей работе исследования проводились на примере ультрабольшого контейнеровоза, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики модельного контейнеровоза

Валовая вместимость	210 678
Дедвейт	197 059 т
Водоизмещение по летнюю марку	254 516 т
Длина наибольшая	399,86 м
Длина между перпендикулярами	383,00 м
Ширина	58,8 м
Летняя осадка	16,025 м
Эксплуатационная скорость	22,5 уз
Максимальная контейнеровместимость	20 170 ДФЭ

Приняв условное увеличение МЦВ судна на 0,2 м, обусловленное тем, что фактическая аппликата ЦТ контейнеров на некоторую величину ниже, чем расчетная, была выполнена оценка увеличения ускорения бортовой качки a_{roll} для разных углов крена в диапазоне 1–30 град. Это увеличение a_{roll} по своей сути и является $\Delta a_{k_{GM}}$, включенной в формулу (6) для учета неопределенности ускорения бортовой качки, обусловленной значением фактической МЦВ, которое неизвестно. Расчетные МЦВ были рассмотрены в диапазоне 1,5–10,0 м, что в достаточной мере охватывает возможные значения МЦВ для большинства случаев загрузки модельного судна. Для начального и каждого последующего, значения МЦВ, кратного 1 м, были добавлены 0,2 м и затем выполнено сравнение полученных результатов.

Графически результаты увеличения a_{roll} на примере пары значений МЦВ 3,0 и 3,2 м представлены на рис. 3. Установлено, что для любых значений МЦВ в рассматриваемом диапазоне абсолютное увеличение a_{roll} носит линейный характер. При этом увеличение a_{roll} для выбранной пары значений МЦВ, очевидно, растет с увеличением угла крена (θ). Для некоторых значений МЦВ и θ значение a_{roll} приведено в табл. 2.

Вместе с тем следует отметить, что динамика увеличения a_{roll} снижается с увеличением МЦВ для того же угла крена. Например, при увеличении МЦВ с 1,5 м до 1,7 м a_{roll} при угле крена 20° увеличится с 0,577 до 0,656 ($\Delta a_{k_{GM}} = 0,079$) рад/с², а при увеличении МЦВ с 10,0 м до 10,2 м a_{roll} увеличится с 3,861 до 3,916 ($\Delta a_{k_{GM}} = 0,055$) рад/с².

Таблица 2

Значение a_{roll} в зависимости от угла крена и МЦВ

θ , град	МЦВ, м									
	1,5	1,7	3,0	3,2	5,0	5,2	7,0	7,2	10,0	10,2
5	0,144	0,164	0,290	0,308	0,484	0,498	0,675	0,691	0,965	0,979
10	0,288	0,328	0,580	0,617	0,968	0,997	1,350	1,382	1,931	1,958
15	0,433	0,492	0,869	0,925	1,451	1,495	2,025	2,073	2,896	2,937
20	0,577	0,656	1,159	1,234	1,935	1,994	2,700	2,764	3,861	3,916
25	0,721	0,820	1,449	1,542	2,419	2,492	3,375	3,456	4,826	4,895
30	0,865	0,984	1,739	1,850	2,903	2,991	4,050	4,147	5,792	5,874

Графически изменение a_{roll} в зависимости от МЦВ на примере значений 3,0 и 3,2 м показано на рис. 2.

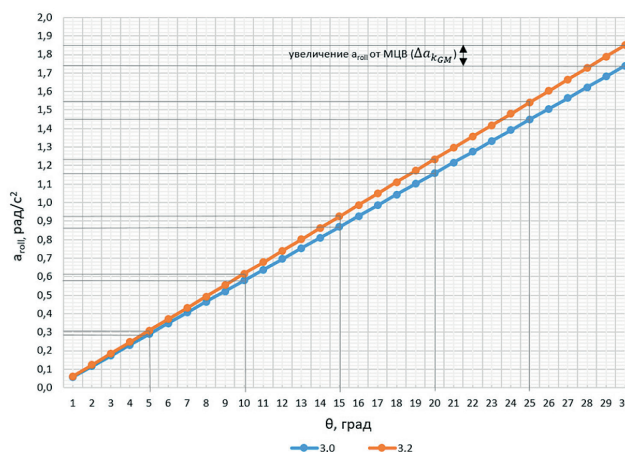


Рис. 2. Увеличение a_{roll} при разных углах крена для МЦВ 3,0 м и 3,2 м

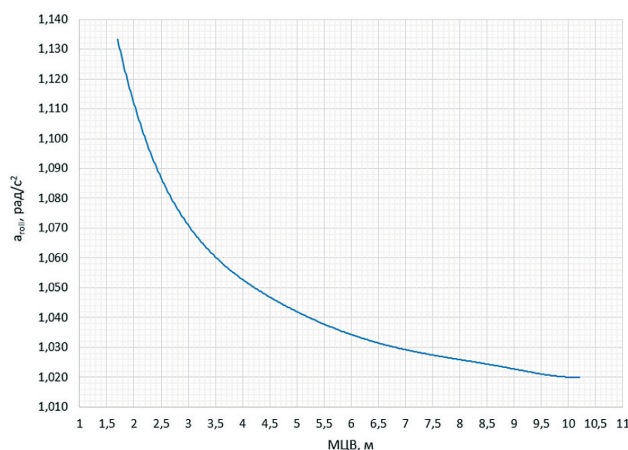


Рис. 3. Динамика относительного изменения a_{roll} в зависимости от МЦВ

Относительное изменение a_{roll} определялось как отношение его значений при МЦВ, увеличенной на 0,2 м, и ее исходным значением. Например, для $\theta = 20^\circ$ при МЦВ 3,0 и 3,2 м $a_{roll} = 1,159$ и 1,234 рад/с² соответственно (см. табл. 2), а отношение этих величин равно 1,067 (рис. 3) и оно отношение не изменяется в зависимости от угла крена θ при тех же значениях МЦВ.

Заключение (Conclusion)

Разработка надежных систем и средств крепления контейнеров является важнейшей задачей, актуальность которой растет с учетом увеличения рисков потери контейнеров за борт при эксплуатации современных крупнотоннажных контейнеровозов. Решение данной задачи осложняется наличием большого числа неопределенностей, которые необходимо учитывать при расчетах. Квантификация этих неопределенностей может быть выполнена на основе практического опыта эксплуатации флота и имеющихся статистических данных.

Фактические параметры бортовой качки судна, обусловленные разницей между расчетной аппликацией центра тяжести контейнеров и ее фактическим значением, а также соответствующим изменением МЦВ, либо совсем не учитываются, либо учитываются недостаточно. Расчетные алгоритмы, применяемые для оценки надежности систем крепления контейнеров, среди прочих неопределенностей не учитывают, что фактическая МЦВ контейнеровоза, по сути, остается неизвестной, поскольку в ее расчетах используется стандартное, а не фактическое значение аппликаты центра тяжести контейнеров. Поэтому полученные таким образом результаты расчетов нельзя считать объективными.

Выполненные в настоящей работе исследования подтверждают необходимость учета в расчетных алгоритмах фактической метацентрической высоты контейнеровоза для оценки надежности средств крепления контейнеров с целью их сохранной перевозки и обеспечения безопасной эксплуатации контейнеровозов в целом. Это делает необходимым определение и учет фактической аппликаты центра тяжести контейнеров на этапе планирования загрузки судна.

Дальнейшие исследования этой проблемы могут быть направлены на разработку эффективных расчетных алгоритмов, позволяющих определять надежность систем крепления контейнеров с учетом использования различных средств крепления, в том числе имеющих разные эксплуатационные и прочностные характеристики. Целесообразно, чтобы результаты исследований этого вопроса были учтены в нормативных документах, направленных на обеспечение безопасной эксплуатации судов-контейнеровозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якута И. В. Исследование влияния изменения отношений главных размерений на мореходные качества контейнеровозов / И. В. Якута // Известия КГТУ. — 2023. — № 68. — С. 110–124. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124. — EDN QHACIU.
2. Акмайкин Д. А. Анализ факторов, влияющих на безопасность морских контейнерных перевозок / Д. А. Акмайкин, Р. С. Царик, А. Д. Москаленко [и др.] // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 207–210. — EDN VLMVKT.
3. Кузнецов А. Л. Распределение контейнеров по «бязм» при составлении грузового плана контейнеровоза / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов, А. М. Сампиев // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 1–1(59). — С. 219–223. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.028. — EDN ANYKAT.
4. Radisic Z. Necessity of proper lashing of containers on the ship's deck as part of optimization of the sea voyage / Z. Radisic // Promet-traffic & transportation. — 2004. — Vol. 16. — Is. 2. — 97–104. DOI: 10.7307/ptt.v16i2.580.
5. Yulianto T. Strength analysis of a container lashing on the container ship by using finite element method / T. Yulianto, S. H. Sujatanti и др. // Department of naval architecture, Faculty of maritime technology, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia. — 2018. — Pp. 6–7. DOI: 10.5220/0008375401010105.
6. Fukasawa T. Numerical simulation of the behavior of multi high container stack and the consideration on the container securing system, 1 st Report: Rigid-body modeling / T. Fukasawa, N. Ohtsuki, K. Uenishi // Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. — 2006. — Vol. 4 — Pp. 213–220. DOI: 10.2534/jjasnaoe.4.213.

7. Li C. Dynamic investigation of a seven-tier container stack with different lashing arrangements subject to rolling and pitching excitation / C. Li, Z. Cai, D. Wang // *Ships and Offshore Structures*. — 2022. — Vol. 17. — Is. 7. Pp. 1581–1591. DOI: 10.1080/17445302.2021.1937792.

8. Konning J. TopTier, seakeeping and container cargo securing safety / J. Konning, R. Green, W. Pauw // *Proceedings of the 18th International Ship Stability Workshop*. — 2022. — Pp. 259–264.

9. Царик Р. С. Оценка влияния аппликаты центра тяжести контейнера на нагрузки палубного контейнерного штабеля / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 207–221. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221. — EDN FVUURC.

10. Царик Р. С. Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метacentрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70. — EDN XHLRIN.

11. Царик Р. С. Оценка влияния стандартного и фактического центров тяжести контейнера с типовым размещением груза на метacentрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28. — EDN GNVQGL.

REFERENCES

1. Yakuta, Irina V. “Study of the effect of changing the ratio of main dimensions on the seaworthiness of container ships” *Vestnik of Kaliningrad State Technical University* 68 (2023): 110–124. DOI 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124.

2. Akmaykin, Denis A. “Analysis of factors affecting the safety of container shipping” / D. A. Akmaykin, R. S. Tsarik, A. D. Moskalenko et al. // *Transportnoe delo Rossii* 6 (2015): 207–210.

3. Kuznetsov, Aleksandr L. The algorithm of container grouping for the bayplan creation purposes / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, A. M. Sampiev // *Marine intellectual technologies* 1.1 (2023): 219–223. DOI 10.37220/MIT.2023.59.1.028.

4. Radisic Z. “Necessity of proper lashing of containers on the ship’s deck as part of optimization of the sea voyage.” *Promet-Traffic&Transportation* 16.2 (2004): 97–104. DOI: 10.7307/ptt.v16i2.580.

5. Yulianto T., S. H. Sujatanti et. al. “Strength analysis of a container lashing on the container ship by using finite element method” *Department of naval architecture, Faculty of maritime technology, Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya, Indonesia*. (2018): 6–7. DOI: 10.5220/0008375401010105.

6. Fukasawa, Toichi, Nobuya Ohtsuki, and Kiyohito Uenishi. “Numerical simulation of the behavior of multi high container stack and the consideration on the container securing system- 1 super (st) Report: Rigid-body modeling.” *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* 4 (2006): 213–220. DOI: 10.2534/jjasnaoe.4.213.

7. Li, Chuntong, Zhonghua Cai, and Deyu Wang. “Dynamic investigation of a seven-tier container stack with different lashing arrangements subject to rolling and pitching excitation.” *Ships and Offshore Structures* 17.7 (2022): 1581–1591. DOI: 10.1080/17445302.2021.1937792.

8. Koning, J., R. Grin, and W. Pauw. “TopTier, seakeeping and container cargo securing safety.” *Proceedings of the 18th international ship stability workshop* (2022): 259–264.

9. Tsarik, Ruslan S. “Evaluation of container center of gravity height influence on deck container stack loads” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 207–221. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-2-207-221.

10. Tsarik, Ruslan S. and D. A. Akmaykin Evaluation of influence of container’s center of gravity position on container ship’s metacentric height *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.

11. Tsarik, Ruslan S. “Evaluating the influence of the standard and actual centers of gravity of the typically loaded container on the metacentric height of a container ship” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 17–28. DOI 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Царик Руслан Станиславович —

капитан, кандидат технических наук.

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»

690003, Российская Федерация, Владивосток,

ул. Верхнепортовая, д. 50а

e-mail: tsarik@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tsarik, Ruslan Stanislavovich —

Master mariner, PhD

Maritime State University

named after admiral G. I. Nevelskoi

50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,

Russian Federation

e-mail: tsarik@msun.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2024 г.

Received: September 10, 2024.