

APPROXIMATION OF THE WAVE PROFILE FOR SIMPLIFIED CALCULATION OF THE WATERPLANE AREA OF A CONTAINER SHIP IN WAVES

R. S. Tsarik

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The article proposes a stepwise approximation method for the wave profile to simplify the calculation of the waterplane area of a container ship in waves. The specific hull form of container ships, characterized by fine bow and stern shapes and a full midship section, leads to significant variations in the waterplane area when operating in waves, which directly affects stability and, consequently, navigational safety. Calculating the waterplane area under wave conditions is a complex problem that is difficult for navigation officers to solve in practical shipboard conditions. To facilitate this task, a simplified calculation method based on stepwise approximation of the wave profile and the use of waterplane section fullness coefficients is proposed. This method makes it possible to determine changes in the waterplane area depending on the position of the wave along the ship's hull. The study employs the characteristics of a real large container ship for the calculations. A quasi-static positioning of the ship on a wave whose length is equal to the ship's length between perpendiculars is considered, and two wave crest position scenarios along the hull are analyzed: at the bow and stern, and at the midship section. Waterplane profiles for specified draughts are obtained from measurements taken from the ship's design drawings. The areas of the waterplane sections and their fullness coefficients are determined, and the waterplane areas in waves are calculated for the two selected scenarios. The calculation results demonstrate sufficient accuracy of the proposed method, which justifies its practical application by navigation officers. It is noted that further research based on the results obtained in this study may be aimed at identifying dangerous wavelengths not equal to the ship length and at assessing changes in container ship stability as a function of variations in the waterplane area in waves. The application of the research results by navigation officers will enable improved control of container ship behavior in waves and will significantly contribute to enhancing navigational safety.

Keywords: container ship; stability; waterplane area; fullness coefficient; waves; approximation; wave profile; theoretical frame; equivalent waterline method; quasi-static positioning.

For citation:

Tsarik, Ruslan S. "Approximation of the wave profile for simplified calculation of the waterplane area of a container ship in waves." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.6 (2025): 858–872. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-858-872.

УДК 656.61.052

АППРОКСИМАЦИЯ ВОЛНОВОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ УПРОЩЕННОГО РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ ВАТЕРЛИНИИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА ВОЛНЕНИИ

Р. С. Царик

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского»,
Владивосток, Российская Федерация

В статье предложен метод ступенчатой аппроксимации волнового профиля для упрощенного расчета площади ватерлинии контейнеровоза на волнении. Особенности обводов корпуса контейнеровоза предполагают острые оконечности и полную среднюю часть. Это способствует существенному изменению площади ватерлинии на волнении, что непосредственно влияет на остойчивость, а значит, и на безопасность судна. Расчет площади ватерлинии на волнении представляет собой сложную задачу, решение которой судоводителями на практике весьма затруднительно. Для облегчения решения этой задачи в статье предложен упрощенный вариант расчета с применением ступенчатой аппроксимации волнового профиля и коэффициентов полноты площади секций ватерлинии. Этот метод позволяет определять изменение площади ватерлинии в зависимости от положения волны вдоль корпуса судна. Для расчетов

в статье использованы характеристики реального крупнотоннажного контейнеровоза. Рассмотрена квазистатичная постановка судна на волну, длина которой равна длине судна между перпендикулярами, и проанализированы два варианта положения гребней волны вдоль корпуса судна: на оконечностях и на мидель-шпангоуте. Путем замеров, выполненных на построечных чертежах судна, сформированы профили ватерлинии для заданных осадок. Определены площади секций ватерлиний и их коэффициенты полноты. Рассчитаны площади ватерлиний на волнении для двух выбранных сценариев. Результаты расчетов показали достаточную точность предложенного метода, что обосновывает его применение судоводителями на практике. Отмечается, что дальнейшие исследования на основе полученных в настоящей работе результатов могут быть направлены на определение опасных длин волн, неравных длине судна, и определение изменения остойчивости контейнеровоза в зависимости от изменения площади его ватерлинии на волнении. Использование судоводителями результатов выполненного исследования позволит лучшим образом контролировать поведение контейнеровоза на волнении и будет в значительной мере способствовать повышению безопасности судоходства.

Ключевые слова: контейнеровоз, остойчивость, площадь ватерлинии, коэффициент полноты, волнение, аппроксимация, волновой профиль, теоретическая шпация, метод эквивалентных ватерлиний, квазистатичная постановка.

Для цитирования:

Царик Р. С. Аппроксимация волнового профиля для упрощенного расчета площади ватерлинии контейнеровоза на волнении / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 6. — С. 858–872. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-858-872. — EDN IFINDB.

Введение (Introduction)

Безопасность эксплуатации любого судна находится в прямой зависимости от его способности сохранять остойчивость в различных условиях плавания, в том числе на волнении. Для современных крупнотоннажных контейнеровозов, характеризующихся острыми оконечностями и относительно небольшой полной средней частью, эта проблема является особенно актуальной. Специфика архитектуры контейнеровозов способствует тому, что при попадании судна на продольную волну, длина которой сравнима с длиной корпуса, происходит значительное изменение площади ватерлинии. Этот параметр является очень важной составляющей критериев остойчивости, а ее резкие колебания могут представлять серьезную угрозу безопасности судна.

Практический расчет площади ватерлинии в условиях волнения представляет для судоводителей значительную сложность, поскольку требует применения трудоемких математических методов, неприменимых в оперативной обстановке. Существующие упрощенные подходы в основном позволяют выполнять приближенные расчеты площади ватерлинии для заданной осадки, но неприменимы для расчетов на волнении, когда значения осадок вдоль корпуса судна изменяются.

Целью данного исследования является разработка и апробация упрощенного метода расчета площади ватерлинии контейнеровоза на волнении, пригодного для применения на практике. В основе предлагаемого метода лежит ступенчатая аппроксимация волнового профиля с использованием коэффициентов полноты площади секций ватерлинии, что позволяет оперативно оценивать ее изменение в зависимости от положения волны вдоль корпуса судна.

В статье представлены результаты расчетов для реального крупнотоннажного контейнеровоза в квазистатичной постановке на волну длиной, сравнимой с длиной судна между перпендикулярами. Проанализированы два сценария положения гребней волны (расположение гребней волны на оконечностях и на мидель-шпангоуте), оказывающих наибольшее влияние на остойчивость. Показана достаточная точность предложенной методики, что обосновывает ее потенциальную ценность для повышения безопасности судоходства благодаря пригодности для практического применения и способствования более глубокому пониманию судоводителями поведения судна на волнении.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Из теории корабля известно, что ватерлиния судна оказывает непосредственное влияние на его остойчивость. Это обусловлено тем, что от площади ватерлинии зависит ее момент инерции,

который влияет на положение метацентра, определяющего в свою очередь величину метацентрической высоты. Определение остойчивости на больших углах крена также связано с определением величины ватерлинии, поскольку от нее зависят значения плеч остойчивости формы [1].

Необходимо отметить, что как в настоящей работе, так и в других исследованиях этого вопроса рассматривается регулярное волнение, при котором волна имеет идеальный геометрический профиль, чего в реальных условиях никогда не бывает. Тем не менее для изучения сути вопроса и разработки расчетных методов с возможностью их последующего применения к нерегулярному, более близкому к реальности волнению, такой подход вполне оправдан. Настоящая работа базируется на исследованиях влияния конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровоза на его поведение на волнении, включая остойчивость, выполненные в работе [2].

Прохождение волн вдоль корпуса судна рассматривается исходя из того, что длина судна между перпендикулярами равномерно делится теоретическими шпангоутами (станциями), общее количество которых равно 21, на теоретические шпации (секции)¹, при этом нулевая станция находится на мидель-шпангоуте (рис. 1), а счет секций ведется с кормы в нос.

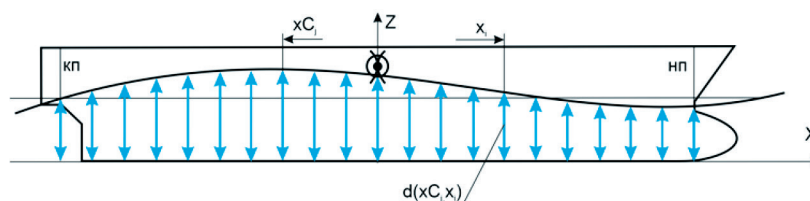


Рис. 1. Позиционирование волны относительно корпуса судна

Осадка судна на каждой станции для каждого положения вершины волны определяется по формуле

$$d(x_i, x_{cj}) = d_m + 0,5h_w \cos\left(\frac{2\pi(x_i - x_{cj})}{\lambda}\right), \quad (1)$$

где x_i — позиция станции вдоль корпуса судна, м; x_{cj} — положение гребня волны вдоль корпуса судна, м; h_w — высота волны, м; d_m — средняя осадка, м.

Полуширота по каждой станции $y(x_i, x_{cj})$ для каждого положения гребня волны определяется линейным интерполированием между осадками, рассчитанными по формуле (1).

Поперечный момент инерции по каждой станции для каждого положения гребня волны

$$I_x(x_{cj}) = \frac{2}{3} \int_{-0,5L}^{0,5L} (y(x_i, x_{cj}))^3 dx. \quad (2)$$

Погруженная площадь по каждой станции для каждого гребня волны

$$\Omega(x_i, x_{cj}) = \int_0^{d_c(x_i, x_{cj})} y(x_i, x_{cj}, z) dz. \quad (3)$$

Расчеты по формулам (1)–(3) достаточно сложны для применения судоводителями на практике [3]. Для принятия решений по безопасной эксплуатации судна судоводитель должен иметь представление о поведении судна на волнении, включая изменение его остойчивости [4]. Поэтому возникает потребность в разработке упрощенного метода расчета. Любое упрощение обычно предполагает ряд ограничений, которые принимаются для того, чтобы упростить расчеты. Как правило, это приводит к снижению точности результатов, поэтому возникает необходимость ее оценки и принятия решения о приемлемости предлагаемого способа. В настоящей работе устанавливаются следующие ограничения:

¹ Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers. ABS. 2024.

– рассматривается регулярная плоская волна синусоидальной формы и относительно малой амплитуды;

- динамическое воздействие волны на корпус судна не рассматриваются;
- вертикальная качка не рассматривается;
- движение судна и его воздействие на волну не рассматривается;
- судно находится в состоянии на ровный киль (крен и дифферент не рассматриваются).

В определенном смысле эти условия можно отнести к квазистатической постановке судна на волну. При этом в конкретный момент времени рассматривается конкретное положение судна относительно гребня или подошвы волны. Таким образом, последовательно рассматриваются все случаи прохождения гребня или подошвы волны через каждую станцию вдоль корпуса судна как совокупность статических ситуаций, а не как динамическое явление.

Применение таких ограничений в настоящей работе считается оправданным, поскольку решается задача разработки и определения приемлемости упрощенных способов расчета площади ватерлинии на волнении. При необходимости для более точных вычислений можно последовательно снимать указанные ограничения. Например, учитывать крен и дифферент, возникающие при качке на волнении. Вертикальная качка, обусловленная изменением соотношения сил тяжести и плавучести при прохождении гребня волны волн вдоль корпуса судна, дополнительно способствует изменению площади ватерлинии. Поэтому учет этого явления позволил бы более точно ее рассчитывать. Для исключения всех указанных ранее ограничений применяются методы вычислительной гидромеханики (CFD), которые используются в кораблестроении, но не используются в практике судовождения.

Одним из вариантов упрощения является применение метода эквивалентных ватерлиний, который заключается в использовании двух значений ватерлиний: минимальной и максимальной, соответствующих двум значениям осадок, определяемых с учетом амплитуды волнения (рис. 2). В соответствии с этим методом определяются значения минимальной и максимальной осадок:

$$\begin{cases} d_{\min} = d_m - \delta d_{\min}; \\ d_{\max} = d_m + \delta d_{\max}, \end{cases} \quad (4)$$

где d_m — средняя осадка при данной загрузке судна, м; $\delta d_{\min, \max}$ — поправка к минимальной и максимальной осадке соответственно.

Поправка к минимальной и максимальной осадке:

$$\begin{cases} \delta d_{\min} = \min \left(d_m - 0,25d_{full}; \frac{LS_w}{2} \right); \\ \delta d_{\max} = \min \left(D - d_m; \frac{LS_w}{2} \right), \end{cases} \quad (5)$$

где D — высота борта, м; L — длина судна между перпендикулярами, м; S_w — крутизна волн, принимаемая равной 0,0167; d_{full} — осадка, соответствующая максимальной загрузке судна, м.

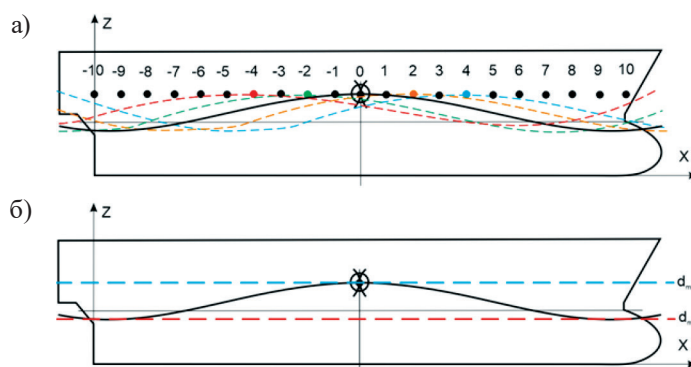


Рис. 2. Метод эквивалентных ватерлиний:
а — полный вариант расчета; б — упрощенный вариант расчета

Для этих двух осадок определяются, соответственно, минимальное и максимальное значения площади ватерлинии. Это метод, в частности, был рассмотрен в работах [5, 6]. Его преимущество заключается в относительной простоте расчетов, недостатки — в принятых допущениях, включая рассмотрение только двух теоретических значений площади ватерлинии, которые в реальности не будут иметь место, поскольку при прохождении волны вдоль корпуса судна ватерлиния будет постоянно изменяться. Значения этих переменных ватерлиний будут находиться в пределах между рассматриваемыми минимальным и максимальным ее значениями, что делает применение данного метода на практике целесообразным для получения представления о минимальном и максимальном значениях метацентрической высоты в контексте изменения положения метacentра.

В настоящей работе предлагается способ ступенчатой аппроксимации волнения, который заключается в замене профиля волны на эквивалентные ступени, заключенные между теоретическими шпангоутами (станциями), которыми корпус судна разделен на 20 теоретических шпаций (секций) — рис. 3.

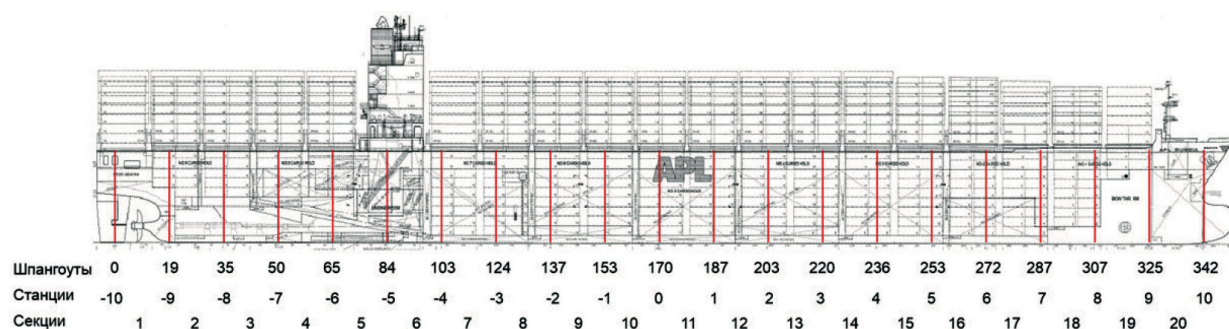


Рис. 3. Схема распределения станций и секций по корпусу судна

Длина каждой ступени будет соответствовать длине секции, а высота — некоторой эквивалентной осадке. При этом участок волнового профиля, заключенный между двумя соседними станциями, рассматривается как отрезок прямой линии, соединяющий соответствующие значения осадок на этих станциях (рис. 4). Такая аппроксимация позволяет приближенно рассчитывать площадь секции ватерлинии для соответствующего значения осадки.

С учетом принятого ограничения о том, что волна регулярная плоская и имеет синусоидальный профиль, она может быть описана следующей формулой:

$$\zeta_{x_i} = \zeta_a \cdot \sin(kx_i), \quad (6)$$

где ζ_{x_i} — ордината волновой поверхности (возвышение или понижение профиля волны относительно уровня средней осадки на тихой воде d) для станции i , м; ζ_a — амплитуда волны, м; x_i — абсцисса станции i , м; λ — длина волны, м; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число.

Значения ординат волнового профиля $\zeta_{x,j,i}$ для всех случаев прохождения гребня волны через каждую станцию целесообразно представить в виде матрицы формата 21×21 , где в строках j будет указано последовательное положение гребня волны на каждой станции от 1 до 21, в столбцах i — номер станции от 1 до 21. Такая матрица будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \zeta_{x1,1} & \zeta_{x1,2} & \zeta_{x1,3} & \zeta_{x1,4} & \zeta_{x1,5} & \zeta_{x1,6} & \zeta_{x1,7} & \zeta_{x1,8} & \zeta_{x1,9} & \zeta_{x1,10} & \zeta_{x1,11} & \zeta_{x1,12} & \zeta_{x1,13} & \zeta_{x1,14} & \zeta_{x1,15} & \zeta_{x1,16} & \zeta_{x1,17} & \zeta_{x1,18} & \zeta_{x1,19} & \zeta_{x1,20} & \zeta_{x1,21} \\ \vdots & \vdots \\ \zeta_{x11,1} & \zeta_{x11,2} & \zeta_{x11,3} & \zeta_{x11,4} & \zeta_{x11,5} & \zeta_{x11,6} & \zeta_{x11,7} & \zeta_{x11,8} & \zeta_{x11,9} & \zeta_{x11,10} & \zeta_{x11,11} & \zeta_{x11,12} & \zeta_{x11,13} & \zeta_{x11,14} & \zeta_{x11,15} & \zeta_{x11,16} & \zeta_{x11,17} & \zeta_{x11,18} & \zeta_{x11,19} & \zeta_{x11,20} & \zeta_{x11,21} \\ \vdots & \vdots \\ \zeta_{x21,1} & \zeta_{x21,2} & \zeta_{x21,3} & \zeta_{x21,4} & \zeta_{x21,5} & \zeta_{x21,6} & \zeta_{x21,7} & \zeta_{x21,8} & \zeta_{x21,9} & \zeta_{x21,10} & \zeta_{x21,11} & \zeta_{x21,12} & \zeta_{x21,13} & \zeta_{x21,14} & \zeta_{x21,15} & \zeta_{x21,16} & \zeta_{x21,17} & \zeta_{x21,18} & \zeta_{x21,19} & \zeta_{x21,20} & \zeta_{x21,21} \end{pmatrix}.$$

Каждый из членов матрицы может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\zeta_{x,j,i} = \zeta_a \cdot \sin\left(\frac{2\pi l_i}{\lambda}(j-i) + \frac{\pi}{2}\right) = \zeta_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi l_i}{\lambda}(j-i)\right). \quad (7)$$

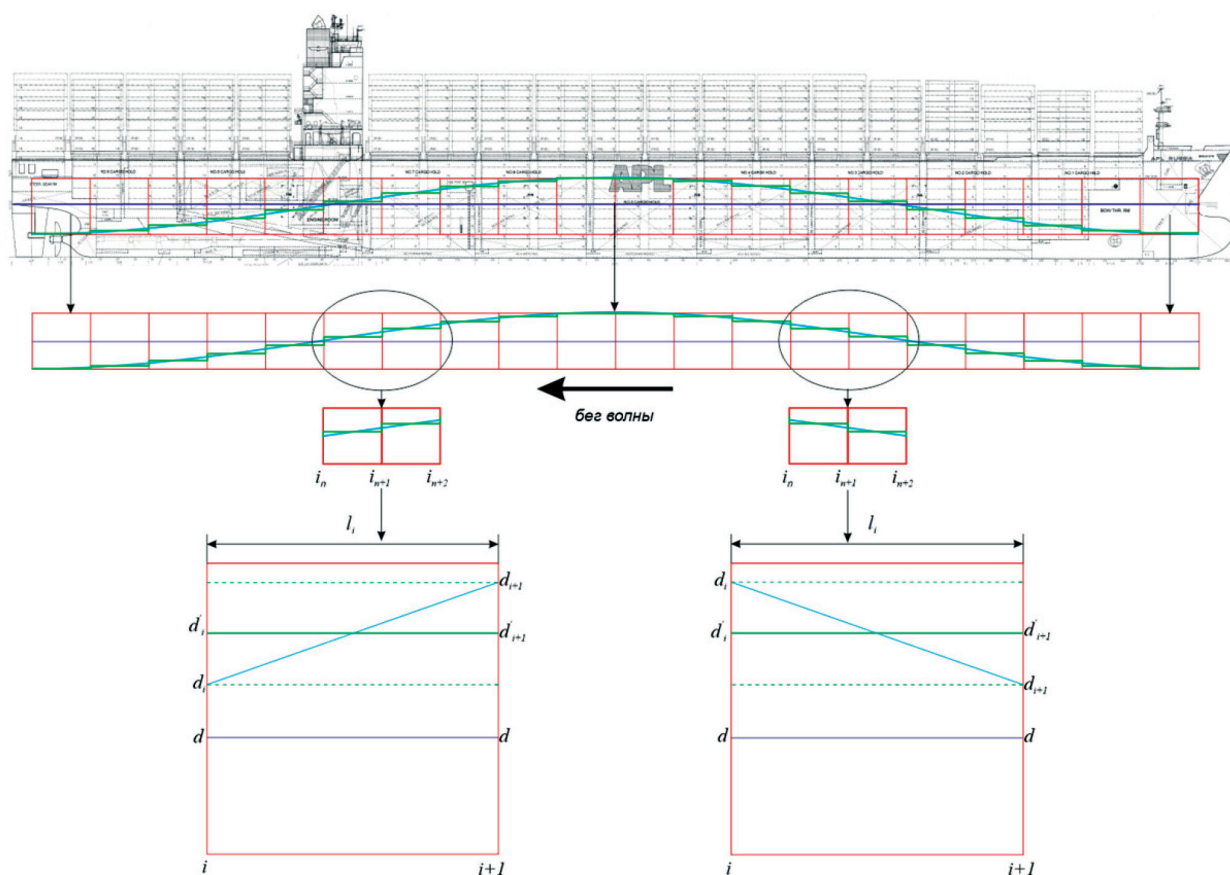


Рис. 4. Ступенчатая аппроксимация волны:

i — номер станции; l_i — длина секции, м, $l_i = 0,05L$;
 d — средняя осадка судна на тихой воде при данной загрузке, м;
 d_i — условно фактическая осадка на станции i , м;
 d'_i — аппроксимированная осадка на станции i , м

Свойства матрицы:

- диагональные элементы матрицы равны амплитуде волны ζ_a ;
- матрица симметрична относительно диагонали: $\zeta_{x_{j,i}} = \zeta_{x_{i,j}}$.

Осадка для каждой станции с учетом прохождения волны определяется по формуле

$$d_i = d + \zeta_{x_{j,i}}. \quad (8)$$

Значения осадок судна на волнении для всех случаев прохождения гребня волны через каждую станцию целесообразно представить в виде матрицы формата 21×21 , где в строках j будет указано последовательное положение гребня волны на каждой станции от 1 до 21, в столбцах i — номер станции от 1 до 21. Такая матрица будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & d_{1,3} & d_{1,4} & d_{1,5} & d_{1,6} & d_{1,7} & d_{1,8} & d_{1,9} & d_{1,10} & d_{1,11} & d_{1,12} & d_{1,13} & d_{1,14} & d_{1,15} & d_{1,16} & d_{1,17} & d_{1,18} & d_{1,19} & d_{1,20} & d_{1,21} \\ \vdots & \vdots \\ d_{11,1} & d_{11,2} & d_{11,3} & d_{11,4} & d_{11,5} & d_{11,6} & d_{11,7} & d_{11,8} & d_{11,9} & d_{11,10} & d_{11,11} & d_{11,12} & d_{11,13} & d_{11,14} & d_{11,15} & d_{11,16} & d_{11,17} & d_{11,18} & d_{11,19} & d_{11,20} & d_{11,21} \\ \vdots & \vdots \\ d_{21,1} & d_{21,2} & d_{21,3} & d_{21,4} & d_{21,5} & d_{21,6} & d_{21,7} & d_{21,8} & d_{21,9} & d_{21,10} & d_{21,11} & d_{21,12} & d_{21,13} & d_{21,14} & d_{21,15} & d_{21,16} & d_{21,17} & d_{21,18} & d_{21,19} & d_{21,20} & d_{21,21} \end{pmatrix}.$$

Каждый из членов матрицы может быть рассчитан по следующей формуле:

$$d_{j,i} = d + \zeta_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi l_i}{\lambda}(j-i)\right). \quad (9)$$

Расчет эквивалентной осадки заключается в определении такой осадки, которая имея одинаковое значение в пределах секции ($d'_i = d'_{i+1}$), заменяла бы собой значения переменных осадок

(d_i и d_{i+1}), обусловленных прохождением волны через данную секцию в данный момент времени (рис. 4). При условии малой амплитуды в пределах секции (ее длина мала по сравнению с длиной волны) графически профиль плоской волны может быть представлен в виде отрезка. Это позволяет принять, что осадка судна на волне в пределах секции изменяется линейно. Тогда эквивалентная осадка для данной секции будет представлять собой среднее значение между значениями осадок на станциях, формирующих данную секцию, или, иначе говоря, эквивалентная осадка будет равна значению условно фактической осадки на середине секции:

$$d'_i = d'_{i+1} = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}, \quad (10)$$

Значения эквивалентных осадок судна на волнении для всех случаев прохождения гребня волны через каждую станцию целесообразно представить в виде матрицы формата 21×20 , где в строках (j) будет указано последовательное положение гребня волны на каждой станции от 1 до 21, в столбцах (i) — номер секции от 1 до 20. Такая матрица будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} d'_{1,1} & d'_{1,2} & d'_{1,3} & d'_{1,4} & d'_{1,5} & d'_{1,6} & d'_{1,7} & d'_{1,8} & d'_{1,9} & d'_{1,10} & d'_{1,11} & d'_{1,12} & d'_{1,13} & d'_{1,14} & d'_{1,15} & d'_{1,16} & d'_{1,17} & d'_{1,18} & d'_{1,19} & d'_{1,20} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d'_{21,1} & d'_{21,2} & d'_{21,3} & d'_{21,4} & d'_{21,5} & d'_{21,6} & d'_{21,7} & d'_{21,8} & d'_{21,9} & d'_{21,10} & d'_{21,11} & d'_{21,12} & d'_{21,13} & d'_{21,14} & d'_{21,15} & d'_{21,16} & d'_{21,17} & d'_{21,18} & d'_{21,19} & d'_{21,20} \end{pmatrix}.$$

Каждый член матрицы может быть рассчитан по следующей формуле:

$$d'_{j,i} = d + \frac{\zeta_a \left(\cos \left(\frac{2\pi l_i}{\lambda} (j-i) \right) + \cos \left(\frac{2\pi l_i}{\lambda} (j-i+1) \right) \right)}{2}, \quad (11)$$

Разница Δd_i между условно фактической осадкой d_i и аппроксимированной осадкой d'_i будет минимальна вблизи гребня и подошвы волны и максимальна в середине склона волны. Чем меньше Δd_i , тем меньше погрешность аппроксимации и наоборот.

Для моделирования формы корпуса судов используется специальное программное обеспечение, в частности отечественная система автоматического проектирования (САПР) КОМПАС-3D [7]. Полученные с использованием подобных программ цифровые модели судов позволяют определять величину площади ватерлинии для заданных условий. Описать форму корпуса судна одним уравнением невозможно ввиду ее сложности. С этой целью приходится применять достаточно сложные аналитические методы [8]. В работе [9] предлагается использование алгебраически заданных гидродинамических поверхностей. В работе [10] предлагается авторская методика обмера корпуса судна, которая применима только для малых судов, но при этом в некотором объеме может использоваться для выполнения замеров по судовым чертежам. Даже для одного заданного значения осадки определить площадь ватерлинии сколько-нибудь пригодным для оперативного практического применения расчетным способом, а тем более простым расчетным способом на волнении затруднительно. Если для фиксированного значения осадки площадь ватерлинии в готовом виде приводится в гидростатических данных судна, то для волнения такие данные можно получить только расчетным путем.

Доступным для практического применения представляется применение коэффициента полноты площади ватерлинии. Площадь ватерлинии на волнении будет определяться как сумма площадей секций ватерлиний, соответствующих осадкам, по которым данная секция погружается в воду при прохождении волны вдоль корпуса судна [2]:

$$S'_{WP} = \sum_{i=1}^{i=20} S_{WP_{d_i}}, \quad (12)$$

где $S_{WP_{d_i}}$ — площадь секции ватерлинии для данной осадки d_i .

В работе [2] предложена формула расчета S_{WP_i} с использованием коэффициента полноты площади секции ватерлинии C_{w_i} :

$$S_{wP_i} = 0,05LBC_{w_i}, \quad (13)$$

где B — ширина судна, м.

Коэффициент полноты площади секции ватерлинии определяется для каждого конкретного судна с использованием его гидростатических характеристик. Секции, расположенные в средней части судна, так называемые *полные секции*, могут иметь коэффициент полноты, равный единице. Для более грубого приближенного расчета могут использоваться средние значения C_{w_i} , полученные по данным контейнеровозов различного тоннажа. Однако, как было установлено в исследовании [2], погрешность таких расчетов может составлять 10 % и более. Тем не менее для общего представления о влиянии волнения на площадь ватерлинии таких приближенных расчетов может быть достаточно.

Результаты (Results)

В настоящей работе исследования проводились на примере крупнотоннажного контейнеровоза вместимостью 8110 ДФЭ. Основные характеристики судна приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики модельного контейнеровоза

Судно (вместимость ДФЭ)	8110
Год постройки	2008
Валовая вместимость	86 692
Дедвейт, т	90 613
Водоизмещение по летнюю марку, т	122 065
Длина наибольшая, м	316,00
Длина между перпендикулярами, м	302,00
Ширина, м	45,60
Летняя осадка, м	14,535

Для расчетов выбраны следующие характеристики волнения: длина $\lambda = 300$ м; высота $h_w = 14,6$ м; максимальный угол волнового склона $\alpha_0 = 8,7^\circ$. Средняя расчетная осадка судна на тихой воде $d_m = 13,0$ м.

Рассматриваются два положения волны вдоль корпуса судна: гребень волны на носовом и кормовом перпендикулярах и гребень волны на мидель-шпангоуте. Это наиболее характерные случаи постановки судна на волну, при которых площадь ватерлинии принимает максимальное и минимальное значение соответственно. Первоначально рассчитываются ординаты волнового профиля по каждой станции в зависимости от положения гребня волны. Результаты представлены в табл. 2. Номера станций в таблице представлены следующим образом: номер станции симметрично мидель-шпангоута (от -10 до $+10$) и порядковый номер (от 1 до 21). Порядковые номера используются для удобства построения матрицы.

Таблица 2

Ординаты волнового профиля

Номер станции / порядковый номер станции	Положение гребня по станциям		
	$-10 / 1$	$0 / 11$	$10 / 21$
	Ордината волны, м		
$-10 / 1$	7,3	$-7,3$	7,3
$-9 / 2$	6,9	$-6,9$	6,9
$-8 / 3$	5,9	$-5,9$	5,9
$-7 / 4$	4,3	$-4,3$	4,3
$-6 / 5$	2,3	$-2,3$	2,3
$-5 / 6$	0,0	0,0	0,0
$-4 / 7$	$-2,3$	2,3	$-2,3$
$-3 / 8$	$-4,3$	4,3	$-4,3$
$-2 / 9$	$-5,9$	5,9	$-5,9$

Таблица 2
 (Окончание)

–1 / 10	–6,9	6,9	–6,9
0 / 11	–7,3	7,3	–7,3
1 / 12	–6,9	6,9	–6,9
2 / 13	–5,9	5,9	–5,9
3 / 14	–4,3	4,3	–4,3
4 / 15	–2,3	2,3	–2,3
5 / 16	0,0	0,0	0,0
6 / 17	2,3	–2,3	2,3
7 / 18	4,3	–4,3	4,3
8 / 19	5,9	–5,9	5,9
9 / 20	6,9	–6,9	6,9
10 / 21	7,3	–7,3	7,3

Полученные результаты интерпретируются следующим образом: при положении гребня волны на станции –10 — кормовой перпендикуляр, на станции –8 высота волнового профиля составит 5,9 м, на станции 6 высота волнового профиля составит 2,3 м; при положении гребня волны на станции 0 — мидель-шпангоут, на станции –3 высота волнового профиля составит 4,3 м, на станции 9 высота волнового профиля составит –6,9 м.

Примечание. Знак «минус» для ординаты волнового профиля означает, что она находится ниже нулевого уровня, соответствующего тихой воде.

Пример расчета ординаты волны на станции –6 / 5 при положении гребня волны на станции –10 / 1:

$$\zeta_{x_{j,i}} = \zeta_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi l_i}{\lambda}(j-i)\right) = 7,3 \cos\left(\frac{2 \cdot 3,1415 \cdot 15,1}{300}(1-5)\right) = 2,3.$$

Итоговая матрица полученных результатов будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 7,3 & 6,9 & 5,9 & 4,3 & 2,3 & 0,0 & -2,3 & -4,3 & -5,9 & -6,9 & -7,3 & -6,9 & -5,9 & -4,3 & -2,3 & 0,0 & 2,3 & 4,3 & 5,9 & 6,9 & 7,3 \\ \vdots & \vdots \\ -7,3 & -6,9 & -5,9 & -4,3 & -2,3 & 0,0 & 2,3 & 4,3 & 5,9 & 6,9 & 7,3 & 6,9 & 5,9 & 4,3 & 2,3 & 0,0 & -2,3 & -4,3 & -5,9 & -6,9 & -7,3 \\ \vdots & \vdots \\ 7,3 & 6,9 & 5,9 & 4,3 & 2,3 & 0,0 & -2,3 & -4,3 & -5,9 & -6,9 & -7,3 & -6,9 & -5,9 & -4,3 & -2,3 & 0,0 & 2,3 & 4,3 & 5,9 & 6,9 & 7,3 \end{pmatrix}.$$

Затем рассчитывается осадка на каждой станции с учетом прохождения волны. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Осадка на волнении

Номер станции / порядковый номер станции	Положение гребня по станциям		
	–10 / 1	0 / 11	10 / 21
	Осадка, м		
–10 / 1	20,3	5,7	20,3
–9 / 2	19,9	6,1	19,9
–8 / 3	18,9	7,1	18,9
–7 / 4	17,3	8,7	17,3
–6 / 5	15,3	10,7	15,3
–5 / 6	13,0	13,0	13,0
–4 / 7	10,7	15,3	10,7
–3 / 8	8,7	17,3	8,7
–2 / 9	7,1	18,9	7,1
–1 / 10	6,1	19,9	6,1
0 / 11	5,7	20,3	5,7
1 / 12	6,1	19,9	6,1
2 / 13	7,1	18,9	7,1

Таблица 3
(Окончание)

3 / 14	8,7	17,3	8,7
4 / 15	10,7	15,3	10,7
5 / 16	13,0	13,0	13,0
6 / 17	15,3	10,7	15,3
7 / 18	17,3	8,7	17,3
8 / 19	18,9	7,1	18,9
9 / 20	19,9	6,1	19,9
10 / 21	20,3	5,7	20,3

Полученные результаты интерпретируются следующим образом: при положении гребня волны на станции –10 — кормовой перпендикуляр, на станции –8 осадка составит 18,9 м, на станции 6 осадка составит 15,3 м; при положении гребня волны на станции 0 — мидель-шпангоут, на станции –3 осадка составит 17,3 м, на станции 9 — 6,1 м.

Пример расчета ординаты волны на станции –6 / 5 при положении гребня волны на станции –10 / 1:

$$d_{j,i} = d + \zeta_a \cdot \cos\left(\frac{2\pi l_i}{\lambda}(j-i)\right) =$$

$$= 13,0 + 7,3 \cos\left(\frac{2 \cdot 3,1415 \cdot 15,1}{300}(1-5)\right) = 13,0 + 2,3 = 15,3.$$

Итоговая матрица полученных результатов будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 20,3 & 19,9 & 18,9 & 17,3 & 15,3 & 13,0 & 10,7 & 8,7 & 7,1 & 6,1 & 5,7 & 6,1 & 7,1 & 8,7 & 10,7 & 13,0 & 15,3 & 17,3 & 18,9 & 19,9 & 20,3 \\ \vdots & \vdots \\ 5,7 & 6,1 & 7,1 & 8,7 & 10,7 & 13,0 & 15,3 & 17,3 & 18,9 & 19,9 & 20,3 & 19,9 & 18,9 & 17,3 & 15,3 & 13,0 & 10,7 & 8,7 & 7,1 & 6,1 & 5,7 \\ \vdots & \vdots \\ 20,3 & 19,9 & 18,9 & 17,3 & 15,3 & 13,0 & 10,7 & 8,7 & 7,1 & 6,1 & 5,7 & 6,1 & 7,1 & 8,7 & 10,7 & 13,0 & 15,3 & 17,3 & 18,9 & 19,9 & 20,3 \end{pmatrix}.$$

Затем рассчитывается эквивалентная осадка в секциях с учетом прохождения волны вдоль корпуса судна. Результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4

Эквивалентная осадка в секциях

Номер секции	Положение гребня по станциям		
	–10 / 1	0 / 11	10 / 21
	Эквивалентная осадка, м		
1	20,1	5,9	20,1
2	19,4	6,6	19,4
3	18,1	7,9	18,1
4	16,3	9,7	16,3
5	14,1	11,9	14,1
6	11,9	14,1	11,9
7	9,7	16,3	9,7
8	7,9	18,1	7,9
9	6,6	19,4	6,6
10	5,9	20,1	5,9
11	5,9	20,1	5,9
12	6,6	19,4	6,6
13	7,9	18,1	7,9
14	9,7	16,3	9,7
15	11,9	14,1	11,9
16	14,1	11,9	14,1
17	16,3	9,7	16,3

Таблица 4
(Окончание)

18	18,1	7,9	18,1
19	19,4	6,6	19,4
20	20,1	5,9	20,1

Полученные результаты интерпретируются следующим образом: при положении гребня волны на станции –10 / 1 кормовой перпендикуляр, в секции 3 эквивалентная осадка составит 18,1 м, в секции 15 — 11,9 м; при положении гребня волны на станции 0 / 11 (мидель-шпангоут) в секции 3 эквивалентная осадка составит 7,9 м, в секции 15 — 14,1 м.

Пример расчета эквивалентной осадки секции 3 при положении гребня волны на станции –10 / 1:

$$d'_{j,i} = d + \frac{\zeta_a \left(\cos \left(\frac{2\pi l_i}{\lambda} (j-i) \right) + \cos \left(\frac{2\pi l_i}{\lambda} (j-i_{+1}) \right) \right)}{2} =$$

$$= 13,0 + \frac{7,3 \left(\cos \frac{2 \cdot 3,1415 \cdot 15,1}{300} (1-3) + \cos \left(\frac{2 \cdot 3,1415 \cdot 15,1}{300} (1-4) \right) \right)}{2} =$$

$$= 13,0 + \frac{7,3(0,80902 + 0,58779)}{2} = 18,1.$$

Итоговая матрица полученных результатов будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 20,1 & 19,4 & 18,1 & 16,3 & 14,1 & 11,9 & 9,7 & 7,9 & 6,6 & 5,9 & 5,9 & 6,6 & 7,9 & 9,7 & 11,9 & 14,1 & 16,3 & 18,1 & 19,4 & 20,1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 5,9 & 6,6 & 7,9 & 9,7 & 11,9 & 14,1 & 16,3 & 18,1 & 19,4 & 20,1 & 20,1 & 19,4 & 18,1 & 16,3 & 14,1 & 11,9 & 9,7 & 7,9 & 6,6 & 5,9 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 20,1 & 19,4 & 18,1 & 16,3 & 14,1 & 11,9 & 9,7 & 7,9 & 6,6 & 5,9 & 5,9 & 6,6 & 7,9 & 9,7 & 11,9 & 14,1 & 16,3 & 18,1 & 19,4 & 20,1 \end{pmatrix}.$$

Разница Δd_i между условно фактической осадкой d_i и аппроксимированной осадкой d'_i принимает значения 0,2–1,1 м со средним значением 0,7 м.

Для расчета площадей секций ватерлинии с использованием построечных чертежей судна были сформированы профили ватерлинии для всех значений осадок, приведенных в табл. 4. Графически полученные результаты приведены на рис. 5.

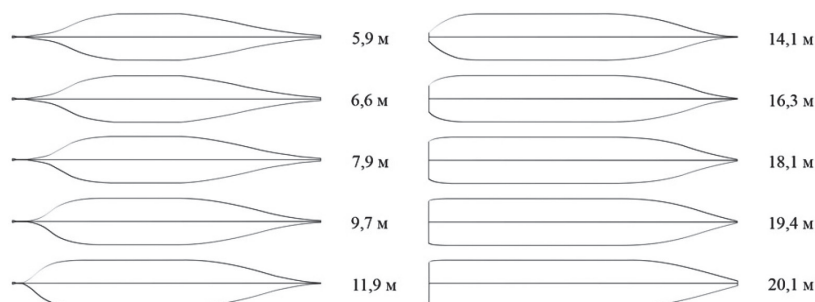


Рис. 5. Профили ватерлиний для расчетных осадок на волнении

Рассмотрены два наиболее характерных сценария постановки судна на волну:

Сценарий 1 — оконечности судна находятся на гребнях соседних волн, мидель-шпангоут судна находится на подошве волны. Благоприятный сценарий с точки зрения обеспечения остойчивости.

Сценарий 2 — оконечности судна находятся на подошвах соседних волн, мидель-шпангоут судна находится на гребне волны. Неблагоприятный сценарий с точки зрения обеспечения остойчивости.

Результаты расчета площади ватерлинии для сценариев 1 и 2 приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 5

Площадь ватерлинии на волнении (сценарий 1)

Номер секции	Осадка d'_i	Коэффициент полноты C_{w_i}	Площадь секции $S_{wP_{i_d}}$, м ²
1	20,1	0,987	679,61
2	19,4	1,000	688,56
3	18,1	1,000	688,56
4	16,3	1,000	688,56
5	14,1	1,000	688,56
6	11,9	1,000	688,56
7	9,7	1,000	688,56
8	7,9	1,000	688,56
9	6,6	1,000	688,56
10	5,9	1,000	688,56
11	5,9	1,000	688,56
12	6,6	0,966	665,15
13	7,9	0,907	624,52
14	9,7	0,853	587,34
15	11,9	0,763	525,37
16	14,1	0,690	475,11
17	16,3	0,560	385,59
18	18,1	0,440	302,97
19	19,4	0,360	247,88
20	20,1	0,195	134,27
Итого площадь ватерлинии на волнении, м ²			11513,41

Таблица 6

Площадь ватерлинии на волнении (сценарий 2)

Номер секции	Осадка d'_i	Коэффициент полноты C_{w_i}	Площадь секции $S_{wP_{i_d}}$, м ²
1	5,9	0,013	8,95
2	6,6	0,066	45,44
3	7,9	0,252	173,52
4	9,7	0,740	509,53
5	11,9	0,998	687,18
6	14,1	1,000	688,56
7	16,3	1,000	688,56
8	18,1	1,000	688,56
9	19,4	1,000	688,56
10	20,1	1,000	688,56
11	20,1	1,000	688,56
12	19,4	1,000	688,56
13	18,1	0,997	686,49
14	16,3	0,965	664,46
15	14,1	0,840	578,39
16	11,9	0,607	417,96
17	9,7	0,398	274,05
18	7,9	0,239	164,57
19	6,6	0,155	106,73
20	5,9	0,085	58,53
Итого площадь ватерлинии на волнении, м ²			9195,72

Для упрощенного варианта расчета площади ватерлинии на волнении, при котором используются две эквивалентные осадки (максимальная и минимальная), получены следующие результаты:

- для осадки 5,9 м площадь ватерлинии составляет 8027,92 м²;
- для осадки 20,1 м площадь ватерлинии составляет 12323,16 м².

Точность расчета площадей ватерлинии через сумму площадей секций по сравнению с фактическими значениями, приведенными в гидростатических характеристиках судна, показана в табл. 7.

Таблица 7

Точность определения площади ватерлинии через площади ее секций

Осадка, м	Расчетная площадь ватерлинии, м ²	Фактическая площадь ватерлинии, м ²	Абсолютная погрешность, м ²	Относительная погрешность, %
5,9	8027,92	8010,70	17,22	0,21
6,6	8202,82	8217,80	–14,98	–0,18
7,9	8559,49	8583,40	–23,91	–0,28
9,7	9046,99	9081,10	–34,11	–0,38
11,9	9803,72	9794,10	9,62	0,10
14,1	10685,07	10702,80	–17,73	–0,17
16,3	11342,65	11388,50	–45,85	–0,40
18,1	11819,13	11871,30	–52,17	–0,44
19,4	12120,72	12143,10	–22,38	–0,18
20,1	12323,16	12367,50	–44,34	–0,36

Приведенные в таблице результаты демонстрируют высокую точность расчетов при относительной погрешности во всех рассмотренных случаях менее 0,5 %. Это дает основание утверждать, что предложенная упрощенная методика расчета площади ватерлинии контейнеровоза на волнении может применяться на практике.

Заключение (Conclusion)

В рамках проведенного исследования предложен и апробирован метод ступенчатой аппроксимации волнового профиля для упрощенного расчета площади ватерлинии крупнотоннажного контейнеровоза на волнении. Разработанный подход, основанный на использовании коэффициентов полноты секций ватерлинии, позволяет с достаточной для практических целей точностью оценивать изменение этой ключевой гидростатической характеристики в зависимости от положения волны вдоль корпуса судна.

Для апробации предложенной методики были сформированы профили ватерлиний модельного контейнеровоза на основе более 700 замеров параметров корпуса на построечных чертежах. Последующие расчеты, проведенные для двух наиболее характерных сценариев постановки судна на волну, подтвердили работоспособность, эффективность и достаточную точность метода, основное преимущество которого заключается в существенном упрощении вычислений, что делает возможным их выполнение судоводителями непосредственно в условиях эксплуатации судна для оперативной оценки влияния волнения на остойчивость. К недостаткам метода можно отнести трудоемкость работы, заключающуюся в большом объеме предварительных замеров и вычислений. Однако эта работа может быть частично автоматизирована, выполняться один раз в офисе судоходной компании и передаваться на судно для последующего оперативного использования судоводителями.

Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, направленных на анализ воздействия на судно волн опасных длин, не равных длине корпуса, а также на количественную оценку изменения параметров остойчивости, а именно метацентрической высоты, в зависимости от изменения площади ватерлинии. Таким образом, внедрение предложенной методики в практику судовождения и ее последующее развитие будут способствовать более глубокому пониманию судоводителями поведения судна на волнении и, как следствие, повышению уровня безопасности судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбаев Д. А. Определение равнообъемных ватерлиний и плеч остойчивости судна с использованием систем CAD / Д. А. Альбаев, В. В. Лобанов, Е. А. Михайлова, В. Ю. Семенова // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2024. — № 4(12). — С. 8–14. — EDN AJJXVM.
2. Царик Р. С. Анализ конструктивных и гидростатических характеристик судов-контейнеровозов в контексте их изменения на продольном волнении / Р. С. Царик // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 567–583. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-567-583. — EDN PVESCI.
3. Кочнев Ю. А. Диаграмма статической остойчивости судна находящегося в условиях волнения / Ю. А. Кочнев // Научные проблемы водного транспорта. — 2021. — № 66. — С. 36–42. DOI: 10.37890/jwt.vi66.159. — EDN WMHTNE.
4. Сичкарев В. И. Пути оптимизации судоводительских решений плавания на волнении / В. И. Сичкарев, В. П. Умрихин // Актуальные вопросы проектирования, постройки и эксплуатации морских судов и сооружений: труды региональной научно-практической конференции, Севастополь, 29–30 ноября 2018 года. — Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», 2019. — С. 301–309. — EDN ZFBTBR.
5. Petacco N. Second Generation Intact Stability criteria: Analysis, Implementation and Applications to significant ship typologies / N. Petacco. — Genova: Universita degli studi di Genova, 2019. — 209 p.
6. Царик Р. С. Учет и оценка влияния фактической аппликаты центра тяжести груза на безопасность эксплуатации контейнеровоза: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение»/ Р. С. Царик. — Владивосток: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2022. — EDN MPZDYV.
7. Рыченкова А. Ю. Геометрическое моделирование и оценка качества каркасной поверхности корпуса судна в САПР Компас-3D / А. Ю. Рыченкова, Е. С. Клименко, Л. Н. Бородин // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 62. — С. 81–90. DOI: 10.37890/jwt.vi62.49. — EDN TMZEVE.
8. Готман А. Ш. Аналитическое задание поверхности корпуса корабля произвольной формы / А. Ш. Готман // Морской вестник. — 2010. — № 1(33). — С. 81–85. — EDN KZZNCJ.
9. Кривошапко С. Н. Алгебраические поверхности для рациональных судовых корпусов / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов // Технология машиностроения. — 2022. — № 3. — С. 17–24. — EDN NOFVRU.
10. Новиков В. В. Построение судовой поверхности по замерам обводов корпуса с натуры / В. В. Новиков, С. В. Антоненко, М. В. Китаев // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2016. — № 3(28). — С. 15–22. — EDN WKUTQH.

REFERENCES

1. Al'baev, D. A., V. V. Lobanov, E. A. Mikhaylova and V. Yu. Semenova. "Determination of equal-volume waterlines and lever of stability of a ship using CAD-systems." *Transactions of The St. Petersburg State Marine Technical University* 4(12) (2024): 8–14.
2. Tsarik, R. S. "Analysis of the structural and hydrostatic characteristics of container ships in the context of their changes in longitudinal waves." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 17.4 (2025): 567–583. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-567-583.
3. Kochnev, Yu. A. "Diagrams of static stability of a ship in rough conditions." *Russian Journal of Water Transport* 66 (2021): 36–42. DOI: 10.37890/jwt.vi66.159.
4. Sichkarev, V. I. and V. P. Umrikhin. "Puti optimizatsii sudovoditel'skikh resheniy plavaniya na volnenii." *Aktual'nye voprosy proektirovaniya, postroyki i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzheniy: trudy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sevastopol', 29–30 noyabrya 2018 goda. Sevastopol': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sevastopol'skiy gosudarstvennyy universitet"*, 2019: 301–309.
5. Petacco, N. *Second Generation Intact Stability criteria: Analysis, Implementation and Applications to significant ship typologies*. Genova: Universita degli studi di Genova, 2019: 209 p.
6. Tsarik, R. S. *Uchet i otsenka vliyaniya fakticheskoy applikaty tsentra tyazhesti gruzha na bezopasnost' ekspluatatsii konteynerovoza*. PhD diss. Vladivostok, 2022.

7. Rychenkova, A. Yu., E. S. Klimenko and L. N. Borodina. “Geometric modeling and quality assessment of the hull frame surface in COMPASS-3D CAD.” *Russian Journal of Water Transport* 62 (2020): 81–90. DOI: 10.37890/jwt.vi62.49.
8. Gotman, A. Sh. “Analytical random shaping of a ship hull.” *Morskoy Vestnik* 1(33) (2010): 81–85.
9. Krivoshapko, S. N. and V. N. Ivanov. “Algebraicheskie poverkhnosti dlya ratsional’nykh sudovykh korpusov.” *Tekhnologiya mashinostroeniya* 3 (2022): 17–24.
10. Novikov, V. V., S. V. Antonenko and M. V. Kitaev. “Creating a ship surface from measurements contours of the hull from nature.” *Fefu: School of Engineering Bulletin* 3(28) (2016): 15–22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Царик Руслан Станиславович —
кандидат технических наук, капитан
ФГБОУ ВО «Морской государственный
университет имени адмирала Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация, Владивосток, ул.
Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: tsarik@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tsarik, Ruslan Stanislavovich —
PhD in Technical Sciences, Master mariner
Admiral Nevelskoy Maritime State University
50a Verkhneportovaya Str.,
Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: tsarik@msun.ru

Статья поступила в редакцию 9 октября 2025 г.
Received: October 9, 2025.