

ANALYSIS OF THE STRUCTURAL AND HYDROSTATIC CHARACTERISTICS OF CONTAINER SHIPS IN THE CONTEXT OF THEIR CHANGES IN LONGITUDINAL WAVES

R. S. Tsarik

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

This paper is devoted to the analysis of the structural and hydrostatic characteristics of container ships in the context of their changes in longitudinal waves. It is noted that the structural and hydrostatic characteristics of container ships have their own specifics, due, in particular, to the economic optimization of container transportation, and directly affect the behavior of the ship in waves. These specifics should be considered by navigators when calculating and monitoring stability during the voyage. It is emphasized that the hydrostatic characteristics of a ship in waves are constantly changing, and their consideration is a difficult task. Currently, no practical solution to this problem has been proposed. The passage of a wave along the hull of a ship assumes that different parts of it will have different draughts at different times. Based on this, this paper examines the variation and dependence of ship characteristics for different draughts. The waterline area and its completeness coefficients are considered as one of the most important parameters. To calculate them in waves, a technique is proposed, which consists in dividing the waterline into sections and determining the area of each section, taking into account its completeness coefficient, depending on the draught. Calculations performed using the characteristics of existing container ships of different tonnages have shown the dependencies and relations between such structural and hydrostatic characteristics of container ships as hull shape, relations between linear dimensions, draught, block coefficient and waterline area coefficient. It is noted that further research based on the results obtained in this work can form the basis for the development of a methodology for considering the parameters of a container ship in waves, suitable for use by navigators in practice. This will certainly contribute to improving the safety of operation of container ships.

Keywords: container ship, structural and hydrostatic characteristics, stability, waterplane area, completeness coefficient, waves, ship's rolling.

For citation:

Tsarik, Ruslan 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 imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 567–583. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-567-583.

УДК 656.61.052

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ И ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВ-КОНТЕЙНЕРОВОЗОВ В КОНТЕКСТЕ ИХ ИЗМЕНЕНИЯ НА ПРОДОЛЬНОМ ВОЛНЕНИИ

Р. С. Царик

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

Выполнен анализ конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровозов в контексте их изменения на продольном волнении. Отмечается, что конструктивные и гидростатические характеристики контейнеровозов имеют свою специфику, обусловленную, в частности, экономической оптимизацией перевозки контейнеров, и оказывают непосредственное влияние на поведение судна на волнении. Отмечается, что эти особенности должны учитываться судоводителями при расчетах и контроле остойчивости в процессе выполнения рейса. Подчеркивается, что гидростатические характеристики судна на волнении постоянно изменяются, а их учет представляет собой сложную задачу. Решения этой задачи, пригодного для практического применения, в настоящее время нет. Прохождение волны вдоль корпуса судна предполагает, что различные его части в разное время будут иметь разную осадку. Исходя

из этого в настоящей работе исследуется изменение и зависимость характеристик судна для разных осадок. В качестве важнейших параметров рассмотрена площадь ватерлинии и коэффициенты ее полноты. Для их расчета на волнении предложена методика, которая заключается в разбиении ватерлинии на секции и определении площади каждой из них с учетом ее коэффициента полноты, зависящего от осадки. Расчеты, выполненные с использованием характеристик действующих контейнеровозов разного тоннажа, показали зависимости и соотношения между такими конструктивными и гидростатическими характеристиками контейнеровозов, как обводы корпуса, соотношения линейных характеристик, осадка, коэффициент общей полноты и коэффициент полноты площади ватерлинии. Отмечается, что дальнейшие исследования на основе полученных в настоящей работе результатов, могут служить основой разработки методики учета параметров контейнеровоза на волнении, пригодной для применения судоводителями на практике, что, безусловно, будет способствовать повышению безопасности эксплуатации судов-контейнеровозов.

Ключевые слова: суда-контейнеровозы, конструктивные и гидростатические характеристики, остойчивость, площадь ватерлинии, коэффициент полноты, волнение, качка судна.

Для цитирования:

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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 567–583. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-567-583. — EDN PVESCI.

Введение (Introduction)

Конструктивные и гидростатические характеристики судов-контейнеровозов определяют их остойчивость и поведение на волнении. Особенность этих характеристик заключается в специфических обводах корпуса и соотношении различных конструктивных параметров. Знание и правильная интерпретация конструктивных и гидростатических характеристик судна в значительной мере способствуют безопасной эксплуатации судна в целом и обеспечению безопасного плавания на волнении в частности.

Одним из наиболее значимых является вопрос обеспечения безопасности контейнеровозов на продольном волнении в контексте резонансной качки. Однако его исследования часто ограничиваются учетом соотношения длины судна и волны, и их влияния на остойчивость и параметры качки судна. Вместе с тем вопрос определения и последующего анализа влияния конструктивных и гидростатических характеристик судна на его поведение на волнении изучен недостаточно. Обычно такие исследования носят сугубо теоретический характер, выражающийся в применении достаточно сложного научного аппарата, что затрудняет использование полученных результатов судоводителями на практике.

Целью настоящей работы является анализ конструктивных и гидростатических характеристик судов-контейнеровозов, их особенностей и соотношений для последующего применения полученных данных при оценке и контроле судоводителями поведения судна на волнении. Для этого в работе были использованы характеристики действующих судов-контейнеровозов разного тоннажа, представленные в построечных чертежах, информации об остойчивости и других судовых документах, применяемых судоводителями на практике.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Терминологический аппарат, используемый для анализа характеристики судов. Под конструктивными характеристиками подразумеваются все характеристики судна, в частности линейные размеры, и их соотношения, формирующие форму его корпуса и обуславливающие ее особенности. Под гидростатическими характеристиками подразумеваются характеристики судна, указанные в разделе «Гидростатические характеристики» в «Информации об остойчивости судна», в частности коэффициенты полноты. Эти характеристики очень тесно взаимосвязаны и в некоторых случаях могут относиться как к одному, так и к другому термину.

Полнота обводов корпуса судна характеризуется различными коэффициентами полноты, среди которых выделяют основные: коэффициент общей полноты, коэффициент полноты площади

ватерлинии и коэффициент полноты подводной части мидель-шпангоута. Корпус контейнеровоза имеет полную среднюю часть и острые носовую и кормовую части (рис. 1). Коэффициенты полноты корпуса контейнеровоза относительно малы по сравнению с такими типами судов, как танкер или балкер сопоставимого тоннажа. Это, в частности, обусловлено экономической оптимизацией контейнерных перевозок, когда форма корпуса судна проектируется таким образом, чтобы минимизировать сопротивление воды, обеспечив максимальную скорость судна при проектной мощности главного двигателя.

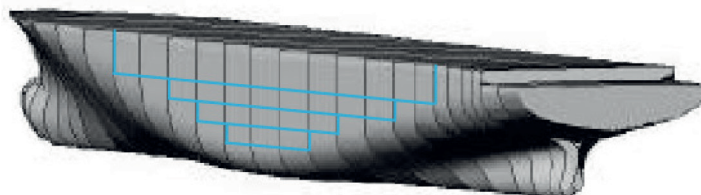


Рис. 1. Обводы корпуса контейнеровоза

С точки зрения обеспечения остойчивости судна на волнении одной из важнейших конструктивных характеристик является *площадь его ватерлинии*, характеризующаяся таким параметром, как *коэффициент полноты площади ватерлинии* (C_w). Данный параметр приводится в гидростатических характеристиках судна в составе информации об остойчивости и зависит от осадки.

На примере контейнеровоза вместимостью 8110 ДФЭ (двадцатифутовый эквивалент) на рис. 2 показано сечение судна по нескольким бортовым стрингерам.

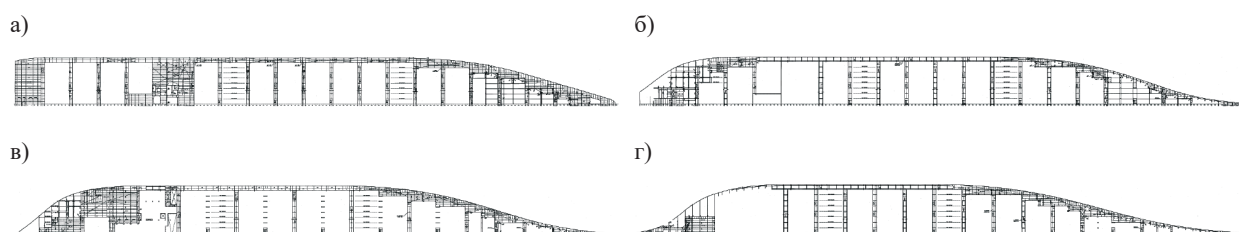


Рис. 2. План палуб контейнеровоза (8110 ДФЭ):

- a* — главная палуба (20,3 м от основной плоскости);
- б* — 11-й бортовой стрингер (15,2 м от основной плоскости);
- в* — 14-й бортовой стрингер (12,5 м от основной плоскости);
- г* — 17-й бортовой стрингер (10,0 м от основной плоскости)

Коэффициент C_w определяется отношением площади ватерлинии для данной осадки к площади прямоугольника со сторонами, равными длине судна между перпендикулярами L и ширине судна B . Площадь ватерлинии и, соответственно, коэффициент C_w уменьшаются с уменьшением осадки.

Поскольку площадь ватерлинии непосредственно зависит от ширины судна, следует учитывать влияние коэффициента полноты подводной части мидель-шпангоута (C_m). В рамках настоящего исследования вызывает интерес не только коэффициент полноты C_m , но и коэффициенты полноты подводной части других шпангоутов судна (C_{m_i}), определяемых отношением площади поперечного сечения по данному шпангоуту к площади прямоугольника со сторонами, равными ширине судна B и текущей осадке d (рис. 3).

Плавание судна на волнении предполагает постоянное изменение его гидростатических и гидродинамических характеристик [1]. Учет волнения на судне обычно осуществляется глазомерно и не отличается большой точностью. Разрабатываемые для оценки волнения технологии физические устройства на их основе и программное обеспечение еще не получили широкого практического применения [2]. На тихой воде определение площади ватерлинии не представляет сложности, поскольку осадка судна изменяется незначительно. В этом случае площадь ватерлинии можно выбирать из гидростатических таблиц по величине средней осадки с учетом дифферента судна.

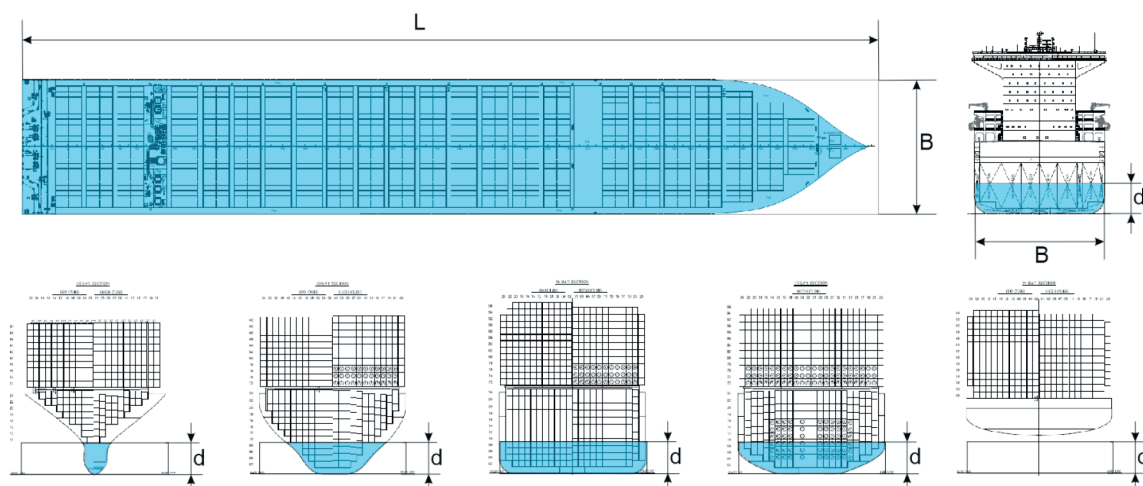


Рис. 3. Графическое определение коэффициентов полноты $C_{\text{пр}}$, C_m и C_{m_i}

Особый интерес представляют исследования, направленные на математическое выражение погруженной в воду части корпуса судна [3–5], однако в этих работах изменение рассчитываемых параметров на волнении не рассматривается. При движении судна на волнении определение площади ватерлинии является сложной задачей [6–8]. Это объясняется тем, что погруженная в воду часть корпуса постоянно изменяется. В этом смысле любопытным является исследование, выполненное в работе [9], в котором авторы предлагают свой способ определения момента инерции площади ватерлинии на волнении. Последующая оценка остойчивости судоводителем на практике также может вызвать затруднения [10, 11]. Попытка изложения методики оценки остойчивости на волнении в доступном для судоводителя виде предпринята в работе [12].

С точки зрения вероятности потери остойчивости и попадания в резонансную качку для контейнеровозов наиболее опасным является продольное или близкое к нему волнение как с носовых, так и с кормовых курсовых углов. Поэтому в настоящей работе учитывается именно *продольное волнение*.

Прохождение волн вдоль корпуса судна рассматривается исходя из того, что длина судна между перпендикулярами равномерно делится теоретическими шпангоутами (станциями), общее количество которых составляет 21, на теоретические шпации (секции)¹. При этом нулевая станция находится на мидель-шпангоуте (рис. 4), а счет секций ведется с кормы в нос (рис. 5).

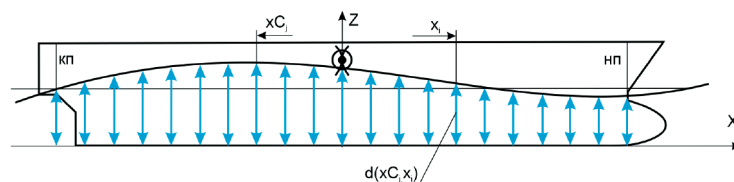


Рис. 4. Позиционирование волны относительно корпуса судна

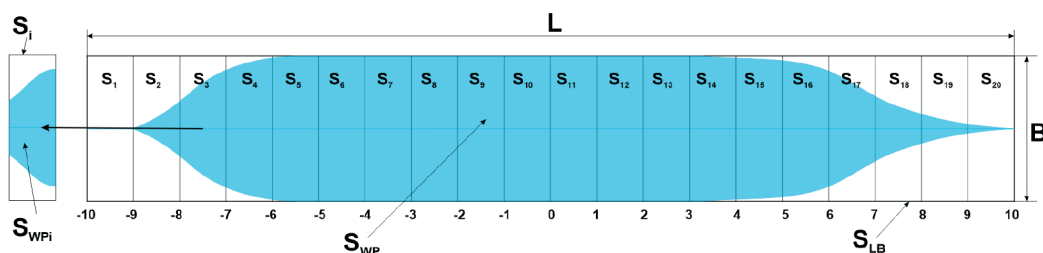


Рис. 5. Номенклатура используемых обозначений

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

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 d_m — средняя осадка судна на тихой воде, м;

h_w — высота волны, м;

λ — длина волны, м;

x_i — абсцисса станции i , м;

x_{Cj} — абсцисса гребня волны, м.

В процессе исследования характеристик судна на волнении возникает необходимость определения площади ватерлинии с учетом прохождения волны вдоль корпуса судна. Это предполагает определение расчетной площади ватерлинии (S'_{WP}) как суммы площадей секций (S_{WP_i}), заключенных между соседними станциями:

$$S'_{WP} = \sum_{i=1}^{i=20} S_{WP_i}. \quad (2)$$

Первоначально необходимо определить, какую долю общей площади занимает каждая секция ватерлинии на спокойной воде. При этом необходимо выделить следующие аспекты:

1. Площадь секции и ее доля от общей площади ватерлинии изменяется в зависимости от осадки.

2. Несколько центральных секций имеют одинаковую площадь для данной осадки, и, соответственно, одинаковую долю от общей площади. Эти секции в данной работе называются *полными секциями*.

3. Полные секции, полнота которых сохраняется для всех осадок судна, формируют цилиндрическую вставку корпуса судна.

Готовых данных о площади каждой секции не существует. Поэтому они могут быть получены только расчетным путем. С этой целью в настоящей работе вводится понятие *коэффициента полноты площади секции ватерлинии* (C_{w_i}). Тогда площадь секции ватерлинии может быть рассчитана по формуле

$$S_{WP_i} = 0,05LBC_{w_i}, \quad (3)$$

причем C_{w_i} может выбираться как среднее значение, полученное в результате обработки гидростатических данных конкретного контейнеровоза или нескольких контейнеровозов. Коэффициент полноты площади полной секции, очевидно, равен единице.

Поскольку на волнении у каждой секции ватерлинии будет своя осадка, доля площади секции ватерлинии должна определяться в зависимости от площади ватерлинии судна для соответствующей осадки. Так, например, если с учетом прохождения волны вдоль корпуса судна секция 3 будет погружена в воду до осадки 15,0 м, то ее долю необходимо определять от ватерлинии судна, соответствующей 15,0 м. Доля соседней секции 4, погруженной до осадки 13 м, должна определяться от площади ватерлинии судна, соответствующей 13 м. Тогда формулу (2) можно записать следующим образом:

$$S'_{WP} = \sum_{i=1}^{i=20} S_{WP_{id}}, \quad (4)$$

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

Важным является определение количества полных секций для соответствующей осадки. Как показано на рис. 1, количество полных секций возрастает с увеличением осадки. Оно минимально на уровне плоскости киля и максимально на уровне главной палубы. Схематически распределение полных секций показано на рис. 6 в виде выделенной фоном зоны. При этом можно отметить, что цилиндрическая вставка корпуса судна формируется минимальным количеством

полных секций, которые имеются на уровне основной плоскости. На рис. 6 цилиндрическая вставка контейнеровоза формируется секциями 7–13 ($S_1...S_{20}$).

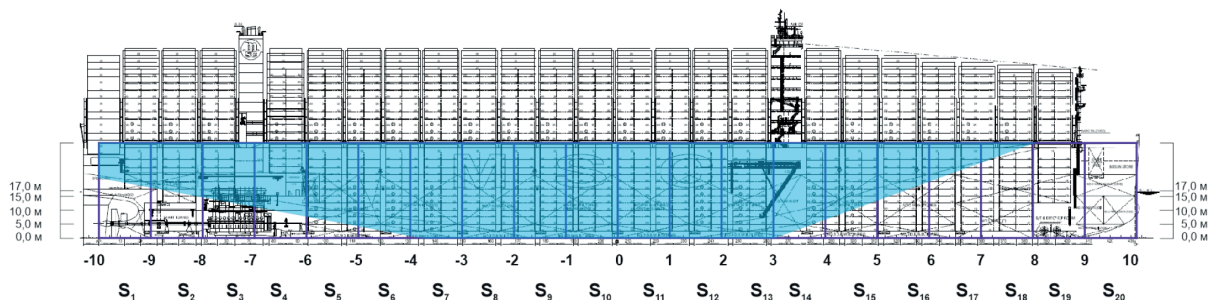


Рис. 6. Распределение полных секций по осадкам на примере контейнеровоза 24116

Для анализа особенностей конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровозов была выполнена серия масштабных измерений и расчетов.

Результаты (Results)

В настоящей работе исследования проводились на примере среднетоннажных и крупнотоннажных контейнеровозов, включая ультрабольшие. Основные характеристики судов приведены в табл. 1. Каждый контейнеровоз идентифицирован по его контейнеровместимости. Например, контейнеровоз 8110 означает контейнеровоз с контейнеровместимостью 8110 ДФЭ.

Таблица 1

Основные характеристики модельных контейнеровозов

Судно (вместимость ДФЭ)	3600	4200	4646	6724	8110	20170	24116
Год постройки	2013	2009	2003	2010	2008	2017	2023
Валовая вместимость	37 304	42 609	53 882	78 316	86 692	210 678	236 078
Дедвейт, т	45 349	52 788	63 160	79 373	90 613	197 059	241 164
Водоизмещение по летнюю марку, т	59 762	70 038	84 661	108 151	122 065	254 516	307 508
Длина наибольшая, м	221,16	268,80	294,09	302,00	316,00	399,86	399,99
Длина между перпендикулярами, м	209,00	256,50	282,00	288,00	302,00	383,00	392,00
Ширина, м	34,90	32,20	32,20	43,40	45,60	58,8	61,50
Летняя осадка, м	12,00	12,50	13,533	14,232	14,535	16,025	17,000
Мощность главного двигателя, кВт	22890	54460	49410	57200	62920	59250	60400
Удельная мощность главного двигателя, кВт/т	0,50	1,03	0,78	0,72	0,69	0,30	0,25
Эксплуатационная скорость, узлов	22,8	24,5	25,45	24,5	25,25	22,5	22,5

Одним из важнейших параметров, описывающих форму корпуса контейнеровоза, является соотношение его основных линейных характеристик: L/B , B/d и L/d . Исследование этих параметров было выполнено в работе [13]. Для модельных контейнеровозов указанные соотношения приведены в табл. 2. Следует отметить, что контейнеровозы более ранней постройки имеют большую удельную мощность главного двигателя (в данном случае подразумевается отношение мощности главного двигателя в кВт к дедвейту в тоннах) и большую эксплуатационную скорость. Сочетание большой удельной мощности двигателя и большой скорости судна, как правило, сопровождается более острыми обводами корпуса судна и меньшими значениями коэффициентов полноты. Это объясняется тем, что в период 1990–2000-е гг. в приоритете были скорости доставки грузов при менее строгих экологических ограничениях.

Современные крупнотоннажные контейнеровозы имеют более полные обводы корпуса, меньшую удельную мощность главного двигателя и, соответственно, эксплуатационную скорость. Это объясняется тем, что в настоящее время приоритет отдается эффекту масштаба перевозок (медленнее, но больше) и охране окружающей среды, предполагающей снижение выхлопов в атмосферу вредных соединений от работы судовых двигателей.

Таблица 2

Соотношение основных линейных характеристик

Контейнеровоз	L/B	B/d	L/d
3600	5,99	2,91	17,42
4200	7,97	2,58	20,52
4646	8,76	2,38	20,84
6724	6,64	3,05	20,24
8110	6,62	3,14	20,78
20170	6,51	3,68	23,94
24116	6,37	3,62	23,06

Для каждого модельного контейнеровоза были построены графики зависимости площади ватерлинии от осадки (рис. 7).

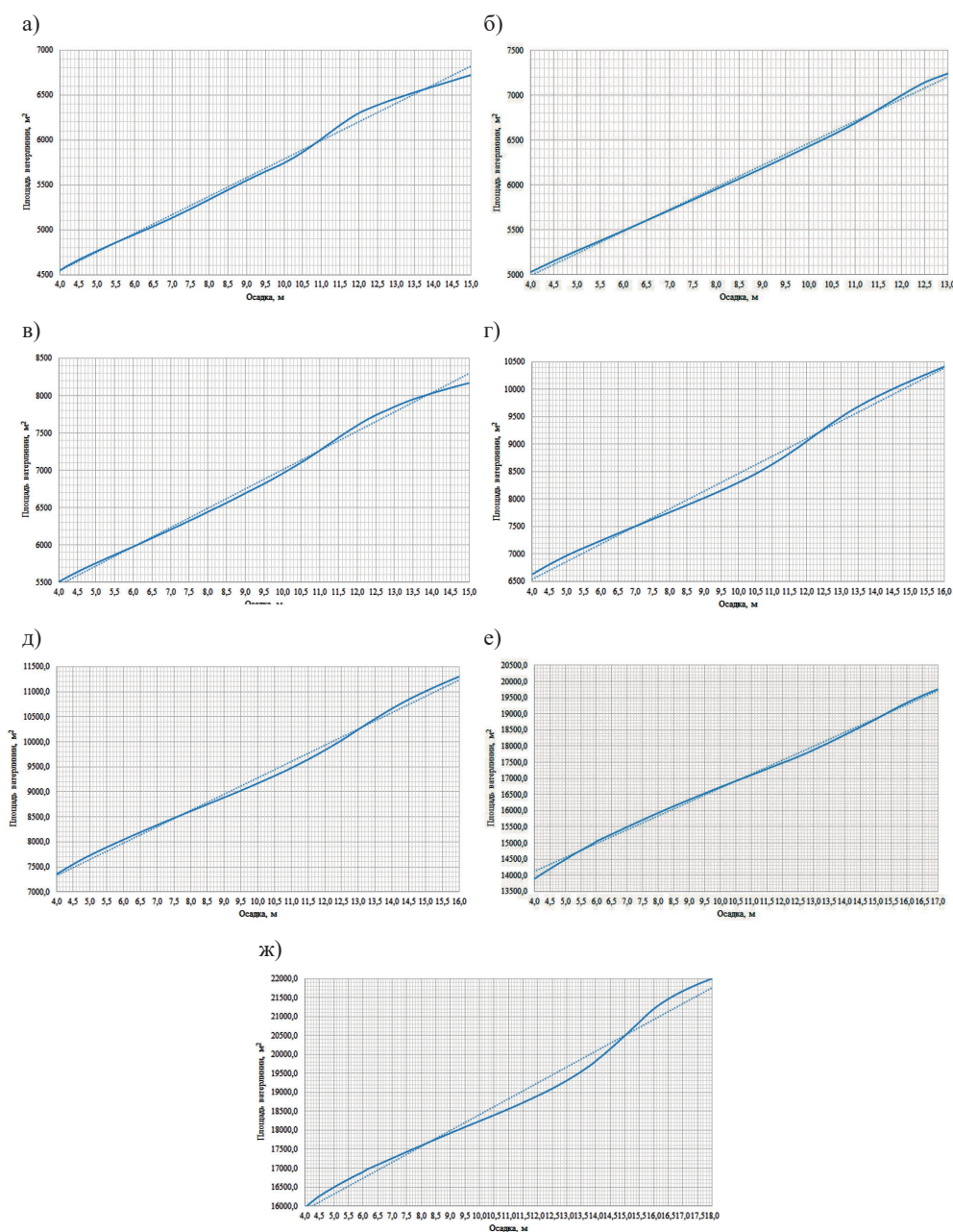


Рис. 7. Зависимость площади ватерлинии от осадки: а — контейнеровоз 3600 ДФЭ; б — контейнеровоз 4200 ДФЭ; в — контейнеровоз 4646 ДФЭ; г — контейнеровоз 6724 ДФЭ; д — контейнеровоз 8110 ДФЭ; е — контейнеровоз 20170 ДФЭ; ж — контейнеровоз 24116 ДФЭ

Графики были аппроксимированы линейной регрессией, которая была выбрана для упрощения оценки зависимости площади ватерлинии от осадки на практике. Уравнения аппроксимации и коэффициенты детерминации приведены в табл. 3. На каждом графике просматривается общая тенденция: один минимум и два максимума, в которых фактическое значение площади ватерлинии меньше и, соответственно, больше, чем аппроксимированное значение.

Абсолютная и относительная погрешности аппроксимации приведены в табл. 3. Как видно, линейная аппроксимация достаточно точно передает зависимость площади ватерлинии от осадки. Поэтому ее применение на практике обосновано.

Таблица 3

Параметры зависимости площади ватерлинии от осадки

Контейнеровоз	Уравнение аппроксимации	Коэффициент детерминации	Максимальная погрешность	
			Абсолютная, м ²	Относительная, %
3600	$S_{WP} = 206,48d + 3721,7$	0,9967	+97	1,6
4200	$S_{WP} = 246,06d + 4007$	0,9977	+73	1,0
4646	$S_{WP} = 257,04d + 4436,8$	0,9961	+93	1,2
6724	$S_{WP} = 320,92d + 5255$	0,9925	–140	1,7
8110	$S_{WP} = 325,76d + 6020,8$	0,9952	–147	1,6
20170	$S_{WP} = 430,32d + 12392$	0,9976	–117	0,7
24116	$S_{WP} = 418,98d + 14220$	0,9828	–367	1,9

Для каждого модельного контейнеровоза были выбраны значения коэффициентов C_b и C_w для заданного диапазона осадок, который примерно соответствует 60–100 % осадки по летнюю ватерлинию, как наиболее характерного с эксплуатационной точки зрения. Результаты представлены в табл. 4. Курсивом выделены значения C_b и C_w для осадок, превышающих осадку по летнюю ватерлинию, принятую как максимальную эксплуатационную.

Таблица 4

Коэффициенты общей полноты и полноты площади ватерлинии модельных контейнеровозов

Контейнеровоз	Осадка, м										
	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0	17,0
	C <i>b</i>										
3600	0,5836	0,6002	0,6163	0,6320	0,6476	0,6640	0,6803	0,6956	0,7101	–	–
4200	0,5690	0,5870	0,6030	0,6190	0,6350	0,6510	0,6680	–	–	–	–
4646	0,5692	0,5852	0,6006	0,6157	0,6309	0,6467	0,6625	0,6777	0,6921	–	–
6724	0,4924	0,5073	0,5211	0,5344	0,5474	0,5608	0,5748	0,5892	0,6033	0,6170	0,6304
8110	0,4939	0,5090	0,5230	0,5362	0,5489	0,5615	0,5743	0,5875	0,6008	0,6139	0,6266
20170	0,5811	0,5964	0,6107	0,6241	0,6369	0,6492	0,6613	0,6731	0,6848	0,6962	0,7069
24116	0,6383	0,6490	0,6588	0,6680	0,6767	0,6851	0,6934	0,7018	0,7108	0,7205	0,7305
	C <i>w</i>										
3600	0,7023	0,7306	0,7595	0,7858	0,8225	0,8627	0,8853	0,9036	0,9209	–	–
4200	0,6920	0,7210	0,7490	0,7790	0,8100	0,8480	0,8770	–	–	–	–
4646	0,6834	0,7095	0,7369	0,7661	0,8002	0,8368	0,8644	0,8842	0,8994	–	–
6724	0,6007	0,6211	0,6419	0,6645	0,6914	0,7249	0,7601	0,7887	0,8120	0,8333	0,8541
8110	0,6042	0,6244	0,6443	0,6649	0,6872	0,7186	0,7431	0,7734	0,7987	0,8200	0,8399
20170	0,6920	0,7188	0,7420	0,7638	0,7863	0,8097	0,8337	0,8542	0,8681	0,8786	0,8870
24116	0,7164	0,7303	0,7440	0,7571	0,7704	0,7848	0,8015	0,8231	0,8508	0,8802	0,8996

Графически результаты табл. 4 представлены на рис. 8.

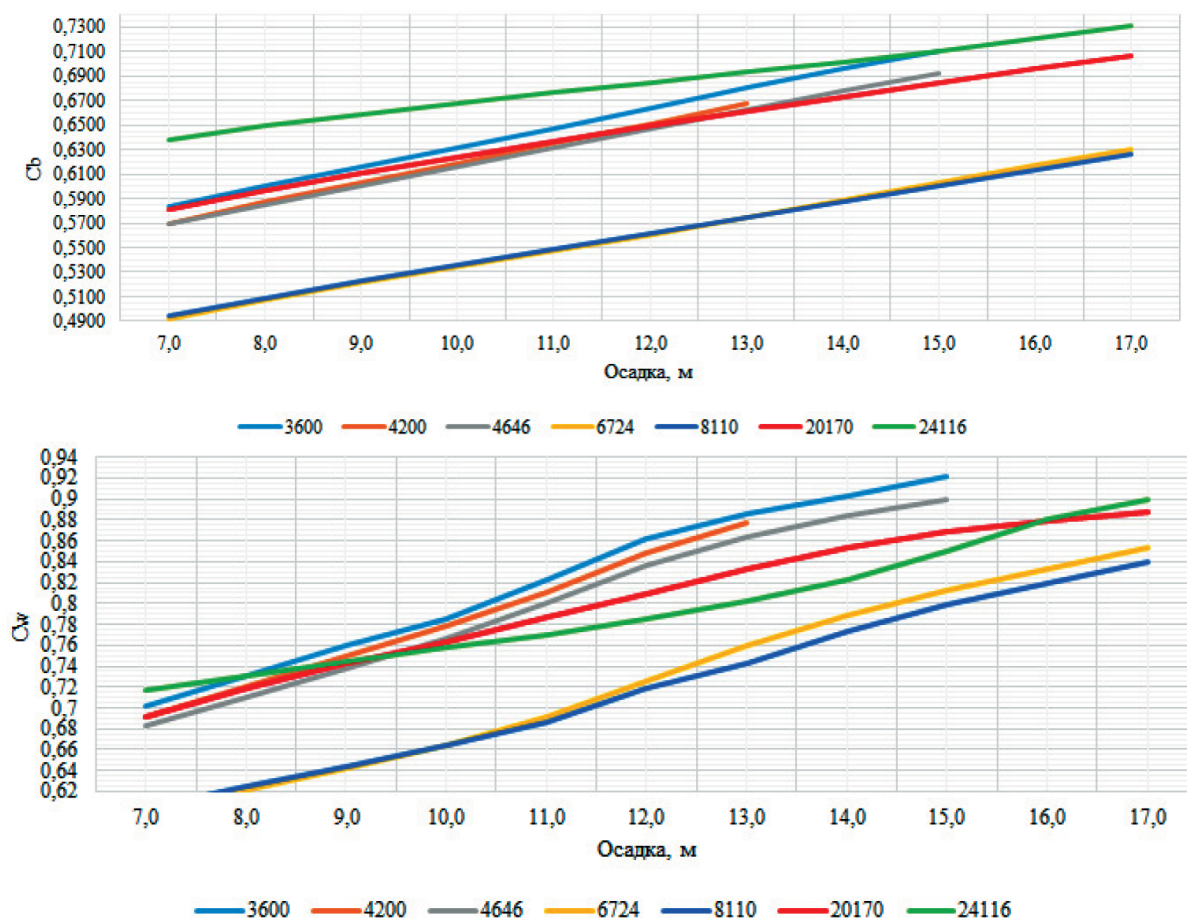


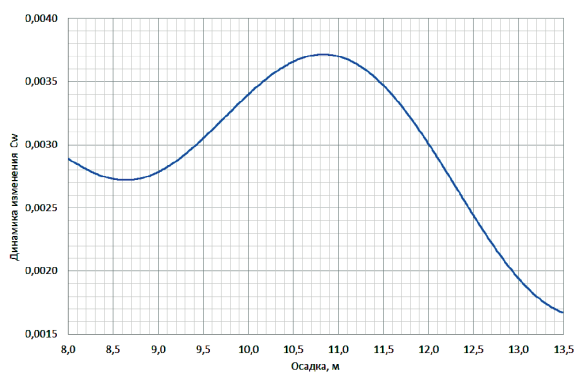
Рис. 8. Зависимость коэффициентов полноты от осадки

Из графиков на рис. 8 можно сделать следующие выводы:

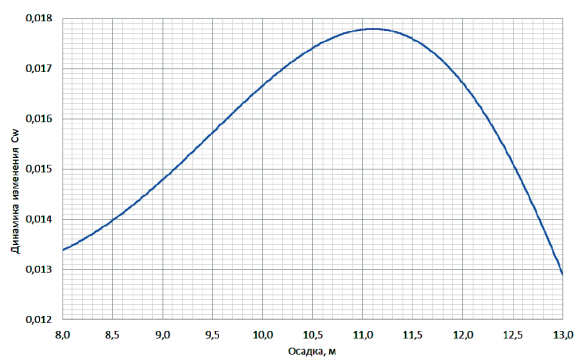
- значение C_b увеличивается практически линейно с увеличением осадки (коэффициент детерминации во всех случаях больше 0,997);
- увеличение значения C_w с увеличением осадки близко к линейному (коэффициент детерминации во всех случаях больше 0,975). Линии графика сопоставимы с линиями графиков соответствующих судов на рис. 7, поскольку площадь ватерлинии и коэффициент ее полноты взаимозависимы;
- увеличение тоннажа контейнеровозов не сопровождается однозначно увеличением значений C_b и C_w ;
- значения C_b и C_w не характеризуют тоннаж контейнеровоза. Средне- и крупнотоннажные контейнеровозы могут иметь близкие значения C_b и C_w (например, контейнеровозы 3600 и 20170);
- величины C_b и C_w контейнеровоза напрямую не зависят от соотношения его линейных характеристик (см. табл. 2);
- значения C_b и C_w могут мало различаться у контейнеровозов, близких по тоннажу, но имеющих разные линейные характеристики и построенных по схожему проекту, как, например, у контейнеровозов 6724 и 8110.

Значение коэффициента C_w , а соответственно, и площадь ватерлинии увеличиваются с увеличением осадки. Однако скорость увеличения C_w неравномерна, ее динамика для модельных контейнеровозов графически представлена на рис. 9. Данные на графиках были аппроксимированы с использованием полиномиальной линии тренда. Точность аппроксимации каждой линии тренда указана в подрисуточной подписи рис. 9.

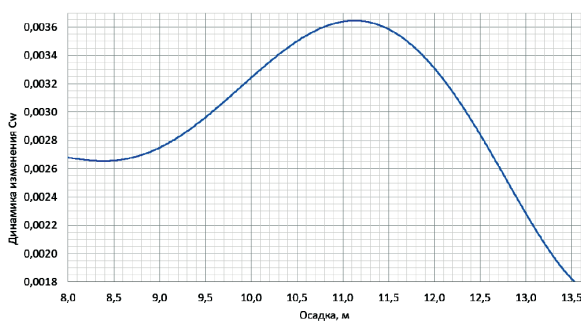
а)



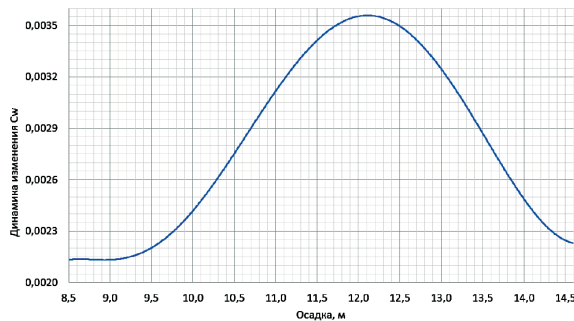
б)



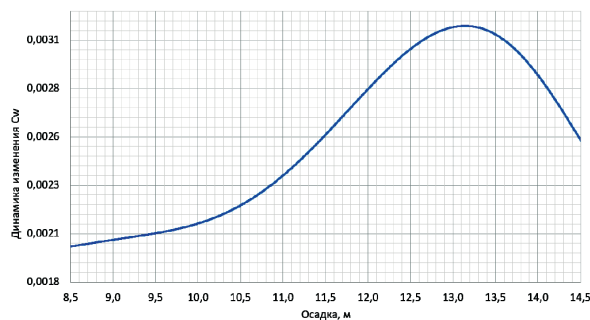
в)



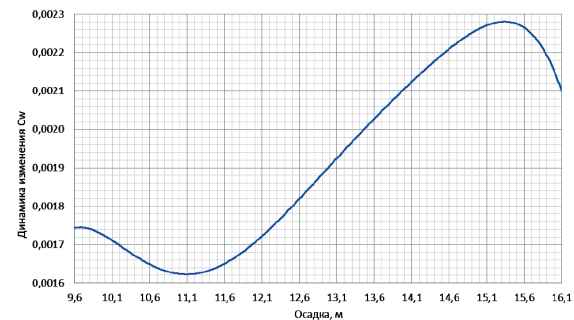
г)



д)



е)



ж)

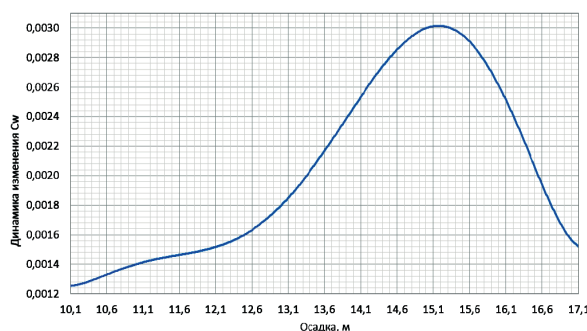


Рис. 9. Динамика изменения Sw от осадки:

а — контейнеровоз 3600 ДФЭ (0,9405); б — контейнеровоз 4200 ДФЭ (0,9306);
в — контейнеровоз 4646 ДФЭ (0,9584); г — контейнеровоз 6724 ДФЭ (0,9841);
д — контейнеровоз 8110 ДФЭ (0,9821); е — контейнеровоз 20170 ДФЭ (0,9448);
ж — контейнеровоз 24116 ДФЭ (0,9796)

На каждом из графиков можно выделить участки с максимальным и минимальным изменением Sw в соответствующем диапазоне осадок (табл. 5). Если осадка судна находится в диа-

пазоне максимального изменения C_w , то следует ожидать, что ее изменение будет приводить к более значительному изменению площади ватерлинии и всех параметров, которые от нее зависят. И наоборот, в диапазоне осадок с минимальным изменением C_w изменение площади ватерлинии будет менее значительным.

Таблица 5

Диапазоны осадок с максимальным и минимальным изменением C_w

Контейнеровоз	Диапазон осадок, м		Осадка по летнюю ватерлинию, м
	Максимальное изменение C_w	Минимальное изменение C_w	
3600	9,1–10,5; 11,1–13,5	8,2–9,1; 10,5–11,1	12,000
4200	8,0–10,6; 11,6–13,0	10,6–11,6	12,500
4646	9,0–10,7; 11,6–13,5	8,0–9,0; 10,8–11,6	13,533
6724	9,5–11,7; 12,5–14,4	8,5–9,5; 11,7–12,5; 14,4–14,5	14,232
8110	10,5–12,7; 13,5–14,5	8,5–10,5; 12,7–13,5	14,535
20170	11,6–15,0; 15,6–16,0	9,6–11,6; 15,0–15,6	16,025
24116	12,7–14,8; 15,6–17,0	10,1–12,7; 14,8–15,6	17,000

Следует отметить, что участки графиков на рис. 7, где они расходятся с аппроксимирующей линией, в общем совпадают с диапазонами осадок, на которых C_w имеет максимальное изменение (см. рис. 9 и табл. 5). Это можно объяснить тем, что в диапазонах осадок, где площадь ватерлинии изменяется более интенсивно, ее значение в большей мере отличается от соответствующего аппроксимированного значения. Также следует отметить, что для определенных значений осадок величина фактической и аппроксимированной площадей ватерлинии будут равны или очень близки. Эти значения осадок приведены в табл. 6.

Таблица 6

Совпадение и максимальное отличие фактических и аппроксимированных значений площади ватерлинии

Контейнеровоз	Осадка, м	
	Точное совпадение	Максимальное отличие
3600	5,9; 10,8; 13,7	11,9
4200	6,3; 11,3	12,5
4646	6,0; 10,9	12,3
6724	7,1; 12,3	10,4
8110	7,7; 13,0	10,9
20170	10,7; 15,1	12,9
24116	8,5; 15,0	12,3

Для определения доли площадей секций ватерлинии от ее общей площади были выбраны контейнеровозы двух архитектурных типов, имеющих свои особенности строения корпуса. Контейнеровоз вместимостью 8110 ДФЭ представляет собой крупнотоннажный контейнеровоз классической конструкции со смещенной в корму надстройкой и более острыми носовыми обводами. Контейнеровоз вместимостью 24116 ДФЭ представляет собой современный архитектурный тип для ультрабольших контейнеровозов со смещенной в нос жилой надстройкой и смещенной в корму машинной надстройкой (по классификации автора — «двухнадстроечник») и более полными носовыми обводами (рис. 10).

Для каждого судна были выбраны по две осадки: минимальная ($d_{\min}$) и максимальная ($d_{\max}$), соответствующая осадке по летнюю ватерлинию. Для контейнеровоза 8110 — $d_{\min} = 10,00$ м, $d_{\max} = 14,53$ м; для контейнеровоза 24116 — $d_{\min} = 11,00$ м, $d_{\max} = 17,00$ м. Для каждой осадки с использованием построочных чертежей был сформирован профиль ватерлинии и рассчитана площадь каждой секции с использованием масштабной сетки. Доля каждой секции определялась

отношением ее площади к общей площади ватерлинии, в процентах. Из двух значений для $d_{\min}$ и для $d_{\max}$ определялось среднее значение для каждого судна, и затем общее среднее значение. Очевидно, что рассчитываемые величины для промежуточных осадок будут находиться в диапазоне между полученными минимальными и максимальными значениями, приведенными в табл. 7.

а)



б)



Рис. 10. Архитектурные типы современных крупнотоннажных контейнеровозов:
а — классический (контейнеровоз 8110); б — «двухнастроечник» (контейнеровоз 24116)
Источники заимствования: www.ship-photo-roster.com; www.marinetraffic.com

Таблица 7

Доля площадей секций ватерлинии от общей площади ватерлинии

Номер секции	Доля, %						Общая средняя
	Контейнеровоз 8110			Контейнеровоз 24116			
	Для $d_{\min}$	Для $d_{\max}$	Средняя	Для $d_{\min}$	Для $d_{\max}$	Средняя	
1	0,0	3,2	1,6	0,0	3,2	1,6	1,6
2	1,0	5,3	3,2	1,6	5,3	3,4	3,3
3	3,6	6,3	4,9	4,7	5,5	5,1	5,0
4	6,0	6,3	6,2	6,0	5,6	5,8	6,0
5	7,0	6,3	6,7	6,5	5,6	6,0	6,4
6	7,5	6,3	6,9	6,5	5,6	6,0	6,5
7	7,5	6,3	6,9	6,5	5,6	6,0	6,5
8	7,5	6,3	6,9	6,5	5,6	6,0	6,5
9	7,5	6,3	6,9	6,5	5,6	6,0	6,5
10	7,5	6,3	6,9	6,5	5,6	6,0	6,5
11	7,5	6,3	6,9	6,5	5,6	6,0	6,5
12	7,3	6,3	6,8	6,5	5,6	6,0	6,4
13	7,0	6,2	6,6	6,5	5,6	6,0	6,3
14	6,4	5,9	6,1	6,5	5,6	6,0	6,1
15	5,5	5,4	5,4	6,4	5,6	6,0	5,7
16	4,4	4,2	4,3	5,9	5,5	5,7	5,0
17	3,1	3,0	3,0	4,9	5,3	5,1	4,1
18	1,9	1,9	1,9	3,5	4,6	4,1	3,0
19	1,1	1,0	1,1	1,8	3,0	2,4	1,8
20	0,5	0,4	0,4	0,2	0,9	0,6	0,5

Из табл. 7 видно, что доля площади ватерлинии каждой полной секции составляет в среднем 6,5 % от общей площади ватерлинии. Доли кормовой и носовой секций в среднем составляют 1,6 % и 0,5 %, соответственно. Для трех диапазонов осадок выбранных для исследования контейнеровозов с шагом осадки в 0,5 м было определено среднее значение C_{w_i} . Результаты сведены в табл. 8.

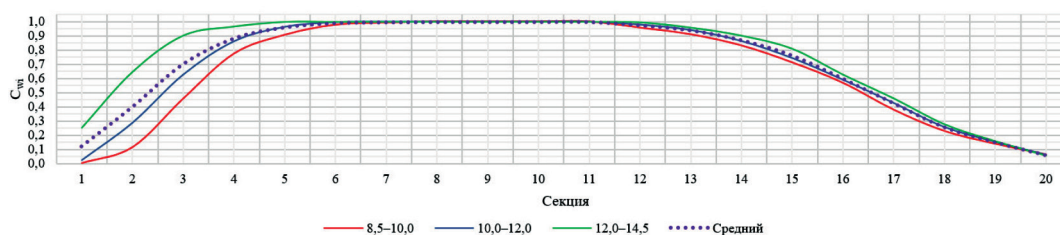
Таблица 8

Коэффициенты полноты площади секций ватерлинии C_{w_i}

Номер секции	Коэффициент полноты C_{w_i}								
	Контейнеровоз 8110				Контейнеровоз 24116				
	Диапазоны осадок, м								
	8,5–10,0	10,0–12,0	12,0–14,5	Средний	11,0–13,0	13,0–15,0	15,0–17,0	Средний	Общий средний
1	0,0022	0,0241	0,2525	0,0930	0,0015	0,0925	0,3736	0,1558	0,1244
2	0,1151	0,2881	0,6475	0,3502	0,2919	0,5457	0,8594	0,5657	0,4580
3	0,4577	0,6276	0,9035	0,6629	0,7890	0,8988	0,9751	0,8876	0,7753
4	0,7746	0,8619	0,9671	0,8679	0,9438	0,9784	0,9984	0,9735	0,9207
5	0,9064	0,9637	0,9997	0,9566	0,9994	1,0000	1,0000	0,9998	0,9782
6	0,9775	0,9965	0,9998	0,9913	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9957
7	0,9923	1,0000	1,0000	0,9974	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9987
8	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
9	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
11	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
12	0,9460	0,9796	0,9964	0,9776	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9888
13	0,9133	0,9411	0,9594	0,9367	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,9684
14	0,8308	0,8633	0,9024	0,8655	0,9999	1,0000	1,0000	1,0000	0,9328
15	0,7114	0,7433	0,8098	0,7548	0,9902	0,9974	0,9994	0,9957	0,8753
16	0,5674	0,5905	0,6273	0,5951	0,9416	0,9651	0,9822	0,9630	0,7791
17	0,3781	0,4264	0,4594	0,4213	0,7981	0,8665	0,9304	0,8650	0,6432
18	0,2284	0,2568	0,2769	0,2540	0,6025	0,7123	0,7948	0,7032	0,4786
19	0,1384	0,1531	0,1579	0,1498	0,3114	0,3954	0,4953	0,4007	0,2753
20	0,0631	0,0618	0,0561	0,0603	0,0386	0,0547	0,1217	0,0717	0,0660

Графически результаты, представленные в табл. 8, показаны на рис. 11. Зависимость коэффициента C_{w_i} от номера секции ватерлинии формирует кривую, контур которой достаточно точно повторяет полушироты судна по аналогии с представленными на рис. 2, что в целом подтверждает корректность выполненных расчетов.

а)



б)

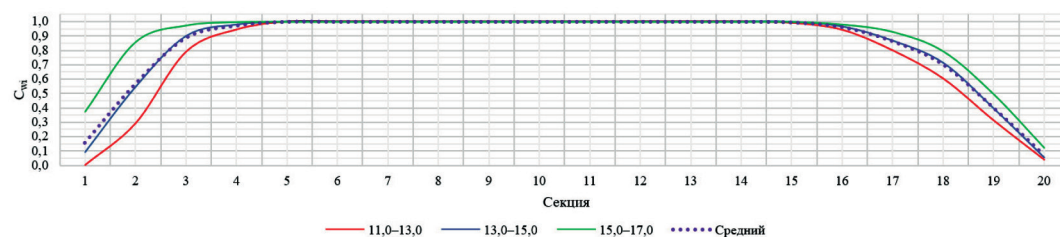


Рис. 11. C_{w_i} по секциям площади ватерлинии:
а — контейнеровоз 8110; б — контейнеровоз 24116

Таблица 9

Количество полных секций ватерлинии в зависимости от осадки

Контейнеровоз 8110		Контейнеровоз 24116	
Осадка, м	Количество полных секций	Осадка, м	Количество полных секций
8,50	4	11,00	8
9,00	4	11,50	8
9,50	4	12,00	8
10,00	5	12,50	8
10,50	5	13,00	10
11,00	5	13,50	10
11,50	5	14,00	10
12,00	5	14,50	10
12,50	7	15,00	10
13,00	7	15,50	10
13,50	7	16,00	10
14,00	7	16,50	10
14,50	7	17,00	12

Количество полных секций однозначно не зависит от архитектурного типа контейнеровоза. Поскольку как традиционные контейнеровозы, так и контейнеровозы-двухнадстроечники со схожими линейными характеристиками будут иметь примерно одинаковое количество полных секций. Вместе с тем очевидно, что контейнеровозы с большей длиной имеют большее количество полных секций, поскольку именно средняя часть корпуса судна (цилиндрическая вставка) и обеспечивает большую контейнеровместимость.

С целью проверки возможности использования полученных средних значений C_{w_i} (см. табл. 8) для контейнеровозов любого тоннажа был выполнен анализ точности применительно к модельным контейнеровозам, используемым в настоящем исследовании. Для проверки использовались средние значения по каждому из двух модельных контейнеровозов и их общие средние значения C_{w_i} . Результаты приведены в табл. 10 и 11.

Таблица 10

Анализ точности средних значений C_{w_i} по типам контейнеровозов

Контейнеровоз	Диапазон осадок с погрешностью C_{w_i} , м		Максимальная погрешность для рабочего диапазона осадок, %	
	$\leq 5\%$	$\leq 1\%$	Осадки, м	Погрешность, %
8110	9,90–12,70	11,10–11,60	9,00–14,50	+11,6
24116	12,30–15,70	13,90–14,50	10,50–17,00	–8,6

В табл. 10 приведены результаты проверки точности применения средних значений C_{w_i} для контейнеровозов 8110 и 24116, полученные следующим образом. На основе средних значений C_{w_i} рассчитывается площадь ватерлинии данного судна. Полученное расчетное значение сравнивается с истинным значением площади ватерлинии *каждого из двух судов отдельно*, т. е. расчетные значения для судна 8110 сравниваются с истинными значениями для этого же судна.

В табл. 11 приведены результаты проверки точности применения общих средних значений, полученных для контейнеровозов 8110 и 24116 применительно ко всем модельным контейнеровозам.

Таблица 11

Анализ точности общих средних значений C_{w_i}

Контейнеровоз	Диапазон осадок с погрешностью C_{w_i} , м		Максимальная погрешность для рабочего диапазона осадок, %	
	$\leq 5\%$	$\leq 1\%$	Осадки, м	Погрешность, %
3600	8,50–11,10	9,20–9,80	7,00–12,00	–9,4
4200	9,05–11,55	9,60–10,10	7,50–12,50	–9,4
4646	9,60–12,00	10,00–10,50	8,00–13,50	–11,8
6724	10,80–12,90	13,10–13,60	9,00–14,50	–12,0
8110	10,50–13,20	13,70–14,30	9,00–14,50	–10,2
20170	11,00–15,10	11,40–12,40	10,00–16,00	–7,3
24116	12,00–15,60	10,70–11,80	10,50–17,00	+8,3

Как видно из табл. 10 и 11, результаты применения средних значений C_{w_i} показывают неудовлетворительную точность. Относительная погрешность достигает 10 % и более. Даже применение средних значений C_{w_i} конкретного контейнеровоза к этому контейнеровозу (см. табл. 10) не дает достаточной точности, и, в общем, сопоставимо с применением общего среднего значения (см. табл. 11). При этом можно отметить, что погрешность до 5 % достигается при вполне значительном диапазоне осадок, а погрешность до 1 % — в очень ограниченном диапазоне осадок. Это подтверждает тот факт, что значение C_{w_i} в значительной степени зависит от осадки судна и применение средних значений, полученных для всего диапазона эксплуатационных осадок, не даст удовлетворительного значения для конкретной осадки. Получение удовлетворительной точности, когда погрешность $\leq 1\%$, возможно только в узком диапазоне осадок, порядка 0,5 м.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что найти универсальное значение C_{w_i} , которое бы с достаточной точностью удовлетворяло контейнеровозам разного тоннажа с разными линейными характеристиками и для любой осадки не представляется возможным без дополнительных более тщательных исследований этого вопроса.

В результате выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для определения гидростатических характеристик контейнеровоза на волнении целесообразно разбивать корпус судна на секции и определять соответствующие расчетные параметры сначала для каждой секции с учетом ее осадки, а затем — для всего корпуса.
2. Понимание зависимости конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровоза позволяет осуществлять как приближенные расчеты с применением средних значений исходных параметров, так и достаточно точные для практического применения расчеты с использованием фактических параметров конкретного судна.
3. Однозначных зависимостей между конструктивными и гидростатическими характеристиками контейнеровозов разного тоннажа в рамках данного исследования выявлено не было. В одном случае это может означать, что таких зависимостей нет, в другом — что требуются дальнейшие исследования этого вопроса.
4. Введение такого параметра, как коэффициент полноты площади секции ватерлинии C_{w_i} , позволяет упростить расчеты гидростатических параметров судна на волнении.
5. Применение средних значений C_{w_i} показало в целом неудовлетворительную точность и, вероятно, требует дальнейших исследований.

Заключение (Conclusion)

Конструктивные и гидростатические характеристики контейнеровоза обуславливают его поведение на волнении, влияют на остойчивость и параметры качки. Понимание особенностей этих характеристик судна позволяет оценивать вероятность наступления потенциально опасных ситуаций, которые могут возникать на волнении, включая резонансную качку.

Результаты, полученные по итогам проведенного в рамках настоящей работы исследования, демонстрируют обоснованность утверждений о необходимости учета конструктивных и гидростатических характеристик судов-контейнеровозов для оценки судоводителями их поведения на волнении. Эти результаты планируется использовать в дальнейших исследованиях, направленных на разработку упрощенных практико-ориентированных методик расчета и контроля параметров судна и его остойчивости на волнении, включая более подробное изучение параметров ватерлинии и их изменения на волнении, выявление возможных зависимостей конструктивных и гидростатических характеристик контейнеровозов разного тоннажа, определение опасной длины волны по отношению к длине контейнеровоза и оценку вероятности попадания судна в условиях опасной резонансной качки с учетом параметров остойчивости и волнения.

Использование судоводителями результатов исследований, проведенных в данной работе, в реальных условиях эксплуатации судна будет в значительной мере способствовать повышению безопасности эксплуатации контейнеровозов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуллаева З. М. Влияние ветро-волновых возмущений на гидродинамические характеристики корпуса судна / З. М. Абдуллаева // Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. — 2023. — Т. 1. — С. 184–188. — EDN UBJSY.
2. Сичкарев В. И. Идентификация волновых условий по спектру качки судна / В. И. Сичкарев, В. П. Умрихин, М. Д. Тарасенко // Транспортное дело России. — 2024. — № 7. — С. 156–161. — EDN LXHNWHV.
3. Хвостов Р. С. Методика численного интегрирования уравнений, описывающих поверхность погруженной в воду части корпуса судна / Р. С. Хвостов // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 3(91). — С. 51–54. — EDN JHCVVW.
4. Хвостов Р. С. Математическое описание поверхности погруженной в воду части корпуса судна / Р. С. Хвостов, В. И. Тихонов, А. Н. Клементьев // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 3(91). — С. 48–51. — EDN TGSZDX.
5. Хвостов Р. С. Обоснование способа определения геометрических характеристик погруженной в воду части корпуса судна для адекватного моделирования действующих на него усилий / Р. С. Хвостов, М. В. Осокин // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 4(92). — С. 56–58. — EDN FOGNKO.
6. Kim B-S. Study on Hull Optimization Process Considering Operational Efficiency in Waves / B-S. Kim, M-J. Oh, J-H. Lee, Y-H. Kim, M-I. Roh // Processes. — 2021. — Vol. 9. — Is. 5. DOI: 10.3390/pr9050898.
7. Matsui S. A new mathematical hull-form with 10-shape parameters for evaluation of ship response in waves / S. Matsui // Journal of Marine Science and Technology. — 2011. — Vol. 3. — 14 с. — DOI: 10.1007/s00773-021-00849-3.
8. Uzunoglu C. E. Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves Thesis for obtaining the degree of Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering / C. E. Uzunoglu — 2011. — 115 с.
9. Осокин М. В. Способ определения момента инерции ватерлинии для оценки остойчивости судна на волнении / М. В. Осокин, Р. С. Хвостов // Речной транспорт (XXI век). — 2020. — № 3(95). — С. 40–43. — EDN FWXKPC.
10. Осокин М. В. Проблемы практического применения второго поколения критериев остойчивости судна в неповреждённом состоянии / М. В. Осокин, М. В. Жуков // Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород–Новосибирск–Владивосток–Самара, 23–26 апреля 2024 года. — Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. — С. 7. — EDN SUTNHY.
11. Zinchenko S. Analytical Model of a Ship's Stability on a Regular Wave / S. Zinchenko, O. Tovstokoryi, K. Kyrychenko, P. Nosov, I. Popovych // Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1 — Springer Nature Switzerland, 2024. — С. 51–68.
12. Осокин М. В. Оценка риска потери остойчивости и возникновения параметрического резонанса качки на примере контейнеровоза-фидера / М. В. Осокин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 59. — С. 168–176. — EDN AEFKOP.

13. 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.

REFERENCES

1. Abdullaeva, Z. M. “Influence of wind-wave disturbances on the hydrodynamic characteristics of the vessel hull.” *International Conference On Control In Technical Systems 1* (2023): 184–188.
2. Sichkarev, V. I., V. P. Umrikhin and M. D. Tarasenko. “Identification of wave conditions based on the ship’s pitching spectrum.” *Transport Business Of Russia 7* (2024): 156–161.
3. Khvostov, R. S. “The method of numerical integration of equations which describe surface of ship’s hull part immersed in water.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 3(91) (2019): 51–54.
4. Khvostov, R. S., V. I. Tikhonov and A. N. Klement’ev. “Mathematical description of surface of ship’s hull part immersed in water.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 3(91) (2019): 48–51.
5. Khvostov, R. S. and M. V. Osokin. “The substantiation of definition method for geometric parameters of submerged in water part of ship’s hull for adequate modelling forces which influence on it.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 4(92) (2019): 56–58.
6. Kim, B-S., M-I. Roh, et al. “Study on Hull Optimization Process Considering Operational Efficiency in Waves.” *Processes* 9.5 (2021). DOI: 10.3390/pr9050898.
7. Matsui, S. “A new mathematical hull-form with 10-shape parameters for evaluation of ship response in waves.” *Journal of Marine Science and Technology* 3 (2011): 508–521. DOI: 10.1007/s00773-021-00849-3.
8. Uzunoglu, C. E. *Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves*. Thesis for obtaining the degree of Master of Science in Naval Architecture and Marine Engineering, 2011: 115 с.
9. Osokin, M. V. and R. S. Khvostov. “The principle of definition of inertia moment of waterline to estimation ship’s stability on waving.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 3(95) (2020): 40–43.
10. Osokin, M. V. and M. V. Zhukov. “Problems of practical application of the second generation criteria for intact stability of a vessel.” *Transport. Gorizonty razvitiya: Trudy 4-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma, Nizhniy Novgorod-Novosibirsk-Vladivostok-Samara, 23–26 aprelya 2024 goda*. Nizhniy Novgorod: Volzhskiy gosudarstvennyy universitet vodnogo transporta, 2024: 7.
11. Zinchenko, S., O. Tovstokoryi, K. Kyrychenko, P. Nosov and I. Popovych “Analytical Model of a Ship’s Stability on a Regular Wave.” *Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision-Making, Volume 1* Springer Nature Switzerland, 2024: 51–68.
12. Osokin, M. V. “Risk assessment of loss of stability and parametric rolling on example of feeder container ship.” *Bulletin Of The Volga State Academy Of Water Transport* 59 (2019): 168–176.
13. Yakuta, I. V. “Study of the effect of changing the ratio of main dimensions on the seaworthiness of container ships.” *Kstu News* 68 (2023): 110–124. DOI: 10.46845/1997-3071-2023-68-110-124.

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 13 мая 2025 г.
Received: May 13, 2025.