

УДК 656.61.052

ОЦЕНКА МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ВАТЕРЛИНИИ СУДНА ПО ТАБЛИЦЕ ЕГО ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОВЕРКЕ СООТВЕТСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ КРИТЕРИЯМ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

Осокин Михаил Викторович¹, доцент кафедры Судовождения и безопасности судоходства

e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Жуков Максим Валерьевич¹, аспирант кафедры Судовождения и безопасности судоходства

e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В данном материале изложен упрощенный метод оценки момента инерции действующей ватерлинии судна без использования его теоретического чертежа с помощью таблицы гидростатических элементов из судового буклета «Информация об остойчивости». Метод может быть полезен в процессе выполнения расчётов динамической остойчивости судна на волнении при проверке на её соответствие критериям второго поколения.

Ключевые слова: потеря остойчивости, параметрический резонанс качки, критерии остойчивости судна, обеспеченность морского волнения, момент инерции ватерлинии.

ASSESSMENT OF THE MOMENT OF INERTIA OF THE ACTUAL WATERLINE OF A VESSEL BASED ON HER HYDROSTATIC PARTICULARS WHEN CHECKING THE CONFORMITY OF DYNAMIC STABILITY TO THE SECOND GENERATION CRITERIA

Mikhail V. Osokin¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Navigation

e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

Maxim V. Zhukov¹, Doctoral Student of the Department of Navigation

e-mail: kaf_sbs@vsuwt.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This material presents a simplified method for estimating the moment of inertia of the vessel's actual waterline without using its theoretical drawing, using the table of hydrostatic elements from the ship's booklet "Stability Information". The method can be used in the process of performing calculations of the vessel's dynamic stability in waves when checking for compliance with the second generation criteria.

Keywords: loss of stability, parametrical rolling, vessel stability criteria, moment of inertia of the actual waterline.

Критерии динамической остойчивости второго поколения, учитывающие поведение судна в условиях морского волнения, изложены в циркулярах Комитета по безопасности мореплавания Международной морской организации [1] и [2]. В настоящее время методы связанных с ними расчётов находятся на стадии апробирования и рекомендованы в качестве дополнительных к обязательным критериям остойчивости, изложенным в части А Кодекса по остойчивости судов в неповреждённом состоянии [3]. В дальнейшем, после уточнения, они планируются к включению в указанный Кодекс. При оценке остойчивости по этим критериям проверяется её соответствие требованиям для следующих пяти случаев: судно не имеет хода относительно воды, в результате чего потеряло управление и развёрнуто бортом к волне; метацентрическая высота судна, вследствие изменения момента инерции действующей ватерлинии на волне, уменьшается до минимально допустимых значений; из-за периодического уменьшения остойчивости на волне возникает параметрический резонанс качки, приводящий к увеличению её амплитуд; возникают критические значения ускорений при качке, способствующие появлению недопустимых величин сил инерции, воздействующих на находящихся на судне людей; на попутном волнении возникают серфинг и броучинг. Оценка уязвимости судна при этом может производиться на нескольких уровнях, а именно: первом – для регулярного (не существующего в реальности) волнения при критических для судна с данными размерами и обводами корпуса сочетаниях высоты и длины волны; втором (более близком к реальности) – с учётом обеспеченности волнения (сочетания вероятности попадания судна на волну, обладающую наихудшими с точки зрения остойчивости данного судна характеристиками с вероятностью возникновения на этой волне неблагоприятных явлений из числа вышеуказанных); третьем, подразумевающим так называемый «прямой» расчёт остойчивости с точным учётом всех видов воздействующих на судно сил и вызываемых ими моментов (гидростатической природы, трения и инерции). При несоответствии критериям остойчивости ни на одном из указанных уровней судну устанавливаются эксплуатационные ограничения по загрузке, погоде, району плавания или в выборе курса и скорости при движении в условиях прогнозируемого волнения. При оценке уязвимости по минимально допустимому значению метацентрической высоты и параметрическому резонансу качки рассматриваются суда, имеющие развал бортов в оконечностях корпуса, способствующий уменьшению ординат действующей ватерлинии при прохождении этими оконечностями ложбин волн, вследствие чего уменьшаются момент инерции действующей ватерлинии, и, соответственно, метацентрический радиус, метацентрическая высота и плечи восстанавливающих моментов.

В расчётах минимального значения метацентрической высоты на волне на первом уровне при осадке, соответствующей такому уровню воды у борта в оконечностях корпуса, когда последние находятся в ложбинах волн, согласно [1] используется формула:

$$GM_{min} = KB + \frac{I_{TL}}{\nabla} - KG, \quad (1)$$

где KB – аппликата центра величины судна при осадке d_L , м;

KG – аппликата центра тяжести судна, м;

∇ – объёмное водоизмещение судна при осадке d_L м³

I_{TL} – момент инерции действующей ватерлинии относительно её продольной оси при осадке d_L , м⁴. Последняя рассчитывается по формуле:

$$d_L = d - \delta d_L, \quad (2)$$



где d – действующая осадка судна, а в качестве δd_L выбирается минимальное из двух значений:

$$\delta d_L = d - 0.25d_{full} \quad (3)$$

или

$$\delta d_L = \frac{L \cdot S_w}{2}, \quad (4)$$

L – длина судна по действующей ватерлинии, м;

S_w – площадь действующей ватерлинии, м²;

d_{full} – осадка судна при загрузке судна по летнюю ватерлинию на спокойной воде, м.

Нетрудно заметить, что отношение I_{TL}/∇ в формуле (1) представляет собой метацентрический радиус судна r при данной осадке.

Для оценки уязвимости судна по параметрическому резонансу качки на первом уровне в [1] приведена формула:

$$\frac{\delta GM}{GM} \leq R_{PR}, \quad (5)$$

где GM – метацентрическая высота судна на спокойной воде;

δGM – амплитуда изменения метацентрической высоты, рассчитываемая, как половина разности значений метацентрического радиуса, один из которых берётся при осадке, соответствующей расчётной высоте борта судна, а другой – при осадке, определяемой по формуле (3).

Значение R_{PR} зависит от характеристик корпуса, определяющих степень демпфирования качки, то есть от расчётных длины и ширины судна, а также коэффициента полноты мидель-шпангоута и площади скуловых килей.

Для того, чтобы воспользоваться приведёнными выше формулами, необходимо иметь значения аппликат центра величины, площадей и моментов инерции действующих ватерлиний и метацентрических радиусов при различных осадках. В таблицах гидростатических элементов буклетов «Информации об остойчивости» у ряда проектов судов эти значения полностью или частично приводятся в явном виде. Выдержки из таких таблиц в качестве примера представлены в табл. 1 и 2. В то же время, у многих судов таблицы гидростатических элементов для буклетов «Информации об остойчивости» составляются в упрощённом виде, позволяющем вкуче с пантокаренами рассчитывать некоторые эксплуатационные характеристики судна при данной загрузке (например, среднюю осадку и дифферент), а также минимум критериев остойчивости, требуемых частью А кодекса [3]: значения начальной метацентрической высоты и плеч восстанавливающих моментов, позволяющих построить диаграмму статической остойчивости. Выдержки из подобной таблицы приведены в табл. 3. Для удобства восприятия во всех трёх указанных выше таблицах обозначения переменных приведены к единому виду, а также из них исключены те переменные, которые не используются в данной работе (например, абсциссы центров величины, центров тяжести действующих ватерлиний, коэффициенты полноты водоизмещения и мидель-шпангоута и т.д.). В случае наличия на судне таблицы гидростатических элементов, подобной табл. 3, для определения значений аппликат центров величины, метацентрических радиусов, а также площадей и моментов инерции действующих ватерлиний необходим теоретический чертёж корпуса судна, который не всегда доступен на борту, а при его наличии требуются расчёты, связанные с интегрированием кривых, определяющих обводы ватерлиний в оконечностях корпуса, что не всегда удобно при проведении оперативных расчётов на судне.

Таблица 1. Выдержки из таблицы гидростатических элементов т/х «Adler» (тип RO-RO/LO-LO)

d	∇	Δ	TPC	KB	r	S _w	KM	C _w
6.10	10354	10613	21.24	3.26	5.91	2072	9.16	0.874



Продолжение Таблицы 1

6.50	11203	11484	22.18	3.49	5.88	2164	9.37	0.913
6.90	12087	12389	22.98	3.72	5.87	2242	9.60	0.946
7.30	12995	13320	23.38	3.96	5.65	2281	9.61	0.962

где Δ – весовое водоизмещение судна при плотности воды 1.025 т/м³;

TPC – количество тонн на сантиметр осадки;

r – начальный поперечный метацентрический радиус, м;

S_W – площадь действующей ватерлинии, м²;

КМ – аппликата начального поперечного метacentра, м;

C_W – коэффициент полноты действующей ватерлинии;

Расчётная длина судна $LBP = 118.55$ м. Расчётная ширина судна $B = 20$ м.

Таблица 2. Выдержки из таблицы гидростатических элементов судна смешанного (река-море) плавания (тип «Русич»)

d	∇	Δ	TPC	KB	r	S_W	КМ	C_W
3.00	5289	5421	19.2	1.54	7.54	1868	9.07	0.908
3.50	6230	6385	19.6	1.80	6.50	1894	8.30	0.912
4.00	7183	7363	19.8	2.06	5.72	1916	7.77	0.920

Расчётная длина судна $LBP = 122.8$ м. Расчётная ширина судна $B = 16.5$ м.

Таблица 3. Выдержки из таблицы гидростатических элементов т/х «Flex Darwin» (тип Coaster)

d	∇	Δ	TPC	КМ
5.91	6004	6154	11.45	5.53
6.21	6340	6499	11.53	5.59
6.41	6566	6730	11.58	5.63

Расчётная длина судна $LBP = 90.05$ м. Расчётная ширина судна $B = 13.17$ м.

Учитывая всё сказанное, особенно в случае наличия на борту судна таблицы гидростатических элементов, подобной табл. 3, авторы данного материала рекомендуют методы расчёта недостающих элементов, изложенные ниже.

Площадь действующей ватерлинии можно оценить по формуле, приведённой в [4]:

$$S_W = 2 \int_{-L/2}^{L/2} f(x) dx, \quad (6)$$

где $f(x)$ – уравнение, описывающее изменение ординат действующей ватерлинии при осадке d по её длине.

Приняв допущение о том, что в пределах изменения осадки судна величиной в 1 сантиметр развал бортов в оконечностях корпуса можно не учитывать, для определения значения S_W можно также использовать зависимость:

$$S_W = \frac{TPC}{\gamma} \cdot 100, \quad (7)$$

где $\gamma = 1.025$ – плотность морской воды.

Момент инерции действующей ватерлинии может быть найден по известной формуле:

$$I_x = r \cdot \nabla \quad (8)$$

или по приведённой в [4] формуле:

$$I_x = \frac{2}{3} \int_{-L/2}^{L/2} f(x)^3 dx, \quad (9)$$

Используя формулу (6), можно найти некое среднее значение $f(x)_{cp}$, которым заменить $f(x)$ в расчёте площади действующей ватерлинии по формуле:



$$S_W = 2 \cdot LBP \cdot f(x)_{cp} \quad (10)$$

Зная значение $f(x)_{cp}$, можно найти момент инерции действующей ватерлинии, заменив формулу (9) уравнением:

$$I_x = \frac{2}{3 \cdot C_W} \cdot LBP \cdot f(x)_{cp}^3 \quad (11)$$

Значение начального поперечного метацентрического радиуса при его отсутствии в таблице гидростатических элементов судна находится по формуле:

$$r = I_x / \nabla \quad (12)$$

Результаты, взятые из табл. 1, 2, 3 и результаты расчётов по приведённым выше формулам можно свести в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчётов

d	C_W	r_1	r_2	S_W^1	S_W^2	I_x^1	I_x^2	$f(x)_{cp}$
т/х «Adler»								
6.10	0.874	5.91	5.93	2072	2072	61192	60370	8.74
6.50	0.913	5.88	5.88	2164	2165	65873	65880	9.13
6.90	0.946	5.87	5.82	2242	2243	70951	70730	9.46
7.30	0.962	5.65	5.63	2281	2281	73421	73140	9.62
судно типа «Русич»								
3.00	0.908	7.54	7.51	1868	1869	39879	39740	7.61
3.50	0.912	6.50	6.60	1894	1894	40495	41140	7.71
4.00	0.920	5.72	5.88	1916	1916	41087	42230	7.8
т/х «Flex Darwin»								
5.91	0.942	-	2.53	1117	1117	-	15190	6.2
6.21	0.948	-	2.43	1125	1124	-	15390	6.24
6.41	0.953	-	2.38	1130	1131	-	15600	6.28

где r_1 – значения начального поперечного метацентрического радиуса из табл. 1 и 2;

r_2 – значение начального поперечного метацентрического радиуса, найденное по формуле (12);

S_W^1 – значения площади действующей ватерлинии из табл. 1 и 2 или формуле (7);

S_W^2 – значение площади действующей ватерлинии, найденное по формуле (10);

I_x^1 – момент инерции действующей ватерлинии, найденный по формуле (8);

I_x^2 – момент инерции действующей ватерлинии, определённый по формуле (11);

Для судна, не имеющего в таблице гидростатических элементов значений коэффициента полноты действующей ватерлинии, их можно найти по известной формуле:

$$C_W = S_W / B \cdot LBP \quad (13)$$

Анализ табл. 4 показывает близкую сходимость результатов значений метацентрических радиусов, площадей и моментов инерции действующих ватерлиний, взятых из таблиц гидростатических элементов с результатами расчётов тех же величин по изложенной методике для тех судов, у которых эти данные есть. Поэтому мы считаем, что можно распространить эти методы на суда, у которых таких данных нет и таким образом дополнить информацию, необходимую для оценки остойчивости судна по критериям второго поколения.



Список литературы:

1. MSC.1/Circular.1627 – Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. URL: <https://www.crclass.org/wp-content/uploads/2023/10/2-6-MSC.1-Circ.1627-Interim-Guidelines-On-The-Second-Generation-Intact-Stability-Criteria-Secretariat.pdf> (дата обращения 20.04.2025).
2. MSC.1/Circ.1652 26 - Explanatory notes to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. URL: https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_743708_14/1/ (дата обращения 20.04.2025).
3. International Code of Intact stability. URL: <https://deckofficer.ru/titul/resolutions/item/imo-international-code-on-intact-stability> (дата обращения 20.04.2025)
4. Справочник по теории корабля: В трёх томах. Том 2. Статика судов. Качка судов. / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.

