

УДК 656.61.052

## СПОСОБ УТОЧНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТОВ ПРИ ПРАКТИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ КРИТЕРИЕВ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА В НЕПОВРЕЖДЁННОМ СОСТОЯНИИ

**Осокин Михаил Викторович**<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент

*e-mail:* [kaf\\_sbs@vsuwt.ru](mailto:kaf_sbs@vsuwt.ru)

**Жуков Максим Валерьевич**<sup>1</sup>, аспирант

*e-mail:* [kaf\\_sbs@vsuwt.ru](mailto:kaf_sbs@vsuwt.ru)

**Блошкин Илья Юрьевич**<sup>1</sup>, студент

*e-mail:* [kaf\\_sbs@vsuwt.ru](mailto:kaf_sbs@vsuwt.ru)

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

**Аннотация.** В данном материале предложен метод практической оценки изменения момента инерции действующей ватерлинии судна, находящегося серединой корпуса на гребне волны с целью расчёта изменения его динамической остойчивости. Ожидается, что использование данного метода может быть применено на стадии эксплуатации судов, например, при выборе навигационного района. Таким образом, судоводитель сможет рассчитывать безопасные и опасные участки своего маршрута.

**Ключевые слова:** критерии остойчивости, момент инерции действующей ватерлинии, избыточные ускорения, параметрический резонанс качки, серфинг, бродчинг.

## METHOD OF CLARIFICATION OF CALCULATION RESULTS IN THE PRACTICAL APPLICATION OF THE SECOND GENERATION CRITERIA FOR INTACT STABILITY OF A VESSEL

**Osokin Mikhail Victorovich**<sup>1</sup>, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

*e-mail:* [kaf\\_sbs@vsuwt.ru](mailto:kaf_sbs@vsuwt.ru)

**Zhukov Maxim Valerievich**<sup>1</sup>, Doctoral Student

*e-mail:* [kaf\\_sbs@vsuwt.ru](mailto:kaf_sbs@vsuwt.ru)

**Bloshkin Ilya Jurjevich**<sup>1</sup>, Student

*e-mail:* [kaf\\_sbs@vsuwt.ru](mailto:kaf_sbs@vsuwt.ru)

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** This material proposes a method for practical assessment of the change in the moment of inertia of the current waterline of a vessel located in the middle of the hull on the crest of a wave in order to calculate the change in its dynamic stability. Using of this method, it is expected that can be applied at the stage of operation of ships, for example, when choosing a navigation area. Thus, navigational officer will be able to calculate safe and dangerous sections of his own route.

**Keywords:** stability criteria, transverse moment of inertia of the water plane, excessive acceleration, parametric rolling, surfing, broaching.

Второе поколение критериев остойчивости судна в неповреждённом состоянии появилось вследствие развития в последние годы научных методов оценки динамической остойчивости судна при воздействии на него морского волнения. Среди руководящих документов, изданных Комитетом по безопасности мореплавания Международной морской организации (КБМ ИМО) в дополнение к Кодексу [1], в котором приведены обязательные критерии остойчивости, к настоящему времени приняты и опубликованы циркуляры [2] и [3]. В них рассматриваются некоторые опасные аспекты поведения судна на волнении, а именно: потеря остойчивости судна без хода при одновременном воздействии на него качки и ветрового шквала, ускорения при качке, приводящие к появлению действующих на находящихся на борту людей значительных сил инерции, так называемая «чистая» потеря остойчивости вследствие уменьшения момента инерции действующей ватерлинии на волне, параметрическая качка, вызывающая увеличение амплитуды колебаний, когда уменьшение остойчивости на волне происходит в такт с периодом собственных колебаний судна, а также явления периодического увеличения скорости судна на подветренном склоне волны на попутных волне курсах, сопровождаемое «захватом» судна волной с частичной или полной потерей управляемости, известное под названиями «серфинг» и «бродчинг». Методы расчётов, связанных с этими явлениями, изложенные в [2], базируются на многоуровневом подходе с возрастающей от уровня к уровню точностью полученных результатов и одновременным усложнением зависимостей, используемых для оценки уязвимости судна в конкретном состоянии загрузки. Упрощенная оценка условий возникновения «чистой» потери остойчивости и параметрической качки на первом уровне основана на применении уравнений гидростатики для наихудшего случая, когда на регулярном волнении (не существующем в природе) длина волны равна длине судна, а середина корпуса находится на гребне волны. Оконечности корпуса, имеющие развал бортов, при этом находятся на соседних впадинах волн, что способствует сужению ватерлинии в этих местах и уменьшению её момента инерции относительно продольной оси, а значит – метацентрического радиуса и метацентрической высоты. Диаграмма статической остойчивости судна при этом становится более полой, что способствует увеличению углов крена при воздействии на него кренящих моментов от волнения. Осадки судна в процессе расчётов принимаются соответствующими уровню воды на гребне и подошве волны. Наличие развала бортов в оконечностях корпуса судна описывается условием:

$$C_{\nabla} = \frac{\nabla_D - \nabla}{A_w \cdot (D - d)} \geq 1, \quad (1)$$

где  $D$  – расчётная высота борта;

$d$  – осадка судна при данной загрузке;

$\nabla_D$  – объёмное водоизмещение судна при ватерлинии, расположенной на уровне расчётной высоты борта;

$\nabla$  – объёмное водоизмещение судна при осадке  $d$ ;

$A_w$  – площадь действующей ватерлинии при осадке  $d$ .

Отсутствие уязвимости судна по «чистой» потере остойчивости соответствует условию:

$$GM_{min} \geq 0.05 \text{ м} \quad (2)$$

где  $GM_{min}$  – минимальная метацентрическая высота судна, находящегося серединой корпуса на гребне волны, рассчитанная по формуле (3) при осадке  $d_L$ , проходящей через впадину волны.

$$GM_{min} = KB + \frac{I_{TL}}{\nabla} - KG, \quad (3)$$



где  $KB$  – аппликата центра величины.

$I_{TL}$  – момент инерции действующей ватерлинии относительно её продольной оси при осадке  $d_L = d - \delta d_L$ . В качестве  $\delta d_L$  выбирается минимальное из двух значений:

$$\delta d_L = d - 0.25d_{full} \text{ или } \delta d_L = \frac{L \cdot S_w}{2}.$$

$L$  – длина судна по действующей ватерлинии.

$d_{full}$  – осадка судна при полной загрузке на спокойной воде.

$S_w$  – крутизна волны.

Судно считается неуязвимым по параметрическому резонансу качки на первом уровне, если выполняется неравенство (4).

$$\frac{\delta GM}{GM} \leq R_{PR}, \quad (4)$$

где  $R_{PR}$  – функция от длины, ширины судна, коэффициента полноты мидель-шпангоута и площади скуловых килей;

$GM$  — метацентрическая высота на спокойной воде;

$\delta GM$  — амплитуда изменения метацентрической высоты на волне, рассчитываемая, как половина разности метацентрических радиусов при осадках, соответствующих расчётной высоте борта судна и четверти осадки при полной загрузке, либо рассчитанных через крутизну волны.

В циркуляре [2] сказано о том, что приведённые в нём расчётные зависимости получены в результате ряда упрощений и эмпирической настройки. Поэтому, подразумевается, что к результатам расчётов следует относиться с осторожностью.

Критерии уязвимости на втором уровне основаны на долгосрочном анализе вероятности потери остойчивости при попадании судна на волну определённой высоты с определённым периодом (длиной). Вероятность такого попадания оценивается по таблицам волнового спектра, разработанным Международной ассоциацией классификационных обществ для различных районов Мирового океана с учётом обеспеченности так называемого «значительного» волнения, характеристики которого даются судоводителям в профессиональных морских прогнозах погоды и волнения. При этом для параметрического резонанса оценивается величина изменения амплитуды качки в условиях набора волн. Для «чистой» потери остойчивости исследуются изменения плеча восстанавливающего момента на волнах.

Как видно из изложенного выше, во всех случаях для оценки уязвимости судна по указанным критериям применяется расчёт изменения на волне момента инерции действующей ватерлинии судна относительно её продольной оси. Последний определяется по формуле:

$$I_x = \frac{2}{3} \int_{-L/2}^{L/2} y^3 dx, \quad (5)$$

где  $y$  – ординаты действующей ватерлинии судна.

Поскольку на волнении ординаты действующей ватерлинии  $y$  подавляющего большинства современных судов, корпус которых имеет цилиндрическую вставку с вертикальными в пределах изменения практических осадок бортами, меняются только в носовой и кормовой частях корпуса, где имеется развал бортов, с целью определения математических закономерностей изменения этих ординат по длине судна можно условно разбить реальный корпус судна на цилиндрическую вставку, где ординаты действующей ватерлинии не зависят от уровня воды  $y$  борта и носовую и кормовую оконечности, где для левого и правого бортов изменение ординат конкретной теоретической ватерлинии на спокойной воде может быть аппроксимировано кубическими регрессиями вида:

$$Y_1 = A \cdot X_1^3 + B X_1^2 + C X_1 + D \quad (6)$$

Для подбора коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  функций вида (6) можно использовать онлайн-калькулятор [13], позволяющий автоматически выполнять подбор функции по её графику. Калькулятор позволяет оценить величину коэффициента корреляции функции и её графика. В процессе дальнейших расчётов нас будут интересовать только те участки кубических регрессий, у которых ординаты принимают значения не более половины ширины судна (далее в направлении миделя идёт цилиндрическая вставка, на которой значения ординат не меняются) и не являются отрицательными. При отрицательных значениях ординат регрессия уходит за диаметральной плоскость. Фигура, которой описывается ватерлиния на цилиндрической вставке, как на спокойной воде, так и на волнении представляет собой прямоугольник с шириной, равной ширине судна и длиной, равной длине цилиндрической вставки. Как известно момент инерции такой фигуры относительно продольной оси можно найти с помощью простой зависимости:

$$I_x^ц = \frac{l_ц \cdot B^3}{12}, \quad (7)$$

где  $l_ц$  – длина цилиндрической вставки.

$B$  – ширина судна.

Ординаты точек, из которых состоит действующая ватерлиния судна на волне, можно найти при помощи проекции «полуширота» теоретического чертежа, проведя на нём след от пересечения водной поверхности с корпусом. Для этого необходимо знать, в какой точке профиля волны (на каком расстоянии от гребня волны) вертикальное расстояние между поверхностью воды и основной плоскостью судна соответствует аппликате той или иной теоретической ватерлинии. Во втором приближении профиль волны у борта судна может быть представлен, как косинусоида, рассчитанная с помощью известной зависимости:

$$z' = \frac{h}{2} \cos\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right), \quad (8)$$

где  $h$  – высота волны.

$z'$  – вертикальное расстояние между уровнем спокойной воды при заданной осадке  $d$  и уровнем воды на профиле волны в точке его пересечения с данной теоретической ватерлинией, имеющей аппликату  $z$ .

$a$  – расстояние по горизонтали от гребня волны до линии, соответствующей расстоянию  $z'$  на профиле волны.

$\lambda$  – прогнозируемая длина волны. Принимается равной расчётной длине судна.

Для обеспечения возможности пересечения поверхности воды на профиле волны с заданной ватерлинией должно соблюдаться условие:

$$z = d + z', \quad (9)$$

где  $z$  – аппликата заданной теоретической ватерлинии.

Отсюда, расстояние  $a$  от гребня волны до точки пересечения взволнованной поверхности воды с той или иной ватерлинией теоретического чертежа, можно оценить по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{2\pi} \arccos \frac{2(z-d)}{h}, \quad (10)$$

При следовании судна с курсовым углом  $q$  по отношению к волне, в момент, когда гребень проходит через миделевое сечение корпуса (рис. 1) носовая или кормовая ветвь любой теоретической ватерлинии, описываемая математической зависимостью вида (6), пересекается с поверхностью воды на профиле волны в точке  $C$ , находящейся на расстоянии  $a$  от гребня волны. Эта точка, в свою очередь, находится на расстоянии  $X_1$  от точки пересечения рассматриваемой теоретической ватерлинии с форштевнем судна. Ордината этой точки –  $Y_1$ .

$$X_1 = \frac{L_{ВЛ}}{2} - x, \quad (11)$$

где  $L_{ВЛ}$  – длина конкретной расчётной ватерлинии судна, полученная с теоретического чертежа.

$x$  – абсцисса точки пересечения поверхности профиля волны с одной из теоретических ватерлиний. В данном случае абсциссы отсчитываются от начала координат, расположенного на миделе судна. Линию, соответствующую уровню воды на профиле двухмерной синусоидальной волны на уровне ватерлинии, можно выразить зависимостью:

$$Y_1 = X_1 \cdot \tan(90 + q) - \frac{L}{2} \cdot \cot q + \frac{a}{\sin q} \quad (12)$$

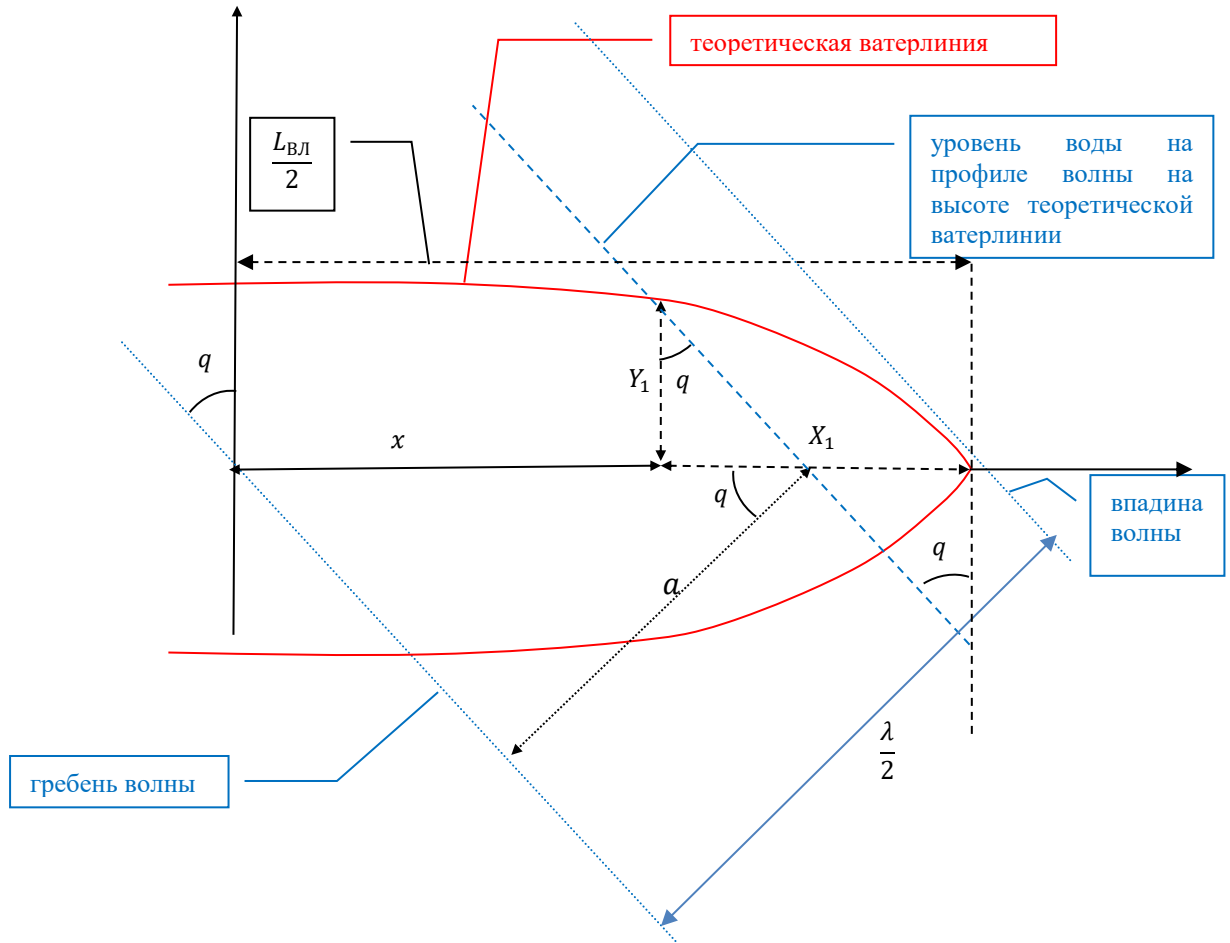


Рисунок 1 – Определение координат точки пересечения поверхности воды на профиле волны с теоретической ватерлиней

Для определения расстояний  $X_1$  и  $Y_1$  приравняем правые части уравнений (6) и (12). Выполнив преобразования, получим:

$$A \cdot X_1^3 + BX_1^2 + (C - \tan(90 + q)) \cdot X_1 + \frac{L}{2} \cdot \cot q - \frac{a}{\sin q} + D = 0 \quad (13)$$

Для решения уравнения (13) можно использовать другой онлайн-калькулятор [5] той же серии. Определив значение  $X_1$ , находим значение  $Y_1$ , используя выражение (12). Повторяем вычисления для каждой ватерлинии на теоретическом чертеже, получая координаты точек, в которых эти ватерлинии пересекаются с взволнованной поверхностью воды. Затем с помощью калькулятора [4] подбираем функцию, описывающую эту ватерлинию и, подставив её в зависимость (5) вместо  $y$ , рассчитываем  $I_x$  на волне отдельно для левого и правого борта в носовой и кормовой частях корпуса. Прибавив значение момента инерции

для цилиндрической вставки, получаем значение  $I_x$  ватерлинии на волне. Его можно использовать в формуле (3). Сравнив значение GM на спокойной воде с значением  $GM_{min}$  на волнении, получаем  $\delta GM$  для формулы (4). Рассчитав изменения метацентрической высоты для разных курсовых углов волны, сравниваем минимальное из этих значений с требованиями формул (2) и (4).

#### Список литературы:

1. International Code of Intact stability. – URL: <https://deckofficer.ru/titul/resolutions/item/imo-international-code-on-intact-stability> (дата обращения 21.04.2024)
2. 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 21.04.2024)
3. MSC.1/Circ.1652 26 – Explanatory notes to the Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability Criteria. – URL: [https://puc.overheid.nl/PUC/Handlers/DownloadDocument.ashx?identifier=PUC\\_743708\\_14&versionnummer=1&type=pdf&ValChk=H\\_CVidw\\_4r2094jI45UvwQTEqBT3USaMkmeblfKvw5g1](https://puc.overheid.nl/PUC/Handlers/DownloadDocument.ashx?identifier=PUC_743708_14&versionnummer=1&type=pdf&ValChk=H_CVidw_4r2094jI45UvwQTEqBT3USaMkmeblfKvw5g1) (дата обращения 21.04.2024)
4. Онлайн калькулятор Planetcalc. – URL: <https://planetcalc.ru/5992/> (дата обращения: 21.04.2024)

