УДК 629.5.015.14

DOI: 10.37890/jwt.vi88.727

Практический анализ риска возникновения «чистой» потери остойчивости при заливании палубы на примере судна «OLYMPIC INTERVENTION IV»

М.В. Осокин
ORCID: 0009-0003-7596-6993
М.В. Жуков
Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Обязательные минимальные критерии остойчивости судна, предписанные Международным кодексом по остойчивости судов в неповреждённом состоянии, базируются на статистике аварий и не учитывают размеры и особенности обводов корпусов конкретных судов при расчёте их поведения в условиях волнения. С момента принятия кодекса в 2008 году учёными разных стран выполнен большой объём исследований по оценке динамической остойчивости судов различных типов в условиях волнения. Современное математическое моделирование позволяет достаточно точно прогнозировать поля ветрового волнения и зыби в различных районах Мирового океана. Поэтому Комитетом по безопасности мореплавания ИМО принято Предварительное руководство ко второму поколению критериев остойчивости неповреждённого судна в условиях волнения, изложенное в циркулярах №1627 и №1652. В них сказано о том, что для определённых судов методы расчёта некоторых критериев, могут давать недостоверные результаты. В частности, это актуально для низкобортных судов, подверженных заливанию открытой палубы при расчёте так называемой «чистой» потери остойчивости. Данная статья посвящена попытке уточнения методов расчёта уязвимости остойчивости низкобортных судов по указанному критерию.

Ключевые слова: второе поколение критериев остойчивости неповреждённого судна, чистая потеря остойчивости, момент инерции действующей ватерлинии, заливание палубы судна.

A practical analysis of the risk of pure loss of stability during deck flooding using the example of the vessel «OLYMPIC INTERVENTION IV»

Mikhail V. Osokin
ORCID: 0009-0003-7596-6993
Maxim V. Zhukov
Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The mandatory minimum ship stability criteria prescribed by the International Intact Stability Code are based on accident statistics and do not take into account the dimensions and hull contours of specific ships when calculating their performance in rough seas. Since the Code's adoption in 2008, scientists from various countries have conducted extensive research assessing the dynamic stability of various types of ships in rough seas. Modern mathematical modeling allows for the accurate prediction of wind-induced wave and swell fields in various regions of the world's oceans. Therefore, the IMO Maritime Safety Committee adopted Interim Guidelines on the Second Generation Intact Stability, as set out in Circulars No. 1627 and No. 1652. These guidelines state that for some vessels, the calculation methods for some criteria may yield unreliable results. This is particularly true

for low-sided vessels susceptible to open deck flooding when calculating the so-called pure loss of stability. This article attempts to refine the methods for calculating the stability vulnerability of low-sided vessels using this criterion.

Keywords: second generation of intact stability criteria, pure loss of stability, moment of inertia of the current waterline, flooding of the ship's deck.

Введение

Обеспечение безопасности мореплавания, в частности – соблюдение норм остойчивости судна, является фундаментальной задачей при проектировании и эксплуатации морских судов. Обязательные критерии остойчивости, изложенные в части А ныне действующего Кодекса [1] основаны на статистике аварий и предполагают некую универсальность, то есть должны подходить для всех судов наиболее распространённых типов, независимо от обводов корпуса. Современные нормы динамической остойчивости на волне, разрабатываемые Международной морской организацией (IMO), изложенные в [2] и уточняемые в [3], основаны на проводимых в последние годы научных исследованиях в области влияния морского волнения на остойчивость судна, подобных [4]. Среди пяти основных режимов уязвимости остойчивости, учитываемых в критериях второго поколения (Second Generation Intact Stability Criteria), особое место занимает так называемая «чистая» потеря остойчивости (Pure Loss of Stability). Данное явление становится особенно сложным для прогнозирования, когда движение судна в условиях волнения сопровождается заливанием открытых участков палубы, что, характерно для судов, предназначенных для обслуживания буровых платформ с надстройкой в носовой части корпуса, низким надводным бортом и большой протяжённостью палубы-площадки, расположенной за надстройкой в сторону кормы, таких как рассматриваемое в качестве примера в данной статье судно «OLYMPIC INTERVENTION IV», построенное по проекту ULSTEIN P101. В циркуляре Комитета по безопасности мореплавания ИМО [2] упомянуты ограничения, присущие приводимым в нём методам оценки остойчивости с точки зрения различных видов уязвимостей. В том числе, в нём сказано, что критерий уязвимости остойчивости для режима «чистой» потери остойчивости дает недостоверные результаты для судов с низким надводным бортом, а в [3] уточняется, что речь идёт как раз о судах, подобных рассматриваемому в данной статье.

Физический смысл «чистой» потери остойчивости

Так называемая «чистая» потеря остойчивости — динамическое явление, которое возникает, когда у судна, имеющего развал бортов в оконечностях корпуса, эти оконечности попадают на впадины достаточно длинных волн. Явление особенно выражено, когда длина последних близка к длине судна. Гребни волн при этом оказываются на цилиндрической вставке, где борта вертикальны и ординаты действующей ватерлинии не зависят от уровня воды у борта. С одной стороны, в этом положении распределение сил плавучести по длине корпуса меняется по сравнению со спокойной водой. Если волна имеет длину, близкую по значению к длине судна, а её вершина находится в районе миделя, нос и корма оказываются вблизи подошв соседних волн, что приводит к значительному уменьшению сил плавучести в оконечностях с одновременным их увеличением в средней части корпуса. Такое перераспределение сил плавучести оказывает влияние на общую прочность корпуса. С другой стороны, если не учитывать вертикальную качку и влияние на корпус сил инерции, при расчёте остойчивости величина и аппликата точки приложения равнодействующей сил плавучести на волне не сильно меняются по сравнению с таковыми на спокойной воде, так как рост аппликат точек приложения сил плавучести в районе миделя (на гребне волны) компенсируется их уменьшением в оконечностях

(на впадинах волн). Однако, при этом у судна, имеющего развал бортов в оконечностях корпуса, из-за понижения уровня воды у борта в этих местах уменьшаются ординаты действующей ватерлинии. Как известно, значение метацентрического радиуса (влияющего на значение аппликаты поперечного метацентра) прямо пропорционально моменту инерции действующей ватерлинии относительно её продольной оси, зависящему от интеграла кубов ординат ватерлинии по её длине. В циркуляре [2] для оценки уязвимости по «чистой» потере остойчивости судна, обладающего достаточно высоким надводным бортом на первом уровне (под этим термином подразумевается наихудший теоретический случай, когда волнение условно принимается регулярным) предлагается рассчитывать изменение метацентрической высоты через изменение метацентрического радиуса с помощью момента инерции действующей ватерлинии при осадке, равной:

$$d_L = d - \delta d_L, \quad (1)$$

где $\delta d_L = d - 0.25 d_{full}$ или $\delta d_L = {}^{0.034L}/_{2}$, что меньше.

Здесь d – средняя осадка судна при данной загрузке на спокойной воде.

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

При этом $d - 0.25 d_{full}$ не может быть меньше нуля.

L – величина, принимаемая равной 96% длины судна по ватерлинии, проходящей на высоте, равной 85% расчётной высоты борта, измеренной от верхней кромки киля, или длине от передней кромки форштевня до оси баллера руля по той же ватерлинии, если эта длина больше.

Как видим, в этом случае высота волны принимается такой, что вода не попадает на открытую палубу и изменение момента инерции действующей ватерлинии происходит только из-за развала бортов. В случае заливания палубы у судна, обладающего низким надводным бортом и большой протяжённостью открытой палубы, та часть последней, которая оказывается под водой, должна вычитаться из площади действующей ватерлинии, что приводит к уменьшению длины ватерлинии на длину заливания и ординат ватерлинии на заливаемом участке корпуса до нуля и дополнительно уменьшает упомянутый момент инерции. Одними из ключевых параметров остойчивости являются метацентрическая высота (GM) и, как следствие, плечи восстанавливающего момента (GZ), значения которых зависят от аппликаты метацентра, а значит – метацентрического радиуса. У судна, находящегося серединой корпуса на вершине волны, величина GM может упасть ниже лимитирующего значения (согласно циркуляру [2] оно составляет 0,05 м) или даже стать отрицательным. Если в это время внешний кренящий момент, воздействующий на судно, превысит восстанавливающий, судно потеряет остойчивость. Опасность усугубляется тем, что при потере остойчивости на вершине попутной волны судно имеет низкую относительную скорость по сравнению с фазовой скоростью волны, а значит, держится в этом положении относительно гребня достаточно долго, не имея запаса времени для восстановления остойчивости, которое произойдёт при смещении гребней волн вдоль корпуса в более благоприятное с точки зрения остойчивости положение. Для судов с протяженной открытой палубой и низким надводным бортом (low weather deck), таких как морские снабженцы (Offshore Supply Vessels — OSV) суда типа ULSTEIN P101, проблема «чистой» потери остойчивости тесно связана с этим эффектом. При этом наличие фальшбортов на открытой палубе может способствовать временному удержанию на ней воды, которая попадает туда при захлестывании палубы волнами с кормы. Присутствие воды на палубе создаёт двойственный эффект:

– Увеличение периода бортовой качки (при потере остойчивости – иногда до «зависания» судна на максимальном угле крена). Ухудшение остойчивости уменьшает ускорения при качке и, соответственно, силы инерции, действующие на судно и всё, что на нём находится, включая

людей, и таким образом формально повышает комфорт и безопасность в некоторых режимах плавания.

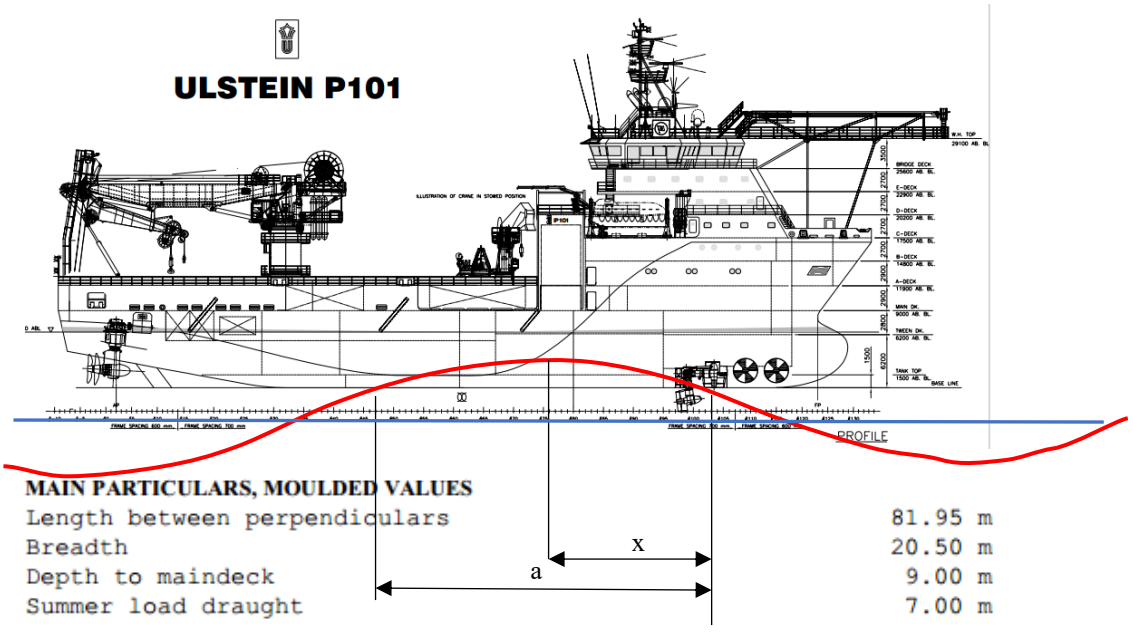
– Потеря или значительное снижение поперечной остойчивости сами по себе являются негативными факторами. При использовании в расчётах так называемого метода приёма груза вода, попавшая на палубу, расположенную выше ватерлинии, считается действующей, как жидкий груз с большой свободной поверхностью, «поднимая» центр тяжести всего судна. При использовании метода постоянного водоизмещения, как указано выше, учитывается уменьшение метацентрического радиуса из-за уменьшения момента инерции действующей ватерлинии, что формально «опускает» метацентр. В любом случае происходит уменьшение плеча восстанавливающего момента. В отличие от цистерн, ширина свободной поверхности на палубе ограничена только шириной судна, что создает максимально возможный отрицательный момент инерции свободной поверхности. Более того, в отличие от приема груза ниже ватерлинии (а точнее – нейтральной плоскости, находящейся в зависимости от метацентрической высоты ниже и вблизи или значительно ниже ватерлинии), где вес жидкости, даже имеющей свободную поверхность, частично улучшает остойчивость, прием воды на палубу всегда её уменьшает.

Оценка уязвимости по критерию «чистой» потери остойчивости для низкобортных судов с протяженной открытой палубой на примере судна «OLYMPIC INTERVENTION IV»

Основные характеристики и схематичное изображение судна представлены на рисунке 1. Модельные эксперименты, проведенные для судов типа OSV, показали, что классическая картина «чистой» потери остойчивости, предсказанная теорией, для судов с низким надводным бортом и длинной открытой палубой может не реализовываться. Вместо этого доминирующим фактором становится влияние заливания палубы. Было подтверждено, что для судов с длиной открытой палубы, составляющей более 0.4 длины между перпендикулярами (LPP) и отсутствием полного ограждения палубы фальшбортом, стандартные критерии «чистой» потери остойчивости применяться не должны, так как реальная опасность заключается в потере остойчивости из-за скопления воды на палубе. Для оценки степени дополнительного влияния заливания палубы на остойчивость в процессе эксплуатации судна с использованием имеющейся на борту документации можно предложить метод, описанный ниже. Примем следующие допущения:

– реальный профиль ветровой волны, близкий к несимметричной трохоиде, заменяется косинусоидой с амплитудой, равной половине высоты волны и осью абсцисс, находящейся на уровне ватерлинии на спокойной воде (красная линия на рис. 1),

– вертикальная качка отсутствует.



MAIN PARTICULARS, MOULDED VALUES

Length between perpendiculars	81.95 m
Breadth	20.50 m
Depth to maindeck	9.00 m
Summer load draught	7.00 m

DEADWEIGHT AT SUMMER LOAD DRAUGHT

Deadweight	3782 T
Block coefficient	0.703
Displacement, moulded	8479 T
Displacement, total	8517 T
Volume, moulded	8272 m3
Volume, total	8309 m3

Рис. 1. Схематичное изображение и общие характеристики судна «OLYMPIC INTERVENTION IV»

Уравнение такой косинусоиды можно записать в виде:

$$y = \frac{h}{2}\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где h – высота волны.

λ – длина волны.

y - вертикальное расстояние между уровнем спокойной воды при заданной осадке и уровнем воды на профиле волны в точках его пересечения с кромкой открытой палубы. В данном случае принимается равным высоте надводного борта на спокойной воде.

x – горизонтальное расстояние от вершины профиля волны до точки пересечения этого профиля с кромкой открытой палубы (половина длины заливаемой части палубы).

Приняв $2\pi = 360$, подставив значения h и λ и задавшись значением y , равным высоте надводного борта на спокойной воде, по формуле (2) можно найти значение x и длину заливаемой части палубы $a = 2x$. Тогда величина потерянного из-за заливания момента инерции действующей ватерлинии будет равна:

$$dI_x = \frac{aB^3}{12}, \quad (3)$$

где B – ширина судна.

Потеря метацентрической высоты из-за заливания палубы составит:

$$dGM = \frac{dI_x}{V}, \quad (4)$$

где V – объёмное водоизмещение судна при данной осадке.

В качестве примера приведём оценку влияния на «чистую» потерю остойчивости из-за заливания палубы для рассматриваемого судна волны с характеристиками, взятыми из таблицы распределения вероятности возникновения ветровых волн с определёнными высотами и периодами для Северной Атлантики, приведённой в [2]. Согласно этой таблице волны с $h = 4.5$ м и $\lambda = 87.8$ м (длина волны, соответствующая периоду 7.5 секунд, близкая к длине судна), которые в принципе могут обеспечить заливание палубы при высоте надводного борта 2 м (если принять, что судно сидит по летнюю осадку, см. его основные характеристики на рис. 1) обладают вероятностью появления около 1,4 % (1354 случая на 100000 наблюдений). По той же таблице вероятность появления волн с такой же длиной, но высотой 5,5 м составляет около 0,5 %, волны большей длины высотой 4,5 м с большой долей вероятности не будут заливать палубу (кроме случаев наличия гармонического резонанса качки), а волны меньшей длины будут обладать высотой, меньшей, чем удвоенная высота надводного борта на спокойной воде, что делает рассмотрение таких случаев с точки зрения темы данной статьи бессмысленным. По формуле (2) для рассматриваемой волны получаем x =6.5 м, по формуле (3) $dI_x = 455$ м^4, по формуле (4) $dGM = 0.055$ м. То есть из-за возможного заливания палубы при рассматриваемых параметрах волнения метацентрическая высота для данного судна при данной загрузке может уменьшится на 5,5 см по сравнению с метацентрической высотой на тихой воде с вероятностью 1,4%. При наличии теоретического чертежа судна можно найти ординаты точек пересечения его действующей ватерлинии на волне с теоретическими ватерлиниями в оконечностях корпуса и оценить дополнительную потерю остойчивости на волне из-за развала бортов по методике, изложенной в [5], после чего найти минимально допустимое значение метацентрической высоты на тихой воде для рассматриваемого судна при данной загрузке в заданных условиях волнения.

Заключение

Анализ проблемы «чистой» потери остойчивости для судов типа OSV показывает, что традиционные подходы к оценке безопасности, основанные только на диаграммах статической остойчивости, недостаточны. Заливание палубы и учёт влияния развала бортов на остойчивость на волне вносит коренные изменения в динамику поведения судна. С одной стороны, слой воды на палубе может выступать в роли демпфера качки, с другой — создает постоянную угрозу потери остойчивости из-за возникновения дополнительного кренящего момента и снижения запаса восстанавливающего момента. Для обеспечения безопасной эксплуатации судна «OLYMPIC INTERVENTION IV» необходим комплексный подход, включающий:

– Учет специфики архитектуры (наличие протяженной низкой палубы) при разных вариациях загрузки.

– Использование современных методов математического моделирования, учитывающих динамическое воздействие на остойчивость возможного наличия воды на палубе.

– Тщательный анализ разрешенных эксплуатационных режимов, особенно при движении на попутном волнении.

Только понимание сложных гидродинамических процессов, а не следование устаревшим упрощенным правилам, способно гарантировать безопасность экипажа и дорогостоящего оборудования в современных морских операциях.

Список литературы

1. International Code of Intact stability 2008. Fourth Edition. 2020 – URL: https://deckofficer.ru/titul/resolutions/item/imo-international-code-on-intact-stability / (дата обращения 11.05.2026).
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 11.05.2026).
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&versienummer=1&type=pdf&ValChk=H_CVidw_4r2094jI45UvwQTEqBT3USaMkmeb1fKvw5g1 / (дата обращения 11.05.2026).
4. Кутейников М.А. О возможности интеграции критериев остойчивости второго поколения ИМО в систему комплексного нормирования мореходности. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025;1(80): с. 64-74. EDN: EIPDXD.
5. Осокин М.В., Хвостов Р.С. Способ определения момента инерции ватерлинии для оценки остойчивости судна на волнении / Речной транспорт (XXI век). 2020. № 3 (95). С. 40-43.

References

1. International Code of Intact stability 2008. Fourth Edition. 2020 – URL: https://deckofficer.ru/titul/resolutions/item/imo-international-code-on-intact-stability / (data obrashcheniya 11.05.2026).
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 / (data obrashcheniya 11.05.2026).
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&versienummer=1&type=pdf&ValChk=H_CVidw_4r2094jI45UvwQTEqBT3USaMkmeb1fKvw5g1 / (data obrashcheniya 11.05.2026).
4. Kuteinikov M.A. O vozmozhnosti integratsii kriteriev ostoichivosti vtorogo pokolenija IMO v sistemu kompleksnogo normirovanija morekhodnosti. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. 2025;1(80): p. 64-74. EDN: EIPDXD.
5. Osokin M. V., Zhukov M. V. Sposob opredelenija momenta inercii vaterlinii dlja ocenki ostoichivosti sudn na volnenii / Rechnoi transport (XXI vek). 2020.No. 3 (95). p. 40-43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Осокин Михаил Викторович, к.т.н., доцент, доцент кафедры Судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: capmo@mail.ru

Mikhail V. Osokin, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Navigation, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Жуков Максим Валерьевич, аспирант кафедры Судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: zhukoff.m2016@yandex.ru

Maxim V. Zhukov, graduate student of the Department of Navigation , Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 26.05.2026; принята к публикации 22.06.2026; опубликована онлайн 20.09.2026. Received 26.05.2026; published online 20.09.2026.