УДК 629.5. 017
С 60

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО НОРМИРОВАНИЮ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук, проф.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Приведены новые предложения по общим подходам к нормированию остойчивости судов на попутном волнении. Показано, что в отличие от ранее известных работ, новые нормативы должны формироваться из условия равенства вероятностей отказа (в данном случае — опрокидывания) на попутном волнении и в хорошо изученной ситуации положения судна лагом к набегающим волнам.

Ключевые слова: остойчивость судна, попутное волнение, опрокидывание, вероятность опрокидывания, отказ.

Анотація. Наведені нові пропозиції щодо загальних підходів до нормування остійності суден на попутному хвилюванні. Показано, що на відміну від раніше відомих робіт, нові нормативи мають формуватися з умови рівності ймовірностей відмови (у даному випадку — перекидання) на попутному хвилюванні та в умовах добре вивченої ситуації положення судна лагом до хвиль, що набігають на нього.

Ключові слова: остійність судна, попутне хвилювання, перекидання, ймовірність перекидання, відмова.

Abstract. In this article we propose new general methods for the determining of ship stability standards while following sea. According to this method, new standards have to be formed on the basisof equivalence of the capsizing probabilities for the following sea and in well known situation when a ship turns broadside on an incoming wave.

Keywords: shipstabiliti, longitudinal waves, capsizing, capsizing probability, failure.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Плавание на попутном волнении может представлять значительную опасность для судов из-за возможности опрокидывания. Это ставит вопрос о разработке норм остойчивости именно для такой расчетной ситуации. Хотя такие попытки и известны [1, 5], все же соответствующие нормативы не были признаны достаточно убедительными и не были включены в Правила классификационных обществ, несмотря на то, что качество нормативов из работы [5] было проверено в этой же работе по схеме Н.Б. Севастьянова [10].

Возможной причиной здесь может быть утрата преемственности между хорошо изученными нормативами остойчивости для положения судна лагом к волнам и относительно менее изученными нормативами остойчивости на попутном волнении. Поэтому представляются актуальными такие дальнейшие исследования в этом направлении, в которых принималась бы во внимание преемственность между нормами остойчивости судна на попутном волнении и для положения судна лагом к набегающим волнам.

На попутном волнении для судна возможно возникновение таких трех опасных ситуаций [1, 5, 17]:

потеря остойчивости из-за снижения плеча статической остойчивости на вершине попутной волны;

потеря остойчивости из-за интенсивной субгармонической бортовой качки на попутном волнении;

захват судна попутной волной с последующей утратой управляемости, разворотом лагом к волнам и с возможным появлением опасных в плане остойчивости гидродинамических кренящих моментов.

В данной работе сосредоточимся на первой ситуации. Вторую ситуацию рассмотрим в одной из последующих работ, а третья анализировалась ранее [13].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для проверки остойчивости проектируемого корабля на попутном волнении в литературе известны два способа, которые будем далее именовать «временной» и «силовой». «Временной» способ, использованный в работе [1], регламентирует время нахождения корабля на вершине волны в состоянии пониженной остойчивости. Этот способ может быть применен только для положения судна на попутном волнении, но не для положения лагом к волнам. Очевидно, что обеспечить преемственность расчетных схем и методик по отношению к расчетам остойчивости при положении судна лагом к волнам в этом случае не удается.

«Силовой» способ основан на сопоставлении опрокидывающего и кренящего моментов и с точностью до обозначений не отличается от общепринятого способа проверки остойчивости в положении лагом к волнам. Но если рассматривается попутное волнение, то в зависимостях «силового» способа при определении опрокидывающего момента дополнительно учитывается время нахождения корабля в состоянии пониженной остойчивости. Такой подход предложен ученым Ю.И. Нечаевым [5].

В литературе известны два подхода к определению качества разработанных норм. Первый, предложенный в 1968 г. Н.Б. Севастьяновым [10], основан на совпадении результатов нормирования с прошлым опытом, а в работах [11, 12] развивается общая теория нормирования свойств и качеств судна при его проектировании. В рамках этой теории идеальными (оптимальными) признаются такие нормы, которые представляют собой оптимальный компромисс между экономической эффективностью проектируемого судна и безопасностью его плавания [11]. В работе [12] была предложена общая схема дополнения существующих (и предполагаемых оптимальными) норм новыми расчетными ситуациями из условия равенства времен наработки на отказ. В ряде частных случаев условие равенства времен наработки на отказ переходит в равенство вероятностей отказа [12]. В общем случае общая схема работы [12] должна конкретизироваться для той или иной задачи нормирования. Так, в работе [13] реализована эта схема на примере последней из числа указанных выше ситуаций — захвата малого скоростного судна попутной волной.

Критерии качества норм [10] и [11] совпадают между собой тогда, когда для всех попавших в выборку и исследуемых по схеме [10] судов наличествует оптимальный компромисс между экономикой и безопасностью плавания. Очевидно, что такое утверждение проблематично как доказать, так и опровергнуть. Ближе друг к другу критерии качества норм, предложенные Н.Б. Севастьяновым в [10] и автором этой статьи в [12]. Но возможности нашего способа более широкие, и обосновать этот тезис можно на таком примере.

По схеме работы [10] предложенные в работе [5] нормы остойчивости на попутном волнении (соотношение между кренящим и опрокидывающим моментами) сопоставлялись в этой же работе с требованиями норм Регистра бывшего СССР. Требования Регистра были основаны на формуле (2), когда норматив $[I_{\theta\max}]$ определялся по статистической схеме Я. Рахола [3]. Но однозначного суждения о соотношении между предложенными и прежними нормами в работе [5] получить не удалось. Дело в том, что предложенные в [5] физические нормы остойчивости на попутном волнении не оказалось возможным в рамках способа [10] сопоставить с физической частью норм Регистра для положения судна лагом к волнам (с критерием погоды). Соответственно преемственности между существующими и вновь разработанными нормами в этом случае не получилось. Кроме того, имеются и такие схемы нормирования остойчивости, которые содержат только физические нормативы остойчивости в положении лагом к волнам. В таких случаях применить схему [10] для проверки качества вновь разработанных норм остойчивости на попутном волнении невозможно в принципе. А предлагаемый способ позволяет построить новые физические нормы остойчивости на попутном волнении на основе предполагаемых оптимальными физических норм остойчивости судна в положении лагом к волнам.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕРЕШЕННЫХ РАНЕЕ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

В соответствии со сказанным представляет интерес задача о реализации схемы работы [12] для первой и отчасти второй из указанных выше применительно к попутному волнению расчетных ситуаций. Поэтому в данной работе рассмотрим возможный вариант дополнения схемы нормирования предельной скорости ветра, выдерживаемой проектируемым судном в положении лагом к ветру и волнению [9, 14], новой расчетной ситуацией — ходом судна на попутном волнении.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является разработка основных подходов к нормированию остойчивости судна на попутном волнении на основе принципа приравнивания времен наработки на отказ (в частных случаях — приравнивание вероятностей отказа), когда соблюдается преемственность между нормами остойчивости при положении судна лагом к волнам и на попутном волнении. Этот принцип, изложенный в общей форме в работе [12], будет далее конкретизирован применительно к задаче нормирования остойчивости на попутном волнении.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Далее условимся, что величины, существенные как для попутного волнения, так и для положения судна лагом к волнам, будут снабжены специальными нижними индексами. Для попутного волнения, при равном 0 курсовом угле φ_K относительно волн это будет индекс «0», а для положения лагом к волнам, когда соответствующий курсовой угол равен $\pi/2$, это будет индекс «$\pi/2$».

При проверке остойчивости на попутном волнении сопоставляются фактически выдерживаемая судном на попутном волнении предельная скорость шквалистого ветра u_{B0}, когда вектор скорости ветра перпендикулярен ДП судна, и нормативная предельная скорость ветра $[u_{B0}]$, выдерживаемая судном на попутном волнении. Условие достаточной остойчивости имеет в этом случае такой вид [5, 9]:

$$u_{\text{В}0} \ge [u_{\text{В}0}];$$

$$u_{\text{В}0} = k_1 k_2 \sqrt{\frac{M_0([h_{30}],[\tau_{c0}])}{\left(A_u - B_u \theta_{\text{mд}}\right) A_v C_0 S_{\text{П}}}};$$

$$\theta_{\text{mд}} \approx 0{,}5(\theta_{m\text{СВВ}} + \theta_{m\text{СПВ}});\ \theta_{m\text{СВВ}} \approx 0{,}85\theta_{\text{ЗВВ}};\ \theta_{m\text{СПВ}} \approx 0{,}85\theta_{\text{ЗПВ}};\ A_v \approx 1{,}0 + 0{,}9\frac{v}{u_{\text{В}}};$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{2}{C_Y \rho_{\text{ВЗ}}}};\, k_2 = 1{,}12 - 0{,}02(z_{\text{П}} - T),\ \ z_{\text{П}} \text{ и } T \text{ — в метрах};$$

$$A_u = z_{\text{П}} - \frac{z_g}{2} - \frac{T}{4};\ B_u = 0{,}155(z_{\text{П}} - T).$$

В этой формуле обозначено:

M_0 ($[h_{з0}]$, $[\tau_{c0}]$) — расчетный опрокидывающий момент на попутном волнении, определяемый в функции нормативной высоты волны 3%-й обеспеченности $h_з = [h_{з0}]$ и нормативного среднего периода волнения $\tau_c = [\tau_{c0}]$; $S_{\text{П}}$ — площадь парусности судна; $z_{\text{П}}$, z_g — аппликаты центра парусности и центра тяжести судна; T — осадка; v — скорость хода судна; A_v — поправка на влияние угла атаки; $C_Y \approx 1{,}2 – 1{,}3$ — коэффициент неинерционной аэродинамической боковой силы; $\rho_{\text{ВЗ}}$ — плотность воздуха.

Кроме того, здесь $\theta_{m\text{СВВ}}$, $\theta_{m\text{СПВ}}$ — углы, отвечающие максимумам диаграмм средних моментов (средних плеч) на вершине и на подошве волны соответственно и примерно равные углам опрокидывания при динамическом крене; $\theta_{m\text{ЗПВ}}$, $\theta_{m\text{ЗВВ}}$ — углы заката диаграмм статической остойчивости на подошве $I_{\theta\text{ПВ}}$ и на вершине $I_{\theta\text{ВВ}}$ соответственно, $\theta_{\text{ЗПВ}} \le 65°$, $\theta_{\text{ЗВВ}} \le 65°$. Коэффициент $C_0 \approx 0{,}7$ учитывает снижение давления ветра из-за перехода от лагового волнения к попутному [5, 8]. Соотношения между углами максимумов диаграмм средних моментов на вершине $\theta_{m\text{СВВ}}$ на подошве волны и $\theta_{m\text{СПВ}}$ и между углами заката диаграмм статической остойчивости на вершине $\theta_{\text{ЗВВ}}$ и на подошве волны $\theta_{\text{ЗПВ}}$ приняты в соответствии с выводами работы [14].

В этом случае решить задачу нормирования остойчивости на попутном волнении означает найти ответ на такие два вопроса:

чему будут равны нормативная скорость выдерживаемого кораблем на попутном волнении шквалистого ветра $[u_{\text{В}0}]$, нормативная высота волны 3%-й обеспеченности $[h_{30}]$ и нормативный средний период $[\tau_{c0}]$ (или как величины $[u_{\text{В}0}]$, $[h_{30}]$ и $[\tau_{c0}]$ будут соотноситься с аналогичными и известными из действующих норм величинами для лагового волнения $[u_{\text{В}\pi/2}]$, $[h_{3\pi/2}]$ и $[\tau_{c\pi/2}]$);

как будет определяться с учетом нерегулярности волнения опрокидывающий момент на попутном волнении $M_0 = M_0([h_{30}], [\tau_{c0}])$.

Первый вопрос связан с вероятностью встречи судна с тем или иным ветроволновым режимом за срок его службы. Для решения этого вопроса приходится применять как краткосрочные, так и долгосрочные распределения характеристик ветроволнового режима. Второй вопрос связан со значениями характеристик бортовой качки и остойчивости судна в условиях стационарного волнового режима, и для его решения применяются только краткосрочные распределения.

Найдем ответ на первый вопрос. Предположим, что события «судно расположено лагом к волнам» и «судно движется на попутном волнении» образуют полную группу. Это означает, что судно может быть с равной вероятностью расположено лагом к волне или по волне, и никак иначе. Обосновать это допущение можно так. Если изменить курсовой угол φ_K от попутного до лагового (от 0 до $^{\pi}/_2$

для правой раковины или от 0 до $^{3\pi}/_{2}$ для левой раковины), то, с одной стороны, уменьшаются обусловленные волнением отрицательные поправки к диаграмме средних моментов, а с другой стороны θ становится более интенсивной бортовая качка. В сумме обе эти поправки в значительной мере взаимно компенсируются, а в диапазонах курсовых углов $^{\pi}/_{4} \le \varphi_K \le {}^{3\pi}/_{4}$ или $5^{\pi}/_{4} \le \varphi_K \le {}^{7\pi}/_{4}$ можно использовать определяющие остойчивость проектируемого корабля закономерности для лагового волнения. При этом имеем некоторую разумную погрешность в безопасную сторону [6, 8].

Пусть A есть случайное событие, состоящее в том, что при единичной вероятности опрокидывания на данном стационарном ветроволновом режиме судно, которое с равной вероятностью может оказаться как в положении лагом к волнам, так и на попутном волнении, опрокидывается на попутном волнении. Соответственно B есть случайное событие, состоящее в том, что при тех же условиях судно опрокидывается в положении лагом к волнам. Пусть вероятность события A есть P_0, а вероятность события B есть $P_{\pi/2}$. В соответствии с определением полной группы событий можно записать, что $P_{\pi/2} + P_0 = 1$. Пусть $\overline{X}$ — вектор главных элементов проектируемого судна, $\{\overline{X}\} = x_i, \forall i \in I$, а $\overline{Y}$ — двухкомпонентный вектор характеристик волнения, $\{\overline{Y}\} = h, \lambda$, где h, λ — высота и длина волны. В этом случае, как показано в [7], на плоскости $h - \lambda$ существует кривая $\Im = \Im(h, \lambda, \overline{X})$, которая разделяет численные значения компоненты вектора $\overline{Y}$ на группы $\overline{Y}_1$ и $\overline{Y}_2$, $\overline{Y}_1 \cup \overline{Y}_2$ таким образом, что

$$\forall y_j \in \overline{Y}_1 \subset \overline{Y} \Rightarrow A; \ \forall y_j \in \overline{Y}_2 \subset \overline{Y} \Rightarrow B,$$

где запись <условие Z> ⇒ <событие Z > читается «выполнение условия Z влечет за собой появление события Z».

Уравнение кривой $\Im = \Im(h, \lambda, \overline{X})$ есть [7]

$$2{,}96\left(\frac{\lambda}{L}-0{,}5\right)-2{,}65\frac{h}{\lambda}-2{,}87\left(\frac{\lambda}{L}-0{,}5\right)^2+62{,}5\left(\frac{h}{\lambda}\right)^2-10{,}7\left(\frac{\lambda}{L}-0{,}5\right)\frac{h}{\lambda}-1{,}0=0, \quad (1)$$

где $L \in \overline{X}$ — длина судна.

Ясно, что если ограничиться простыми гармоническими волнами, то длину волны λ здесь всегда можно заменить однозначно связанными с ней частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}}$$

или периодом $\tau = \sqrt{\dfrac{2\pi\lambda}{g}}$,

где $g = 9{,}8$ м/с^2 — ускорение свободного падения.

Пусть на стационарном волновом режиме высоты и длины волн описываются двумя независимыми распределениями Рэлея. Тогда самые общие соотношения для поиска величин $[u_{\text{В}0}]$, $[h_{30}]$ и $[\tau_{c0}]$ как следует из работы [12], будут:

$$[u_{\text{В}0}],\ [h_{30}],\ [\tau_{c0}]:\ P_0([h_{30}],[\tau_{c0}])\int\limits^{\infty}\int\limits^{\infty}_{\{D_0\}}\int\limits^{\infty} q(\overline{u}_{\text{В}}, h_3, \tau_c)\,d\overline{u}_{\text{В}}\,dh_3\,d\tau_c =$$

$$= P_{\pi/2}([h_{3\pi/2}],[\tau_{c\pi/2}])\int\limits^{\infty}\int\limits^{\infty}_{(D_{\pi/2})}\int\limits^{\infty} q(\overline{u}_{\text{В}}, h_3, \tau_c)\,d\overline{u}_{\text{В}}\,dh_3\,d\tau_c; \quad (2)$$

$$P_0([h_{30}],[\tau_{c0}]) = \text{Вер A} = \frac{\pi}{2[\lambda_{c0}]^2}\int\limits_0^{\infty}\exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left[\left(\frac{h_\lambda(\lambda)}{[h_{c0}]}\right)^2+\left(\frac{\lambda}{[\lambda_{c0}]}\right)^2\right]\right\}\lambda\,d\lambda; \quad (3)$$

$$P_{\pi/2}([h_{3\pi/2}],[\tau_{c\pi/2}]) = \text{Вер В} = \frac{\pi}{2[\lambda_{c\pi/2}]^2}\int_0^\infty \exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left[\left(\frac{h_\lambda(\lambda)}{[h_{c\pi/2}]}\right)^2+\left(\frac{\lambda}{[\lambda_{c\pi/2}]}\right)^2\right]\right\}\lambda d\lambda; \quad (4)$$

$$[h_{c0}] = \frac{[h_{30}]}{2{,}11};\ [h_{c\pi/2}] = \frac{[h_{3\pi/2}]}{2{,}11};\ [\lambda_{c0}] = \frac{\alpha_в([h_{30}])g[\tau_{c0}]^2}{2\pi};\ [\lambda_{c\pi/2}] = \frac{\alpha_в([h_{3\pi/2}]g[\tau_{c\pi/2}]^2}{2\pi},$$

$$\alpha_В(h_3) \approx 0{,}60 + 3\cdot10^{-2}\, h_3 \le 1,\ h_3 \text{ — в метрах;}$$

где $g(\bar{u}_В, h_3, \tau_c)$ — долгосрочный закон совместного распределения средних скоростей ветра $\bar{u}_В$, высот волн 3%-обеспеченности h_3 и средних периодов волнения τ_c; $D_0 = D_0([\bar{u}_{В0}], [h_{30}], [\tau_{c0}])$, $D_{\pi/2} = D_{\pi/2}([\bar{u}_{В\pi/2}], [h_{3\pi/2}], [\tau_{c\pi/2}])$ — границы таких областей в пространстве ветро-волновых режимов $\bar{u}_В - h_3 - \tau_c$. Нижней границе области D_0 принадлежат точки $[\bar{u}_{В0}] = \dfrac{[u_{В0}]}{K_П}$, $[h_{30}]$, $[\tau_{c0}]$, а нижней границе области $D_{\pi/2}$ точки $[\bar{u}_{В\pi/2}] = \dfrac{[u_{В\pi/2}]}{K_П}$, $[h_{3\pi/2}]$, $[\tau_{c\pi/2}]$ (здесь $K_П \approx 1{,}2\ldots1{,}3$ — коэффициент порывистости); $[h_{c0}]$, $[h_{c\pi/2}]$ — нормативные средние высоты волн на попутном волнении и в положении лагом к волнам; $[\lambda_{c0}]$, $[\lambda_{c\pi/2}]$ — нормативные средние длины волн на попутном волнении и в положении лагом к волнам; $h_\lambda(\lambda)$ — функциональная зависимость высоты волны от ее длины, отвечающая кривой $\mathfrak{I} = \mathfrak{I}(h, \lambda, \bar{X})$ и получаемая путем численного решения уравнения (1).

Нижние границы областей D_0 и $D_{\pi/2}$ — $[\bar{u}_{В0}]-[h_{30}]-[\tau_{c0}]$ и $[\bar{u}_{В\pi/2}] - [h_{3\pi/2}] - [\tau_{c\pi/2}]$ в координатах $\bar{u}_В - h_3 - \tau_c$ — могут считаться образованными прямыми линиями. Запись вида «$x_0, y_0, z_0 : f(x, y, z) = a$» читается так: «величины x_0, y_0, z_0 определяются из условия равенства функции $f(x, y, z)$ параметру a». А запись «Вер Z» читается как «вероятность случайного события Z».

Получается, что для отыскания трех неизвестных — $[\bar{u}_{В0}], [h_{30}]$ и $[\tau_{c0}]$ — имеем только одно уравнение (2). Для преодоления этого затруднения возможны разные подходы. Так, проще всего принять, что $[h_{30}] = [h_{3\pi/2}]$ и $[\tau_{c0}] = [\tau_{c\pi/2}]$. В этом случае условие равенства времен наработки на отказ на лаговом и попутном волнении при равной вероятности тех или иных курсовых углов судна по отношению к волнам в течение срока службы судна приводит к следующему условию для определения искомой нормативной скорости ветра $[u_{В0}]$:

$$[u_{В0}]:\ P_{\pi/2}Q_u(\bar{u}_В)\Big|_{\bar{u}_В=\frac{1}{K_П}[u_{В\pi/2}]} = P_0 Q_u(\bar{u}_В)\Big|_{\bar{u}_В=\frac{1}{K_П}[u_{В0}]}, \quad (5)$$

где $Q_u(\bar{u}_В) = \int_{\bar{u}_В}^{\infty} q_u(x)dx$ — обеспеченность средней скорости ветра по полновероятностной схеме.

Это условие при $[h_{30}] = [h_{3\pi/2}]$ и $[\tau_{c0}] = [\tau_{c\pi/2}]$ и служит для определения искомой величины $[u_{В0}]$. А если $P_0 \approx P_{\pi/2}$, то и $[u_{В0}] \approx [u_{В\pi/2}]$. Как показывают выполненные по формуле (2) расчеты, даже при значительной разнице между вероятностями P_0 и $P_{\pi/2}$ различие между скоростями и $[u_{В0}]$ и $[u_{В\pi/2}]$ бывает обычно небольшим. С другой стороны, как по данным аварийной статистики [5], так и по данным расчетов по соотношениям (3)–(4) величины P_0 и $P_{\pi/2}$ отличаются не слишком сильно. Это и позволяет при нормировании в первом приближении принимать, что $[u_{В0}] \approx [u_{В\pi/2}]$.

На последующих этапах нормирования можно принять $[h_{30}] = [h_{3\pi/2}]$ и

$$\tau_{c0} = \pi\sqrt{\frac{10\beta_{в0}h_{30}}{g}};\ \tau_{c\pi/2} = \pi\sqrt{\frac{10\beta_{в\pi/2}h_{3\pi/2}}{g}}.$$

Здесь параметр $\beta_В$, равный $\beta_{В0}$ для попутного и $\beta_{В\pi/2}$ для лагового волнения, определяет среднюю крутизну волн и может колебаться в достаточно широких пределах ($\beta_В = 0,7 - 0,8$ для развивающегося волнения, $\beta_В \approx 1$ для развитого и $\beta_В \approx \approx 1,3 - 1,5$ для затухающего волнения).

Перейдем к определению опрокидывающего момента на попутном волнении M_0. Предварительно отметим, что в соответствии с эмпирической расчетной схемой [5] и с учетом некоторых результатов исследования [17] волновая поправка к плечу статической остойчивости на чисто попутном волнении $\Delta l_{\theta В}^{(\omega)}$ как функция высоты волны h, длины волны λ и угла крена θ может быть приближенно представлена в следующем виде:

$$\Delta l_{\theta В}^{(\omega)}(h,\ \theta,\ \overline{X},\ \omega) \approx \Delta l_{\theta В}(h,\ \theta,\ \overline{X})\varphi_\omega\left(\frac{\omega}{\omega_L}\right) \approx \Delta l_{\theta В}(h,\ \theta,\ \overline{X})\varphi_\lambda\left(\frac{\lambda}{L}\right); \quad (6)$$

$$\Delta l_{\theta В}(h,\ \theta,\ \overline{X}) = B \cdot 10^{-2}\left[\Phi_l(C_h, \theta) + \sum_{i=1}^{14} A_i(\overline{X}) f_i(\theta)\right]; \quad (7)$$

$$\varphi_\lambda\left(\frac{\lambda}{L}\right) = 0,8\frac{\lambda}{L},\ 0 < \frac{\lambda}{L} < 0,75;\ \varphi_\lambda\left(\frac{\lambda}{L}\right) = 0,6 + 0,23\left(\frac{\lambda}{L} - 0,75\right),\ 0,75 \le \frac{\lambda}{L} \le 0,92;$$

$$\varphi_\lambda\left(\frac{\lambda}{L}\right) = 1,0,\ 0,92 \le \frac{\lambda}{L} \le 2,0;\ \varphi_\lambda\left(\frac{\lambda}{L}\right) = \left(\frac{2L}{\lambda}\right)^3,\ \frac{\lambda}{L} \ge 2,0.$$

Здесь принято, что $\Delta l_{\theta В}^{(\omega)} = \Delta l_{\theta ВВ}^{(\omega)}$ на вершине волны и $\Delta l_{\theta В}^{(\omega)} = \Delta l_{\theta ПВ}^{(\omega)}$ на подошве волны. Кроме того, в формуле (7) обозначено: B — ширина судна, $B \in \overline{X}$, $A_i(\overline{X})$ — некоторые эмпирические функции вектора главных элементов судна $\overline{X}$, [5], $\Phi_i(C_h, \theta)$, $f_i(\theta)$ — эмпирические функциональные зависимости [5], $\omega_L = \sqrt{\dfrac{2\pi g}{L}}$, $\dfrac{\omega}{\omega_L} = \sqrt{\dfrac{L}{\lambda}}$, функция $\varphi_\omega\left(\dfrac{\omega}{\omega_L}\right)$ получается из функции $\varphi_\lambda\left(\dfrac{\lambda}{L}\right)$ путем замены λ/L на $\left(\dfrac{\omega_L}{\omega}\right)^2$, а $C_h = \dfrac{108h}{L}$.

Ясно, что величина $\Delta l_{\theta В}(h,\ \theta,\ \overline{X})$ отвечает $\omega = \omega_L$ или, что то же самое, $\lambda = L$. Коэффициент φ_ω зависит только от соотношения между частотой волны ω и частотой такой волны ω_L, длина которой равна длине судна L, $\omega_L = \sqrt{\dfrac{2\pi g}{L}}$ (или от соотношения между длиной волны $\lambda = \dfrac{2\pi g}{\omega^2}$ и длиной судна). Однако приближенно коэффициент φ_ω может считаться не зависящим ни от высоты волны h, ни от угла крена θ [5, 17]. Значения этого коэффициента для вершины и для подошвы волны незначительно отличаются между собой.

После того как расчет по формуле (7) выполнен и для вершины (подошвы) волны получена в табличной форме функциональная зависимость вида $\Delta l_{\theta В}(h,\ \theta,\ \overline{X})$, выполняется аппроксимация этой функции в следующем виде:

$$\Delta l_{\theta В}(h,\ \theta,\ \overline{X}) \approx \frac{h}{2} a_{lВ}(\overline{X})\varphi_{\theta В}(\overline{X},\ \theta); \quad (8)$$

$$a_{lВ} \ne a_{lВ}(h, \theta),\ \varphi_{\theta В} \ne \varphi_{\theta В}(h).$$

При этом каждой комбинации главных элементов проектируемого судна, которая задается вектором $\overline{X}$, будет отвечать свое численное значение параметра $a_{lВ}$ и своя заданная аналитически или таблично функция $\varphi_{\theta В}(\theta)$ (то и другое — отдельно для вершины волны, когда $a_{lВ} = a_{lВВ}$ и $\varphi_{\theta В}(\theta) = \varphi_{\theta ВВ}(\theta)$, и для подошвы волны, когда $a_{lВ} = a_{lПВ}$ и $\varphi_{\theta В}(\theta) = \varphi_{\theta ПВ}(\theta)$).

Предварительные оценки, а также данные работ [5, 16] подтверждают приемлемую точность аппроксимации результатов расчетов по формуле (7) соотношением (8). Условимся далее не указывать зависимость используемых величин от вектора главных элементов судна $\overline{X}$. Тогда расчетный опрокидывающий момент M_0 при движении корабля на попутном регулярном волнении с длиной волны λ для случая динамического воздействия на корабль шквалистого ветра, когда величина кренящего момента не зависит от угла крена, может быть приведен к такому виду [5]:

$$M_0 = M_0\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right) = \left[M_0^* + \kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)(M_{C0} - M_0^*)\right]\varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right); \qquad (9)$$

$$M_{C0} = 0{,}5(M_0^* + M_0^{**});\;\; 0 \le \kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right) \le 1;\; \mathrm{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL}};$$

$$M_0^* = Dl_{\mathrm{C\theta BB}}(\theta_{m\mathrm{CBB}}), \theta_{m\mathrm{CBB}} \approx 0{,}85\theta_{\mathrm{3BB}};\;\; M_0^{**} = Dl_{\mathrm{C\theta\Pi B}}(\theta_{m\mathrm{C\Pi B}}), \theta_{m\mathrm{C\Pi B}} \approx 0{,}85\theta_{\mathrm{3\Pi B}};$$

$$l_{\mathrm{C\theta BB}}(\theta) = \frac{1}{\theta}\int_0^\theta l_{\mathrm{\theta BB}}(\nu)d\nu = \frac{h}{2}\cdot a_{l\mathrm{BB}} \cdot \frac{1}{\theta}\int_0^\theta \varphi_{\mathrm{\theta BB}}(\nu)d\nu;$$

$$l_{\mathrm{C\theta\Pi B}}(\theta) = \frac{1}{\theta}\int_0^\theta l_{\mathrm{\theta\Pi B}}(\nu)d\nu = \frac{h}{2}\cdot a_{l\mathrm{\Pi B}} \cdot \frac{1}{\theta}\int_0^\theta \varphi_{\mathrm{\theta\Pi B}}(\nu)d\nu;$$

$$l_{\mathrm{\theta\Pi B}}(\nu) = l_\theta(\nu) + \Delta l_{\mathrm{\theta\Pi B}}(\nu);\;\; l_{\mathrm{\theta BB}}(\nu) = l_\theta(\nu) + \Delta l_{\mathrm{\theta BB}}(\nu),$$

где M_0^*, M_0^{**} — опрокидывающие моменты на подошве и на вершине волны, определенные при $\lambda = L$; M_{C0} — средний опрокидывающий момент; $\kappa_M = \kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$ — коэффициент, зависящий от числа Фруда Fr и отношения λ/L; $l_{\mathrm{\theta\Pi B}}(\nu)$, $l_{\mathrm{\theta BB}}(\nu)$ — плечи статической остойчивости на подошве и на вершине волны при угле крена ν и при $\lambda = L$; $\Delta l_{\mathrm{\theta BB}}(\theta)$, $\Delta l_{\mathrm{\theta\Pi B}}(\theta)$ — поправки к плечам статической остойчивости на вершине и подошве попутной волны, определяемые по эмпирическим зависимостям [6] в зависимости от угла крена ν, соотношения между высотой регулярной волны и длиной судна при $\lambda = L$; $l_{\mathrm{C\theta\Pi B}}(\nu)$, $l_{\mathrm{C\theta BB}}(\nu)$ — средние плечи остойчивости на подошве и на вершине волны при угле крена ν и при $\lambda = L$.

Здесь плечо статической остойчивости при угле крена $l_\theta(\theta)$ соответствует тихой воде. Кроме того, авторы с некоторой небольшой погрешностью в безопасную сторону пренебрегли влиянием демпфирования на опрокидывающий момент. Предполагалось также, что кренящий момент не зависит от угла крена (связанная с этим погрешность также невелика [14]).

Рассмотрим определение коэффициента $\kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$. Обозначим $\mathrm{Fr}_\varphi = \mathrm{Fr}\cos\varphi_K$. Тогда имеем $\kappa_M = 1$ при $\mathrm{Fr}_\varphi = -0{,}2$ и $\kappa_M = 0$ при $\mathrm{Fr}_\varphi = 0{,}4$ [5]. А при $\mathrm{Fr}_\varphi = 0$ будет $\kappa_M \approx 0{,}7$. Здесь ситуация $\mathrm{Fr}_\varphi = -0{,}2$ может отвечать, например, движению на встречном волнении с числом Фруда Fr = 0,2 (в этом случае $\varphi_K = \pi$). А случай $\mathrm{Fr}_\varphi = 0{,}4$ может отвечать движению на попутном волнении ($\varphi_K = 0$) с числом Фруда Fr = 0,4. Но эти данные относятся к случаю, когда у нас $\lambda/L = 1$. А чтобы выявить зависимость $\kappa_M = \kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$, рассмотрим физический смысл этого коэффициента.

Пусть корабль не имеет хода на попутном волнении и Fr = 0. В этом случае волны обгоняют корабль. Тогда положение корабля относительно волны за время опрокидывания может существенно измениться, и опрокидывающий момент получается для попутного волнения максимальным. С учетом того, что в данном случае

$\kappa_M = 0{,}7$, этот момент получается равным $M_0 = M_{0\max} \approx 0{,}7M_{C0} + 0{,}3M_0^*$. Пусть далее скорость корабля растет. Опрокидывающий момент уменьшается, приближаясь к соответствующей минимальной величине M_0^*, которая отвечает вершине попутной волны. Пусть скорость корабля достигла величины, которая отвечает числу Фруда

$$\mathrm{Fr} = \mathrm{Fr}_{KP}\left(\frac{\lambda}{L}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \approx 0{,}4\sqrt{\frac{\lambda}{L}}.$$

Кажущийся период набегающих волн τ_K, который в общем случае равен

$$\tau_K = C'_\tau\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)\sqrt{\frac{L}{g}}; \qquad (10)$$

$$C'_\tau\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right) = \frac{\sqrt{\dfrac{2\pi\lambda}{L}}}{1 - Fr\sqrt{\dfrac{2\pi L}{\lambda}}},$$

при $\mathrm{Fr} = \mathrm{Fr}_{KP}$ обращается в бесконечность, а зависимости $C'_\tau\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$ и $\kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$ имеют один и тот же характер.

В этом случае скорость бега волны и скорость корабля совпадают и корабль неподвижен относительно волны. Здесь опрокидывающий момент становится равным своему минимальному значению, так что в этом случае

$$M_0 = M_{0\min} \approx M_0^*.$$

Это объясняется тем, что за время накренения положение корабля относительно волны (а рассматривать следует наиболее опасное положение на вершине волны) не успевает измениться. С дальнейшим ростом скорости корабль начинает обгонять волну, и опрокидывающий момент вновь возрастает. Видно, что при $\lambda/L = 1$ имеем $\mathrm{Fr}_{KP} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \approx 0{,}4$, а это то самое значение критического числа Фруда, при котором в формуле (9) было $\kappa_M = 0$. Это позволяет принять для попутного волнения зависимость $\kappa_M = \kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$ при $0 \le \mathrm{Fr} \le 2\mathrm{Fr}_{KP}$ в таком виде:

$$\kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right) \approx 0{,}7\sqrt{1 - \sin\left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\mathrm{Fr}}{\mathrm{Fr}_{KP}\left(\dfrac{\lambda}{L}\right)}\right]}.$$

Далее выделим математическое ожидание опрокидывающего момента $\overline{M}_M$, равное опрокидывающему моменту на тихой воде M_{SW}, так что

$$\overline{M}_M = M_{SW} = D \cdot l_{C\theta}(\theta_{\text{тд}}) = \frac{D}{\theta_{\text{тд}}}\int_0^{\theta_{\text{тд}}} l_\theta(\nu)d\nu; \; \theta_{\text{тд}} \approx 0{,}85\theta_{\text{з}},$$

где $l_{C\theta}(\varphi)$ — среднее плечо статической остойчивости; $\theta_{\text{з}}$ — угол заката диаграммы статической остойчивости на тихой воде; $\theta_{\text{тд}}$ — угол предельного динамического крена на тихой воде, при превышении которого судно опрокидывается.

При не зависящем от угла крена кренящем моменте величина $\theta_{\text{тд}}$ строго равна углу максимума диаграммы средних моментов. Соотношение между этой величиной и углом заката $\theta_{\text{з}}$ принято, как и ранее, на основе рекомендаций [14].

Отметим очевидные соотношения

$$M_0^* = M_{SW} + D \cdot \Delta l_{C\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}}) \cdot \varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right) = M_{SW} + D \cdot \frac{h}{2} a_{l\text{ВВ}} \psi_{\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}}) \varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right);$$

$$M_0^{**} = M_{SW} + D \cdot \Delta l_{C\theta\text{ПВ}}(\theta_{m\text{СВВ}}) \cdot \varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right) = M_{SW} + D \cdot \frac{h}{2} a_{l\text{ПВ}} \psi_{\theta\text{ПВ}}(\theta_{m\text{СПВ}}) \varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right);$$

$$\Delta l_{\text{С}\theta\text{ВВ}}(\theta)=\frac{1}{\theta}\int_0^\theta \Delta l_{\theta\text{ВВ}}(\nu)d\nu;\;\; \Delta l_{\text{С}\theta\text{ПВ}}(\theta)=\frac{1}{\theta}\int_0^\theta \Delta l_{\theta\text{ПВ}}(\nu)d\nu;$$

$$\psi_{\theta\text{ВВ}}(\theta)=\frac{1}{\theta}\int_0^\theta \varphi_{\theta\text{ВВ}}(\nu)d\nu;\;\; \psi_{\theta\text{ПВ}}(\theta)=\frac{1}{\theta}\int_0^\theta \varphi_{\theta\text{ПВ}}(\nu)d\nu.$$

Представим далее опрокидывающий момент на попутном волнении M_0 как сумму опрокидывающего момента на тихой воде M_{SW} и обусловленной попутным волнением надбавки M_{W0}. Тогда если в формуле (9) $M_0 = M_{SW} + M_{W0}$, то при отсутствии бортовой качки на попутном волнении из этой формулы следует, что

$$M_{W0}=M'_{W0}\left(\text{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)=$$

$$=D\cdot\left\{\left[1{,}0-0{,}5\kappa_M\left(\text{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)\right]\Delta l_{\text{С}\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}})+0{,}5\kappa_M\left(\text{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)\Delta l_{\text{С}\theta\text{ПВ}}(\theta_{m\text{СПВ}})\right\}\varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right)=$$

$$=D\cdot\frac{h}{2}\left\{\left[1{,}0-0{,}5\kappa_M\left(\text{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)\right]a_{l\text{ВВ}}\psi_{\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}})+0{,}5\kappa_M\left(\text{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)a_{l\text{ПВ}}\psi_{\theta\text{ПВ}}(\theta_{m\text{СПВ}})\right\}\varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right). \quad (11)$$

При движении судна со скоростью волны, когда $\text{Fr}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}$ и $\kappa_M = 0$, имеем

$$M'_{W0}\left(\text{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)=M'_{W0}\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}},\frac{\lambda}{L}\right)=D\cdot\Delta l_{\text{С}\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}})\cdot\varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right),$$

и опрокидывающий момент получается равным своему значению на вершине попутной волны.

При отсутствии хода, когда $\text{Fr}=0$ и $\kappa_M = 0{,}7$, имеем

$$M'_{W0}\left(\text{Fr},\ \frac{\lambda}{L}\right)=M'_{W0}\left(0,\ \frac{\lambda}{L}\right)=D\cdot[0{,}65\Delta l_{\text{С}\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}})+0{,}35\Delta l_{\text{С}\theta\text{ПВ}}(\theta_{m\text{СПП}})]\cdot\varphi_\omega\left(\frac{\lambda}{L}\right).$$

При наличии бортовой качки на попутном волнении в предположении статистической независимости бортовой качки в режимах основного и параметрического резонансов, а также при независимости обеих этих видов качки от пульсаций восстанавливающего момента будем иметь

$$M_{W0}=M'_{W0}+M''_{W0}+M'''_{W0},$$

где составляющие M''_{W0} и M'''_{W0} связаны с бортовой качкой в режимах основного и параметрического резонансов соответственно.

С учетом сделанных выше на основе работ [5, 16] допущений ординаты надбавки M'_{W0} распределены по нормальному закону, а амплитуды — по закону Рэлея. То же относится и к величине M''_{W0}. Для ординат параметрической бортовой качки, которые с точностью до неслучайного множителя определяют ординаты величины M'''_{W0}, применение нормального распределения для ординат параметрической качки также возможно [5]. Тогда можно рассмотреть суммарный опрокидывающий момент на нерегулярном попутном волнении M_0 как

$$M_0=\overline{M}_M-m_{\theta0}\sqrt{D_{M0}}\,, \qquad (12)$$

где $\overline{M}_M = M_{SW}$, D_{M0} — первый и второй статистические моменты величины M_0, а $m_{\theta0}$ — параметр, определяющий для попутного волнения расчетный уровень значимости.

В соответствии с принципом приравнивания вероятностей отказа

$$m_{\theta 0} = m_{\theta\pi/2}, \qquad (13)$$

где $m_{\theta\pi/2}$ — уровень значимости в исходных нормах применительно к положению судна лагом к волнам.

Большинство существующих норм остойчивости основаны на том принципе, что на случайный процесс нерегулярной бортовой качки судна накладывается одно колебание под действием шквала, предполагаемое экстремальным. Тогда для уровня значимости $m_{\theta\pi/2}$ имеем

$$m_{\theta\pi/2} = \frac{\theta_{\pi/2}}{\sqrt{D_{\theta\pi/2}}},$$

где $\theta_{\pi/2}$ — условная расчетная амплитуда бортовой качки для положения судна лагом к набегающим волнам, заложенная в исходные нормы остойчивости и предполагаемая известной, а $D_{\theta\pi/2}$ — дисперсия бортовой качки в положении судна лагом к волнам.

Примем далее за основу полученное в работе [9] соотношение, которое связывает опрокидывающий момент в положении судна лагом к волнам $M_{\pi/2}$ с аналогичным моментом на тихой воде M_{SW} и с характеристиками бортовой качки:

$$M_{\pi/2} = \mathrm{K}_\theta(h_3) M_{SW};\; \mathrm{K}_\theta(h_3) \approx 1{,}0 - \frac{1{,}4\theta_{\pi/2}(h_3)}{\theta_3} = 1{,}0 - \frac{1{,}4 m_{\theta\pi/2}\sqrt{D_{\theta\pi/2}(h_3)}}{\theta_3},$$

где $\mathrm{K}_\theta(h_3)$ — редукционный коэффициент к опрокидывающему моменту на тихой воде M_{SW} на действие обусловленной волнением бортовой качки, $\mathrm{K}_\theta(0) = 1$. Тогда расчетную зависимость для величины $M_{\pi/2}$ можно записать по аналогии с соотношением (12) и так:

$$M_{\pi/2} = M_{SW} + M_{W\pi/2}$$

$$M_{W\pi/2} = -m_{\theta\pi/2}\sqrt{D_{M\pi/2}} = = -M_{SW} m_{\theta\pi/2}\sqrt{\overline{D}_{M\pi/2}};$$

$$\overline{D}_{M\pi/2} = \frac{D_{M\pi/2}}{M_{SW}^2} = \frac{D_{M\pi/2}}{\overline{M}_M^2} \approx \frac{2D_{\theta\pi/2}}{\theta_3^2},$$

где $M_{W\pi/2}$ — волновая добавка к опрокидывающему моменту для положения лагом к волнам, $M_{W\pi/2} < 0$, а $D_{M\pi/2}$, $\overline{D}_{M\pi/2}$ — размерная и безразмерная дисперсии опрокидывающего момента при положении судна лагом к набегающим волнам.

Величина $M_{W\pi/2}$ — в отличие от аналогичной величины для попутного волнения M_{W0} — связана только с бортовой качкой в режиме основного резонанса.

Определяя дисперсию опрокидывающего момента D_{M0} для попутного волнения, приближенно примем процессы изменения плеч статической остойчивости на волнении, бортовой качки в режимах основного резонанса и бортовой качки в режиме параметрического резонанса статистически независимыми. Тогда безразмерная дисперсия опрокидывающего момента на попутном волнении $\overline{D}_{M0} = \frac{D_{M0}}{M_{SW}^2} = \frac{D_{M0}}{\overline{M}_M^2}$, определится в форме

$$\overline{D}_{M0} \approx \frac{2}{\theta_{3Fr}^2}(\overline{D}_{\Delta M} + D_{\theta 01} + D_{\theta 02}); \qquad (14)$$

$$\theta_{3Fr} = 0{,}5(\theta_{3ПВ} + \theta_{3ВВ}),$$

где $\overline{D}_{\Delta M}$ — безразмерная дисперсия поправок к опрокидывающему моменту из-за пульсаций диаграммы статической остойчивости на попутном волнении; θ_{3Fr} — осредненный угол заката средней диаграммы статической остойчивости на попутном волнении; $D_{\theta 01}$, $D_{\theta 02}$ — дисперсии бортовой качки на попутном волнении в режимах основного и параметрического резонансов.

Здесь величины $\overline{D}_{\Delta M}$, $D_{\theta 01}$ и $D_{\theta 02}$ отвечают составляющим волновой надбавки к опрокидывающему моменту на попутном волнении M'_{W0}, M''_{W0} и M'''_{W0} соответственно. Однако непосредственное использование полученной таким образом дисперсии $\overline{D}_{M0}$ в сочетании с равенством (13) будет не вполне корректным. Дело в том, что математическое оформление принципа паритета по А.Н. Крылову, данное в работе [12], предусматривает, строго говоря, приравнивание не вероятностей отказа, а времени наработки на отказ. И только при примерном равенстве эффективных чисел циклов или эффективных периодов условие равенства времени наработки на отказ переходит в условие равенства вероятностей отказа. Здесь под эффективным числом циклов понимаем количество опасных состояний в течение заданного промежутка времени, а под эффективным периодом — осредненный по времени интервал между двумя соседними опасными состояниями. Далее формально будем приравнивать вероятности отказа, но при этом внесем такие поправки, чтобы условие равенства времени наработки на отказ выполнялось бы. С этой целью заменим безразмерную дисперсию $\overline{D}_{M0}$ на приведенную безразмерную дисперсию $\overline{D}^*_{M0}$. Тогда

$$\overline{D}^*_M \approx \frac{2}{\theta^2_{3\mathrm{Fr}}}\left(\kappa^2_{\Delta M}\overline{D}_{\Delta M} + \kappa^2_{\theta 1}D_{\theta 01} + \kappa^2_{\theta 2}D_{\theta 02}\right); \quad (15)$$

$$\kappa_{\Delta M} = \sqrt{\frac{m_{\theta\Delta M}}{m_{\theta\pi/2}}};\ \kappa_{\theta 1} = \sqrt{\frac{m_{\theta 01}}{m_{\theta\pi/2}}};\ \kappa_{\theta 2} = \sqrt{\frac{m_{\theta 02}}{m_{\theta\pi/2}}};$$

$$m_{\theta\Delta M} = \sqrt{-2\ln\left[K_{\omega\Delta M}\exp\left(-\frac{m^2_{\theta\pi/2}}{2}\right)\right]};\ m_{\theta 01} = \sqrt{-2\ln\left[K_{\theta 1}\exp\left(-\frac{m^2_{\theta\pi/2}}{2}\right)\right]};$$

$$m_{\theta 02} = \sqrt{-2\ln\left[K_{\theta 2}\exp\left(-\frac{m^2_{\theta\pi/2}}{2}\right)\right]};$$

$$K_{\omega\Delta M} \approx \frac{\tau_\theta}{2\widetilde{\tau}_M(\mathrm{Fr}, h_3)} = \frac{\widetilde{\omega}_M(\mathrm{Fr}, h_3)}{2n_\theta};\ K_{\theta 1} = \frac{\tau_\theta}{\widetilde{\tau}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3)} = \frac{\widetilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3)}{\widetilde{\omega}_{\theta\pi/2}};\ K_{\theta 2} \approx 0{,}5,$$

где $\widetilde{\tau}_M(\mathrm{Fr}, h_3)$, $\widetilde{\omega}_M(\mathrm{Fr}) = \dfrac{2\pi}{\widetilde{\tau}_M(\mathrm{Fr}, h_3)}$ — средний период и средняя частота опрокидывающего момента на нерегулярном волнении; $\widetilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3)$, $\widetilde{\omega}_{\theta\pi/2}$ — средние частоты бортовой качки судна в режиме основного резонанса на попутном волнении при наличии хода и на лаговом волнении, при этом $\widetilde{\omega}_{\theta 0}(0) \approx \widetilde{\omega}_{\theta\pi/2} \approx n_\theta$; $\widetilde{\tau}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3) = \dfrac{2\pi}{\widetilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3)}$ — средний период бортовой качки судна на попутном волнении в режиме основного резонанса при наличии хода.

Расчеты частоты $\widetilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3)$ получаются весьма сложными, и здесь можно рекомендовать использование эмпирических зависимостей. Коэффициенты $\mathrm{K}_{\omega\Delta M}$, $\mathrm{K}_{\theta 1}$ и $\mathrm{K}_{\theta 2}$ представляют собой отношения фактического числа циклов воздействия на судно нагрузки того или иного вида $N_{Цi} = \dfrac{T_\mathrm{C}}{\tau_i}$ к условному количеству циклов $N^*_{Цi} = \dfrac{2T_\mathrm{C}}{\tau_\theta}$. Здесь T_C есть время действия стационарного волнового режима и τ_i — интервал между двумя соседними опасными состояниями при волновом воздействии i-го типа. Если для бортовой качки в равной степени опасны наклонения как на правый, так и на левый борт, то для процесса изменения плеч статической остойчивости на волнении опасным является только попадание судна на вершину попутной волны (на подошве попутной волны остойчивость даже несколько увеличивается). А соотношение $\mathrm{K}_{\theta 2} = 0{,}5$ отражает то обстоятельство, что количество циклов параметрической бортовой качки за заданный промежуток времени вдвое меньше количества циклов волнения, вызвавшего качку.

Средний период изменения восстанавливающего момента на нерегулярном волнении $\tilde{\tau}_M(\mathrm{Fr}, h_3)$ может быть определен по О. Гриму [15] в виде

$$\tilde{\tau}_M(\mathrm{Fr}, h_3) = C''_\tau[\mathrm{Fr}, p_u(h_3)]\sqrt{\frac{L}{g}}; \quad (16)$$

$$p_u(h_3) = \frac{gL}{\bar{u}^2_{\mathrm{B}}(h_3)}; \ \bar{u}_{\mathrm{B}}(h_3) = \frac{u_{\mathrm{B}}(h_3)}{K_{\Pi}} \approx \left(\frac{h_3}{0{,}00935}\right)^{0,4}; \ \bar{u}_{\mathrm{B}} \text{ — в м/сек, } h_3 \text{ — в м,}$$

где $C''_\tau = C''_\tau[\mathrm{Fr}, p_u(h_3)]$ — коэффициент, определяемый по таблице 1, данные которой отвечают систематическим расчетам по схеме работы [15].

Зависимость вида $\bar{u}_{\mathrm{B}} = \bar{u}_{\mathrm{B}}(h_3)$ принята по эмпирической формуле Неймана [3]. Соотношение (16) является аналогом соотношения (10) для нерегулярного волнения. Характер зависимости $C''_\tau[\mathrm{Fr}, p_u(h_3)]$ объясняется следующим.

Пусть Fr = 0. Тогда на регулярном волнении период опрокидывающего воздействия был бы равен истинному периоду регулярной волны с длиной, равной длине корабля. В этом случае коэффициент $C''_\tau = \sqrt{2\pi} \approx 2{,}5$. На нерегулярном волнении коэффициент C''_τ несколько увеличивается, притом тем в большей степени, чем слабее волнение и чем оно дальше по степени упорядоченности от регулярного волнения. При появлении хода период опрокидывающего воздействия становится равным кажущемуся периоду волн (10). С увеличением скорости корабль как бы уходит от попутных волн, в силу чего период опрокидывающего воздействия увеличивается. На регулярном волнении, когда длина попутной регулярной волны близка к длине корабля, при $\mathrm{Fr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \approx 0$, фазовая скорость волны становится равной скорости корабля. В этом случае на регулярном волнении кажущийся период, равный периоду опрокидывающего воздействия, становится теоретически бесконечно большим (формула (10)). А на нерегулярном и лишенном групповой структуры волнении в диапазоне Fr = 0,35 ÷ 0,45 период опрокидывающего воздействия хотя и остается конечным, но получается при этом максимальным для всего диапазона чисел Фруда. При дальнейшем росте скорости корабль нагоняет попутные волны, поскольку его скорость при Fr > 0,4 превышает фазовую скорость волн. В силу этого период опрокидывающего воздействия уменьшается. Сходным образом ранее поясняли физический смысл коэффициента $\kappa_M = \kappa_M\left(\mathrm{Fr}, \frac{\lambda}{L}\right)$.

Теперь осталось найти дисперсии $\bar{D}_{\Delta M}$, $D_{\theta 01}$ и $D_{\theta 02}$.

Путем соответствующего выбора начальной поперечной метацентрической высоты и значения безразмерного линейного коэффициента демпфирования можно добиться отсутствия параметрической бортовой качки, т. е. добиться того, чтобы было $D_{\theta 02} = 0$. Далее будем считать, что $D_{\theta 02} = 0$. Определение условий, при которых это достигается, рассмотрим в одной из последующих работ. Получается, что полная потеря остойчивости, которая определяется дисперсией $\bar{D}_{\Delta M}$, и низкочастотный

Таблица 1. Определение коэффициента $C''_\tau[\mathrm{Fr}, p_u(h_3)]$. Значения $C''_\tau[\mathrm{Fr}, p_u(h_3)]$ при Fr

	0	0,10	0,20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
$p_u(h_3)$	2,6	3,1	4,7	8,6	12,5	15,2	12,0	10,0
$p_u(h_3)$	2,7	3,6	4,7	10,8	17,3	12,0	7,8	6,0

резонанс, который определяется дисперсией $D_{\theta 01}$, оказываются главными опрокидывающими факторами на попутном волнении [5, 17].

При вычислении дисперсии $D_{\theta 01}$ возникают те же проблемы, что и при нахождении частоты $\tilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr}, h_3)$. Поэтому по рекомендациям [5] можно принять, что дисперсия $D_{\theta 01}$ также равна 0, но при этом опрокидывающий момент, отвечающий случаю $D_{\theta 01} = 0$, должен быть увеличен примерно на четверть (соответственно его дисперсия — примерно в полтора раза). Тогда формула (14) принимает вид

$$\overline{D}^*_M \approx \frac{3\kappa^2_{\Delta M}\overline{D}_{\Delta M}}{\theta^2_{3\mathrm{Fr}}}.$$

Другим вариантом здесь может быть сохранение формулы (14) при $D_{\theta 02} = 0$, когда дисперсия $D_{\theta 01}$ определяется условием

$$D_{\theta 01} = \left[\frac{\kappa_\theta(\mathrm{Fr})\theta_{\pi/2}}{m_{\theta\pi/2}}\right]^2;$$

$$\kappa_\theta(\mathrm{Fr}) \approx \kappa_\theta(0)\sqrt{\frac{1}{1+\dfrac{\Delta\mu_{\theta v}(\mathrm{Fr})}{\mu_\theta}}\cdot\frac{S_r[\tilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr})]}{S_r(\tilde{\omega}_{\theta\pi/2})}} \approx \kappa_\theta(0)\sqrt{\frac{1}{1+\dfrac{40\Delta\mu^2_{\theta v}(\mathrm{Fr})}{w_\theta}}\cdot\frac{S_r[\tilde{\omega}_{\theta 0}(\mathrm{Fr})]}{S_r(\tilde{\omega}_{\theta\pi/2})}}.$$

Здесь $\kappa_\theta(\mathrm{Fr})$ есть отношение амплитуды бортовой качки на попутном трехмерном волнении при наличии хода к той же амплитуде на лаговом двухмерном волнении без хода. Прочие величины будут: $\kappa_\theta(0) \approx 0{,}6$ — отношение амплитуды бортовой качки на попутном трехмерном волнении к той же амплитуде на лаговом двухмерном волнении (то и другое — при отсутствии хода); μ_θ, w_θ — безразмерные коэффициенты линейного и квадратичного демпфирования при бортовой качке в случае отсутствия хода; $\Delta\mu_{\theta v}(\mathrm{Fr})$, $\Delta\mu_{\theta v}(0) = 0$ — дополнительный безразмерный коэффициент линейного демпфирования, учитывающий наличие хода [4]; $S_r(x)$ — ордината спектральной плотности волнения при частоте элементарной гармоники, равной x.

Найти дисперсию $\overline{D}_{\Delta M}$ можно путем интегрирования спектра опрокидывающего момента $S_M(\omega_K)$ по всему диапазону кажущихся частот $\omega_K = \omega - \dfrac{\omega^2 v}{g}$, где $\omega = \sqrt{\dfrac{2\pi g}{\lambda}}$ — истинная частота. Здесь спектр $S_M(\omega_K)$ отражает фактическое распределение по частотам энергии процесса изменения опрокидывающего момента на попутном волнении. Однако можно определить дисперсию $\overline{D}_{\Delta M}$ также и путем интегрирования псевдоспектра опрокидывающего момента на попутном волнении $S^*_M(\omega)$ по истинным частотам. Зависимость $S^*_M(\omega)$ не отражает фактического распределения энергии по частотам. В то же время

$$\int_0^\infty S_M(\omega_K)d\omega_K = \int_0^\infty S^*_M(\omega)d\omega,$$

а определение псевдоспектра $S^*_M(\omega)$ существенно проще, чем спектра $S_M(\omega_K)$. Тогда для линейной зависимости $M'_{W0} = M'_{W0}(h)$ получим:

$$\overline{D}_{\Delta M} = \frac{1}{\overline{M}^2_M}\int_0^\infty S^*_M(\omega)d\omega;\;\; S^*_M(\omega) = \left|\Phi_M(\omega)\right|^2 S_r(\omega);\;\; \left|\Phi_M(\omega)\right| = \frac{2M'_{W0}(h,\omega)}{h} =$$

$$= D\cdot\left\{\left[1{,}0 - 0{,}5\kappa_{MO}\left(\mathrm{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)\right]a_{l\text{ВВ}}\psi_{\theta\text{ВВ}}(\theta_{m\text{СВВ}}) + 0{,}5\kappa_{MO}\left(\mathrm{Fr},\frac{\lambda}{L}\right)a_{l\text{ПВ}}\psi_{\theta\text{ПВ}}(\theta_{m\text{СПВ}})\right\}\varphi_\lambda\left(\frac{\lambda}{L}\right),$$

где $\left|\overline{\Phi}_M(\omega)\right|$ — модуль передаточной функции отвечающего соотношению (11) опрокидывающего момента M'_{W0}.

При этом следует помнить, что

$$\lambda = \lambda(\omega) = \frac{2\pi g}{\omega^2}.$$

ВЫВОДЫ

1. Одним из возможных способов повышения адекватности норм остойчивости на попутном волнении является формирование таких норм на основе оптимального компромисса между безопасностью плавания и экономической эффективностью проектируемого судна для этой расчетной ситуации.

2. Для физических норм остойчивости судна в положении лагом к волнам этот компромисс может считаться достигнутым, поскольку указанные нормы имеют подробное теоретическое обоснование, а также учитывают обширную аварийную статистику. Численной мерой этого компромисса является неявно заложенная в Нормы вероятность опрокидывания. Поэтому при формировании новых физических норм остойчивости судна на попутном волнении возможно применение сформулированного в работе [12] принципа приравнивания времени наработки на отказ.

3. Применительно к вероятности опрокидывания судна на попутном волнении в течение срока службы принцип равенства времени наработки на отказ в данной задаче реализуется соотношением (2). При некоторых сформулированных выше упрощающих допущениях из этого принципа определяется одна только нормативная скорость ветра (формула (5)). Как показывают выполненные расчеты, различие между нормативными скоростями ветра для положения лагом к волнам и на попутном волнении получается здесь небольшим.

4. Возможность реализации этого же принципа для волнового воздействия на стационарном волновом режиме определяется, во-первых, справедливостью приближенного соотношения (6), а во-вторых, — возможностью аппроксимации соотношения (7) приближенной формулой (8). Предварительные численные расчеты подтверждают возможность практического использования соотношений (6)–(8).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Богданов, А. И.** Нормирование остойчивости. Диаграммы безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении [Текст] / А. И. Богданов // Научно-технический сборник Регистра СССР. — М. : Внешторгиздат, 1991. — Вып. 17. — С. 20–45.

[2] **Бородай, И. К.** Влияние трехмерности волнения на амплитуды качки судна без хода [Текст] / И. К. Бородай, А. В. Герасимов // Судостроение, 1968. — № 6. — С. 8–10.

[3] **Луговский, В. В.** Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов [Текст] : монография / В. В. Луговский. — Л. : Судостроение, 1971. — 248 с.

[4] **Моренширьдт, В. А.** Приближенный метод расчета влияния скорости хода на демпфирование бортовой качки [Текст] / В. А. Моренширьдт // Сборник НТО им. акад. А.Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1972. — Вып. 185. — С. 138–144.

[5] **Нечаев, Ю. И.** Остойчивость судов на попутном волнении [Текст] : монография / Ю. И. Нечаев. — Л. : Судостроение, 1978. — 272 с.

[6] **Нечаев, Ю. И.** Использование теории матричных игр для оценки влияния курсового угла на остойчивость судна [Текст] / Ю. И. Нечаев // Кибернетика на морском транспорте. — К. : Техника, 1980. — Вып. 9. — С. 40–45.

[7] **Нечаев, Ю. И.** Выбор критических ситуаций в задаче о нормировании остойчивости судов [Текст] / Ю. И. Нечаев // Кибернетика на морском транспорте. — К. : Техніка, 1981. — Вып. 10. — С. 9–15.

[8] **Нечаев, Ю. И.** Оценка влияния курсового угла на остойчивость судна на волнении [Текст] / Ю. И. Нечаев, А. Ф. Медведь // Судостроение, 1981. — № 4. — С. 15–17.

[9] **Розенфельд, А. М.** О расчете предельной ветровой нагрузки судна, испытывающего бортовую качку [Текст] / А. М. Розенфельд // Судостроение, 1964. — № 3. — С. 10–13.

[10] **Севастьянов, Н. Б.** Сравнение и оценка различных систем нормирования остойчивости [Текст] / Н. Б. Севастьянов // Судостроение, 1968. — № 6. — С. 3–5.

[11] **Соломенцев, О. И.** Об одной задаче параметрической оптимизации [Текст] / О. И. Соломенцев // Украинский аэрокосмический журнал. — Николаев, 2008. — Вып. 2. — С. 58–76.

[12] **Соломенцев, О. И.** Принцип паритета по А.Н. Крылову и нормирование характеристик предельной устойчивости судна [Текст] / О. И. Соломенцев // Украинский аэрокосмический журнал. — Николаев, 2009. — Вып. 3. — С. 57–89.

[13] **Соломенцев, О. И.** Критерий остойчивости малого скоростного судна, захваченного попутной волной [Текст] / О. И. Соломенцев // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — Вып. 1. — С. 37–46.

[14] **Шмурун, А. И.** О двух методах расчета параметров ветра, выдерживаемого судном [Текст] / А. И. Шмурун // Научно-технический сборник Регистра СССР. — Л. : Транспорт, 1972. — Вып. 2. — С. 107–117.

[15] **Grim, O.** Beitrag Zu Dem Problem Der Sicherheit Des Schiffes im Seegang [Text] / O. Grim // Schiff und Hafen, 1961. — J. 13. — H.6. — S. 490–497

[16] **Kastner, S.** Hebelkurven in Unregelmabiger Seegang [Text] / S. Kastner // Schiffstechnik, 1970. — B. 17. — H. 88. — S. 65–76.

[17] **Pauling, J.** The Transverse Stability of a Ship in a Longitudinal Seaway [Text] / J. Pauling // Journal of Ship Research, 1961. — Vol. 4. — № 4. — P. 37–49.