

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1004-1015

## METHOD FOR ASSESSING AND IMPROVING THE INITIAL STABILITY OF THE SHIP UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION ON THE CARGO LOADED

**Ye. V. Nikitin**

The Black Sea Naval College named after P. S. Nakhimov,  
Sevastopol, Russian Federation

*A practical method for assessing and restoring (building up) the initial stability of a vessel in conditions of incomplete information about the loaded cargo has been proposed. This method is based on the procedure of sequential filling with liquid ballast of two low-lying and symmetrical tanks relative to the center plane of the vessel. At the same time, the selection of the tanks size (the amount of ballast received) is carried out on the basis of the conditions of guaranteed non-capsizing of the vessel, on the one hand, and increasing its initial stability, on the other. Before starting ballasting, as well as after filling each of the selected tanks, it has been proposed to measure the draft and heel angle of the vessel, as well as to quantify the upper and lower limits (range) of possible values of the metacentric height and the corresponding values of the heel angle of the vessel. At the same time, at the beginning (before ballasting), the lower limit of the metacentric height is determined from the condition that the ship's heel is caused by the ship's negative initial stability. Using the simple logical rules formulated in the paper, it has been proposed to compare the actual and calculated values of the ship's heel angles during ballasting, and then make a decision on the value of its actual initial stability. The necessary calculation formulas that make it possible to practically implement the proposed method, both when choosing the size (volume) of ballast tanks, and when calculating the ranges of possible values of the ship's heel angles and its initial metacentric height are provided in the paper. For a ship of a typical design, a numerical example of the implementation of the method has been given. It, among other things, has shown that the accuracy of assessing the initial stability of a ship based on the results of ballasting depends significantly on the volume of the selected tanks: the larger this volume, the more accurate and sensitive the proposed method.*

*Keywords: initial stability of the vessel, incomplete information about the cargo loaded, sequential ballasting of tanks, measurement of heel angle, metacentric height, heel angle, possible values, calculation and measurements.*

**For citation:**

Nikitin, Yevgeny V. "Method for assessing and improving the initial stability of the ship under conditions of incomplete information on the cargo loaded." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1004–1015. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1004-1015.

**УДК 629.123**

## СПОСОБ ОЦЕНКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ О ПРИНЯТОМ ГРУЗЕ

**Е. В. Никитин**

Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище  
имени П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация

*Разработан новый практический способ оценки и восстановления (наращивания) начальной остойчивости судна в условиях неполной информации о принятом грузе, в основе которого процедура последовательного заполнения жидким балластом двух низкорасположенных и симметричных относительно диаметральной плоскости судна цистерн. При этом подбор размера цистерн (количества принимаемого балласта) проводится исходя из условий гарантированного не опрокидывания судна, с одной стороны, и наращивания его начальной остойчивости — с другой. Предлагается перед началом балластировки, а также после заполнения каждой из выбранных цистерн измерять осадку и угол крена судна, а также*

количественно оценивать верхнюю и нижнюю границы (диапазон) возможных значений метацентрической высоты и соответствующих им значений углов крена судна. При этом вначале (до балластирования) нижняя граница метацентрической высоты определяется из условия, что крен судна вызван наличием у судна отрицательной начальной остойчивости. Используя сформулированные в статье простые логические правила, предлагается проводить сравнение между собой фактических и расчетных значений углов крена судна при его балластировке, после чего принимать решение о величине его фактической начальной остойчивости. Приведены также необходимые расчетные формулы, позволяющие практически реализовать предложенный способ как при выборе размера балластных цистерн, так и при расчете диапазонов возможных значений углов крена судна и его начальной метацентрической высоты. Для судна типового проекта приведен численный пример реализации способа, который в том числе показал, что точность оценки начальной остойчивости судна по результатам балластирования существенным образом зависит от объема выбранных цистерн: чем больше этот объем, тем точнее и чувствительнее предложенный способ.

*Ключевые слова:* начальная остойчивость судна, неполная информация, принятый груз, последовательная балластировка цистерн, метацентрическая высота, угол крена, возможные значения, расчет и измерения.

**Для цитирования:**

Никитин Е. В. Способ оценки и восстановления начальной остойчивости судна в условиях неполной информации о принятом грузе / Е. В. Никитин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1004–1015. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1004-1015.

### Введение (Introduction)

В практике морских перевозок в условиях форс-мажорных обстоятельств (например, в условиях военного времени) иногда возникает ситуация, когда судно загружается и перевозит грузы, массогабаритные показатели которых известны весьма приблизительно. При этом зачастую, из-за дефицита времени и необходимости обеспечения скрытности, погрузка этих грузов на судно осуществляется без предварительного «Грузового плана», а расчет основных показателей остойчивости, в том числе начальной метацентрической высоты судна — по результатам фактической погрузки и в условиях неполной информации о принятом грузе. Таким образом, расчеты показателей остойчивости судна после погрузки могут значительно отличаться от их фактических значений, что, в свою очередь, требует дополнительной проверки остойчивости судна, в том числе опытным путем.

В настоящее время известны два принципиально разных способа опытной проверки начальной остойчивости судна: *опыт кренования* [1]–[3] и [4], [5] и *опыт свободных колебаний* (метод раскачивания) [1], [6], [7]. Опыт кренования, несмотря на его высокую точность, имеет в данном случае два существенных недостатка. Во-первых, для его проведения необходимы хорошие погодные условия (тихая, безветренная погода), а также выполнение целого ряда организационно-технических мероприятий, требующих значительных затрат времени. Во-вторых, при его проведении предполагается, что начальная остойчивость судна положительная ( $h_0 > 0$ ), так как в противном случае в процессе перемещения балласта судно может получить значительный крен и опрокинуться. Кроме того, в процессе опыта кренования начальная остойчивость судна не наращивается (увеличивается), а лишь уточняется. Поэтому в случае ее нулевого или даже отрицательного значения необходимы дополнительные действия по ее наращиванию (восстановлению). Опыт свободных колебаний [1], [6], [7] существенно проще, однако может давать значительную ошибку, завышая фактическое значение начальной остойчивости в несколько раз при условии, если  $h_0 \leq 0,2$  м [6], [7]. Поэтому его применение в условиях возможной пониженной или даже отрицательной начальной остойчивости судна вряд ли целесообразно.

Исходя из ранее изложенного, целью данного исследования является разработка такого способа опытной проверки и оценки начальной остойчивости судна, при котором все предпринимаемые действия, во-первых, не привели бы к опрокидыванию судна и, во-вторых, гарантированно увеличивали его остойчивость.

## Методы и материалы (Methods and Materials)

Представляется целесообразным с учетом сформулированной цели применить способ (процедуру) восстановления (наращивания) начальной остойчивости судна путем последовательного заполнения жидким балластом двух одинаковых по объему, низкорасположенных и симметричных относительно диаметральной плоскости судна цистерн или помещений [7], [8]. Однако эта достаточно хорошо известная стандартная процедура не лишена некоторых недостатков. Во-первых, она не позволяет оценить (уточнить) величину метацентрической высоты судна, в том числе после заполнения балластных цистерн. Во-вторых, не рассчитывается максимальный объем цистерн  $v_{\max}$  и, соответственно, вес балласта, который в случае заполнения первой цистерны не опрокинет судно из-за его пониженной остойчивости. В-третьих, не оценивается необходимое минимальное количество жидкого балласта  $v_{\min}$ , которое следует принять в цистерны, чтобы гарантированно увеличить (восстановить) остойчивость судна до положительного значения.

## Результаты (Results)

Для устранения недостатков ранее изложенной процедуры последовательного заполнения низкорасположенных цистерн предлагается выполнить следующее. После погрузки всех грузов необходимо измерить начальный угол крена судна  $\theta_0$ , а также среднюю осадку ( $T_0$ ), после чего оценить (например, с помощью гидростатических таблиц судна) объемное водоизмещение судна  $V_0$ , метацентрический радиус  $r_0$  и вес груза, увеличивающего осадку судна на 1 см ( $TPC_0$ ).

По стандартной методике [1]–[3] необходимо выполнить расчет показателей остойчивости судна, включая его метацентрическую высоту:

$$h_0 = z_{C_0} + r_0 - z_{G_0}, \quad (1)$$

где  $z_{C_0}$ ,  $z_{G_0}$  — аппликаты центра величины и центра тяжести судна после погрузки, м.

Целесообразно предположить, что полученное по формуле (1) значение  $h_0$  является верхней границей истинного (фактического) значения метацентрической высоты судна  $h_\Phi$  после погрузки, т. е. необходимо принять

$$h_0 = h_0^{\max}. \quad (2)$$

Наличие начального угла крена судна  $\theta_0$  необходимо рассматривать как проявление пониженной (или даже отрицательной) начальной остойчивости судна. При этом расчет отрицательного значения метацентрической высоты судна, которое целесообразно принять за минимально возможное ее значение  $h_0^{\min}$ , можно выполнить по формуле прямобортного судна [1], [6], [7], а именно

$$h_0^{\min} = -\frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0. \quad (3)$$

После определения границ фактического значения метацентрической высоты судна, по окончании погрузки ( $h_0^{\min} \leq h_\Phi \leq h_0^{\max}$ ), необходимо заполнить жидким балластом две низкорасположенные цистерны судна. Для чего вначале необходимо их подобрать из условия невозможности опрокидывания судна через борт, вошедший в воду (куда направлен крен  $\theta_0$ ) или переваливания судна на противоположный борт. Этот подбор можно осуществить на основе следующих предварительных соображений.

Во-первых, если фактическая начальная остойчивость судна соответствует ее минимальному значению ( $h_0^{\min} < 0$ ), то это означает, что судно обладает *эффектом переваливания с борта на борт* [1], [6]–[8], находясь в положении устойчивого равновесия с креном  $\theta_0$  на правый борт, или  $-\theta_0$  — на левый. В таком случае можно безопасно выровнять судно, только восстановив его начальную остойчивость, т. е. наращивая метацентрическую высоту до положительного значения при помощи использования *способа поочередного заполнения жидким балластом низкорасположенных на разных бортах судна цистерн*. Причем вначале рекомендуется заполнять цистерну, расположенную на борту, вошедшем в воду [7], [8].

Во-вторых, с целью гарантированного не опрокидывания судна объем этой цистерны не должен превышать некоторого предельного значения  $v_{\max}$ . Принятый в цистерну балласт объемом  $v_{\max}$  можно рассматривать как кренящий момент, приложенный к судну, приведенное плечо которого составляет

$$l_{\text{кр}} = \frac{\rho_6 v_{\max} y}{\rho V_0} \cos \theta, \quad (4)$$

где  $y$  — поперечная координата центра объема заполняемой цистерны (ее отстояние от диаметральной плоскости судна), м;

$\rho$ ,  $\rho_6$  — соответственно плотность забортной воды и жидкого балласта, кг/м<sup>3</sup>.

Если в качестве балласта используется забортная вода ( $\rho = \rho_6$ ), то это выражение можно записать в следующем виде:

$$l_{\text{кр}} = \frac{v_{\max} y}{V_0} \cos \theta. \quad (5)$$

Кренящему моменту от принятого балласта будет противодействовать восстанавливающий момент судна, плечо которого может быть определено по прямобортной формуле [7], [8], а именно

$$l_{\theta} = \left( h_0^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta \right) \sin \theta. \quad (6)$$

Равенство этих плеч должно соответствовать углу крена судна (после заполнения цистерны балластом). Причем этот угол не должен превышать некоторое предельное значение  $\theta_{\text{пр}}$ , которое должно устанавливаться для каждого судна отдельно (из соображений безопасности и в соответствии с руководящими документами [9], [10]), т. е. можно записать

$$\frac{v_{\max} y}{V_0} \cos \theta_{\text{пр}} = \left( h_0^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{пр}} \right) \sin \theta_{\text{пр}}, \quad (7)$$

откуда следует

$$v_{\max} = \frac{V_0}{y} \left( h_0^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{пр}} \right) \operatorname{tg} \theta_{\text{пр}}. \quad (8)$$

Таким образом, объем принимаемого балласта  $v$  в первую цистерну не должен превышать  $v_{\max}$ , иными словами должно выполняться следующее неравенство:

$$v \leq \frac{V_0}{y} \left( h_0^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{пр}} \right) \operatorname{tg} \theta_{\text{пр}}. \quad (9)$$

В-третьих, объем  $v$  каждой из выбранных для заполнения цистерн должен быть ограничен также снизу. Действительно, если он будет слишком мал, то после заполнения цистерны метацентрическая высота судна хоть и несколько возрастет, но все же останется меньше нуля. При этом приращение метацентрической высоты судна можно определить по следующему выражению [1], [2], [7]:

$$\delta h = \frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{(T_1 - T_0)}{2} - h_0^{\min} - z \right), \quad (10)$$

где  $z$  — аппликата центра объема заполняемой цистерны, м;

$T_1 - T_0 = \frac{\rho_6 g v}{TPC_0}$  — изменение средней осадки судна от приема балласта, м.

Для того чтобы метацентрическая высота судна (после заполнения первой цистерны) была положительной, необходимо выполнение следующего неравенства:

$$\delta h > -h_0^{\min}$$

или

$$\frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{(T_1 - T_0)}{2} - h_0^{\min} - z \right) > -h_0^{\min}. \quad (11)$$

Если в выражение (11) подставить вместо  $-h_0^{\min}$  его значение из формулы (9) и принять, что  $\frac{(T_1 - T_0)}{2} \approx 0$ , то неравенство (11) примет вид

$$\frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0 - z \right) > \frac{1}{2} (r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0) = -h_0^{\min}$$

или

$$v_{\min} \geq \frac{D_0(r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0)}{2\rho g(T_0 - z)} = \frac{V_0(r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0)}{2(T_0 - z)} = -\frac{V_0 h_0^{\min}}{(T_0 - z)}. \quad (12)$$

Таким образом, принимая во внимание ранее изложенное, объем  $v$  каждой из выбранных для заполнения жидким балластом (забортной водой) цистерн должен находиться в следующих пределах:

$$\frac{V_0(r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0)}{2(T_0 - z)} \leq v \leq \frac{V_0}{y} \left( h_0^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{нр}} \right) \operatorname{tg} \theta_{\text{нр}}. \quad (13)$$

Первой необходимо заполнить балластом (забортной водой) ту цистерну, которая находится на борту судна, вошедшего в воду. После ее заполнения необходимо измерить угол крена судна  $\theta_1$ , а также рассчитать методом приема малого груза значения максимально возможной и минимально возможной метацентрической высоты судна по формулам:

$$h_1^{\min} = h_0^{\min} + \frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{TPC_0} - h_0^{\min} - z \right); \quad (14)$$

$$h_1^{\max} = h_0^{\max} + \frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{TPC_0} - h_0^{\max} - z \right). \quad (15)$$

Кроме измерения фактического угла крена судна  $\theta_1$ , необходимо рассчитать его возможные (граничные) значения  $\theta_1^{\max}$  и  $\theta_1^{\min}$  из условия, что метацентрическая высота судна соответствует значениям  $h_1^{\min}$  и  $h_1^{\max}$ , вычисленным по формулам (14) и (15). Если использовать для этого прямобортную формулу, то получим следующие выражения:

$$\theta_1^{\min} = \arctg \left[ \sqrt[3]{(-q_1^{\min} + \sqrt{D_1^{\min}})} + \sqrt[3]{(-q_1^{\min} - \sqrt{D_1^{\min}})} \right]; \quad (16)$$

$$D_1^{\max} = (q_1^{\max})^2 + \left( \frac{2h_1^{\max}}{3r_0} \right)^3; \quad (17)$$

$$q_1^{\max} = -\frac{1}{r_0} \left( l_0 + \frac{vy}{V_0 + v} \right); \quad (18)$$

$$D_1^{\min} = (q_1^{\min})^2 + \left( \frac{2h_1^{\min}}{3r_0} \right)^3; \quad (19)$$

$$q_1^{\min} = -\frac{vy}{r_0(V_0 + v)}. \quad (20)$$

Формулы (16)–(20) получены на основе выполнения следующих действий. Вначале для каждого из значений метацентрической высоты  $h_1^{\min}$  и  $h_1^{\max}$ , на основе прямобортной формулы, определяются зависимости плеч остойчивости судна, а именно:

$$l_{\theta}^{\min} = \left( h_1^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta \right) \sin \theta; \quad (21)$$

$$l_{\theta}^{\max} = \left( h_1^{\max} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta \right) \sin \theta - l_0 \cos \theta; \quad (22)$$

$$l_0 = \left( h_0 + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0 \right) \operatorname{tg} \theta_0, \quad (23)$$

где  $l_0$  — коэффициент, учитывающий величину смещения центра тяжести судна от диаметральной плоскости в исходном состоянии (с начальным креном судна  $\theta_0 \neq 0$ ).

Этот коэффициент должен быть определен из условия, что плечо восстанавливающего момента судна  $l_{\theta}^{\max}$  при  $h_0^{\max}$  и угле крена  $\theta_0$  должно быть равно нулю, т. е. должно соблюдаться следующее равенство:

$$\left( h_0^{\max} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0 \right) \sin \theta_0 - l_0 \cos \theta_0 = 0, \quad (24)$$

откуда можно получить значение плеча остойчивости по формуле (23). Очевидно также, что в случае  $h_{\phi} = h_0^{\min}$  коэффициент  $l_0$  равен нулю, так как при отрицательной метацентрической высоте начальный крен судна не связан со смещением центра тяжести судна, поэтому в уравнении (21) он отсутствует.

Углы крена судна ( $\theta_1^{\max}$ ,  $\theta_1^{\min}$ ) вычисляются из условия равенства плеч кренящего момента, вызванного заполнением первой цистерны балластом объемом  $v$ , центр объема которой отстоит от диаметральной плоскости судна на расстояние  $y$  и соответствующего плеча восстанавливающего момента, определяемого по формулам (21), (22), т. е. можно записать следующие равенства:

$$\frac{vy}{V_0} \cos \theta_1^{\min} = \left( h_1^{\min} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_1^{\min} \right) \sin \theta_1^{\min}; \quad (25)$$

$$\frac{vy}{V_0} \cos \theta_1^{\max} = \left( h_1^{\max} + \frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_1^{\max} \right) \sin \theta_1^{\max} - l_0 \cos \theta_1^{\max}. \quad (26)$$

Каждое из уравнений (25), (26) может быть преобразовано относительно неизвестного (искомого) угла крена к линейному кубическому уравнению вида

$$\operatorname{tg}^3 \theta_1 + 3p \operatorname{tg} \theta_1 + 2q = 0, \quad (27)$$

где  $p$ ,  $q$  — параметры, зависящие от известных величин, входящих в уравнения, конкретные выражения которых описываются уравнениями (18), (20).

Дискриминант уравнения (27) в данном случае всегда положителен:

$$D = q^2 + p^3 = q^2 + \left( \frac{2h_1}{3r_0} \right)^3 > 0. \quad (28)$$

Поэтому решение уравнения типа (27) известными методами [11] имеет один-единственный корень:

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \left[ \sqrt[3]{-q + \sqrt{D}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{D}} \right]. \quad (29)$$

Подставляя в уравнение (29) соответствующие параметры и величины, можно получить представленные ранее формулы (17)–(20), а затем — (16), (17).

**Замечание.** Так как  $h_1^{\min} < h_1^{\max}$ , рассчитанные по формулам (16), (17) значения углов крена должны подчиняться следующему неравенству:  $\theta_1^{\min} > \theta_1^{\max}$ . Действительно, при большей остойчивости судно должно наклоняться на меньший угол крена и наоборот.

Далее необходимо заполнить балластом вторую цистерну и после этого вновь измерить угол крена судна  $\theta_2$ , а также рассчитать дополнительно увеличенные значения максимально возможной  $h_2^{\max}$  и минимально возможной  $h_2^{\min}$  метацентрических высот судна, а также соответствующие им значения углов крена  $\theta_2^{\max}$ ,  $\theta_2^{\min}$ . Для этого используют формулы, аналогичные (14), (15), а также формулы (16)–(20) соответственно:

$$h_2^{\min} = h_1^{\min} + \frac{v}{V_0 + 2v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{2TPC_0} - h_1^{\min} - z \right); \quad (30)$$

$$h_2^{\max} = h_1^{\max} + \frac{v}{V_0 + 2v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{2TPC_0} - h_1^{\max} - z \right); \quad (31)$$

$$\theta_2^{\max} = \arctg \left[ \sqrt[3]{(-q_2^{\max} + \sqrt{D_2^{\max}})} + \sqrt[3]{(-q_2^{\max} - \sqrt{D_2^{\max}})} \right]; \quad (32)$$

$$\theta_2^{\min} = 0^0; \quad (33)$$

$$D_2^{\max} = (q_2^{\max})^2 + \left( \frac{2h_2^{\max}}{3r_0} \right)^3; \quad (34)$$

$$q_2^{\max} = -\frac{l_0}{r_0 \left( 1 + \frac{2v}{V_0} \right)}. \quad (35)$$

**Замечание.** Значение угла крена  $\theta_2^{\min}$  принимается равным нулю, так как при минимально возможной начальной остойчивости судна ( $h_\phi = h_0^{\min} < 0$ ), которая после заполнения цистерн становится положительной ( $h_2^{\min} > 0$ ), крен судна должен исчезнуть ввиду того, что изначально никакого поперечного смещения ЦТ судна не было. Аналогичный вывод следует из анализа уравнений (17)–(20). Действительно, следуя логике уравнения (18),  $q_2^{\min} = 0$ , так как центр масс балласта в обеих цистернах будет расположен на ДП судна ( $y = 0$ ), а это означает, что  $\theta_2^{\min}$ , вычисляемое по формуле типа (16), составит

$$\theta_2^{\min} = \arctg \left[ \sqrt[3]{(\sqrt{D_2^{\min}})} + \sqrt[3]{(-\sqrt{D_2^{\min}})} \right] = 0. \quad (36)$$

Необходимо сравнить измеренные и расчетные значения углов крена и оценить фактическое значение начальной метацентрической высоты судна, руководствуясь следующими правилами:

**Правило 1.** Если  $\theta_1^{\max} \leq \theta_1 \leq \theta_1^{\min}$  и / или  $0 \leq \theta_2 \leq \theta_2^{\max}$ , то фактическая начальная остойчивость судна обеспечена и его метацентрическая высота находится в пределах:

$$h_2^{\min} \leq h_{\text{факт}} \leq h_2^{\max}. \quad (37)$$

**Правило 2.** Если  $\theta_1 < \theta_1^{\max}$  и  $0 \leq \theta_2 \sim \theta_2^{\max}$ , то фактическая остойчивость судна обеспечена. При этом она выше максимального значения  $h_0^{\max}$ , полученного при расчете по формуле вида (1).

**Замечание.** Правило 2 логически следует из того, что фактическая начальная остойчивость судна после его погрузки может быть выше принятого расчетного максимального значения, т. е.

$$h_{\text{факт}} > h_0^{\max}. \quad (38)$$

Тогда после заполнения первой цистерны балластом фактический крен судна  $\theta_1$  окажется меньше расчетного, т. е.  $\theta_1 < \theta_1^{\max}$ . С учетом данного обстоятельства и было предложено правило 2. Причем, в соответствии с этим правилом, соотношение  $\theta_2 \sim \theta_2^{\max}$  означает, что обе величины приблизительно равны друг другу.

### Обсуждение (Discussion)

Рассмотрим пример реализации предложенного способа оценки и восстановления устойчивости. Пусть грузовое судно (основные параметры и характеристики которого известны и представлены в таблицах [7]) после погрузки имеет среднюю осадку  $T = 5,0$  м и статический крен на правый борт  $\theta_0 = 2,5^\circ$ . При этом, в соответствии с гидростатическими таблицами этого судна [7], его объемное водоизмещение  $V_0 = 5435$  м<sup>3</sup>, метацентрический радиус  $r_0 = 4,445$  м, аппликата центра величины  $z_{c_0} = 2,645$  м и вес принимаемого груза, увеличивающего осадку судна на 1 см,  $TPC_0 = 12478$  кН/м. Предположим также, что после погрузки всех грузов выполнен расчет метацентрической высоты судна (по формуле (1)), которая составила  $h_0 = 0,40$  м.

Необходимо с помощью предложенного способа выполнить опытную проверку начальной устойчивости судна после погрузки.

#### Решение

1. Согласно предложенному способу примем расчетное значение метацентрической высоты за максимально возможное значение, т. е.  $h_0^{\max} = h_0 = 0,40$  м.

2. Исходя из предположения, что крен судна  $\theta_0$  вызван отрицательной начальной устойчивостью, вычислим минимально возможное значение метацентрической высоты судна по формуле (3):

$$h_0^{\min} = -\frac{1}{2} r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_0 = -0,5 \cdot 4,445 \operatorname{tg}^2 2,5^\circ = -0,004237 \text{ м.}$$

3. Установим предельное значение угла крена судна  $\theta_{\text{пр}}$ , на которое можно безопасно накрентить судно при опытной проверке устойчивости. Для этого, например, можно руководствоваться правилами [9], [10], которые устанавливают наименьшую высоту свободного борта судна (не менее 1,0 м) при его наклонениях в процессе работы судовых кранов. В данном случае при условии, что ширина судна  $B = 16,6$  м, а общая высота борта (наименьшая) составляет  $F = 8,2$  м, нетрудно показать, что для обеспечения минимальной высоты борта 1,0 м угол крена судна не должен превышать следующее значение:

$$\theta_{\text{пр}} \leq \arctg \left[ \frac{2(F - T_0 - 1,0)}{B} \right] = \arctg \left[ \frac{2(8,2 - 5,0 - 1,0)}{16,6} \right] = 15,2^\circ.$$

4. Определим объем  $v$  двух симметрично расположенных цистерн для заполнения их жидким балластом (заборной водой) из условия соблюдения неравенства (13), а именно при условии, что  $z = 0,85$  м,  $y = \pm 3,6$  м — координаты центров объемов этих цистерн, их объем должен быть не менее следующих значений:

$$v \geq -\left( \frac{h_0^{\min} V_0}{T_0 - z} \right) = 0,004237 \frac{5435}{5 - 0,85} = 5,55 \text{ м}^3,$$

и не более

$$v \leq \frac{V_0 (h_0^{\min} + 0,5 r_0 \operatorname{tg}^2 \theta_{\text{пр}}) \operatorname{tg} \theta_{\text{пр}}}{y} =$$

$$= \frac{5435 (-0,0042375 + 0,5 \cdot 4,445 \operatorname{tg}^2 15,2^\circ) \operatorname{tg} 15,2^\circ}{3,6} = 65,56 \text{ м}^3.$$

Предположим, что подобранные цистерны имеют (каждая) объем  $v = 40$  м<sup>3</sup>. Это означает, что они вполне подходят для проведения процедуры проверки устойчивости судна, так как неравенство (13) соблюдено:  $5,55 \leq 40 \leq 65,56$ .

Заполняем жидким балластом (забортной водой плотностью  $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ ) цистерну, расположенную на правом борту. Предположим, что в результате этого крен судна увеличивается до  $\theta_1 = 5^\circ$  (по показаниям кренометра).

5. По формулам (14), (15) рассчитываем возможное максимальное  $h_1^{\max}$  и минимальное  $h_1^{\min}$  значения метацентрической высоты судна:

$$h_1^{\min} = h_0^{\min} + \frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{2TPC_0} - h_0^{\min} - z \right) =$$

$$= -0,004237 + \frac{40}{5435 + 40} (5 + 0,0163 - 0,85) = 0,02620 \text{ м};$$

$$h_1^{\max} = h_0 + \frac{v}{V_0 + v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{TPC_0} - h_0 - z \right) =$$

$$= 0,40 + 0,007306 (5 + 0,0163 - 0,40 - 0,85) = 0,427 \text{ м},$$

а затем по формулам (16)–(23) — возможные соответствующие им значения углов крена судна:

$$l_0 = \left( h_0 + \frac{1}{2} r_0 \text{tg}^2 \theta_0 \right) \text{tg} \theta_0 = (0,4 + 2,2225 \text{tg}^2 2,5^\circ) \text{tg} 2,5^\circ = 0,01763 \text{ м};$$

$$q_1^{\max} = -\frac{1}{r_0} \left( l_0 + \frac{vy}{V_0 + v} \right) = \frac{-1}{4,445} \left( 0,01763 + \frac{40 \cdot 3,6}{5435 + 40} \right) = -0,0098833;$$

$$D_1^{\max} = (q_1^{\max})^2 + \left( \frac{2h_1^{\max}}{3r_0} \right)^3 = 0,0098833^2 + \left( \frac{2 \cdot 0,4275}{3 \cdot 4,445} \right)^3 = 0,00036126;$$

$$\theta_1^{\max} = \arctg \left[ \sqrt[3]{(-q_1^{\max} + \sqrt{D_1^{\max}})} + \sqrt[3]{(-q_1^{\max} - \sqrt{D_1^{\max}})} \right] =$$

$$= \arctg \left[ (0,0098833 + 0,019007)^{1/3} + (0,0098833 - 0,019007)^{1/3} \right] = 5,59^\circ;$$

$$q_1^{\min} = -\frac{vy}{r_0(V_0 + v)} = -\frac{40 \cdot 3,6}{4,445(5435 + 40)} = -0,00591707;$$

$$D_1^{\min} = (q_1^{\min})^2 + \left( \frac{2h_1^{\min}}{3r_0} \right)^3 = (-0,0059171)^2 + \left( \frac{2 \cdot 0,02620}{3 \cdot 4,445} \right)^3 = 3,5072 \cdot 10^{-5};$$

$$\sqrt{D_1^{\min}} = 0,00592221;$$

$$\theta_1^{\min} = \arctg \left[ \sqrt[3]{(-q_1^{\min} + \sqrt{D_1^{\min}})} + \sqrt[3]{(-q_1^{\min} - \sqrt{D_1^{\min}})} \right] =$$

$$= \arctg [0,227916 - 0,017258] = 11,89^\circ.$$

6. Сравнив расчетный и фактический угол крена судна после заполнения первой цистерны, получим следующее:

$$(\theta_1^{\max} = 5,59) < (\theta_1 = 5) < (\theta_1^{\min} = 11,89).$$

Анализ полученного неравенства свидетельствует о том, что исходная начальная остойчивость судна была близка к верхнему пределу:  $h_{\text{факт}} \approx h_0^{\max} = 0,4 \text{ м}$ , так как измеренный  $\theta_1$  и расчетный  $\theta_1^{\max}$  углы крена судна после заполнения первой цистерны примерно одинаковы. Более того, поскольку  $\theta_1^{\max} > \theta_1$ , фактическая метацентрическая высота судна  $h_1^{\phi}$  несколько превосходит  $h_1^{\max}$ . Можно достаточно уверенно утверждать, что  $h_1^{\phi} \geq 0,43 \text{ м}$ .

Затем заполняем жидким балластом вторую подобранную цистерну, расположенную на левом борту. Предположим, что в результате этого крен судна уменьшился до  $\theta_2 = 2^\circ$  (по показаниям кренометра).

По формулам (30), (31) рассчитываем значения метацентрических высот  $h_2^{\max}$  и  $h_2^{\min}$  судна после заполнения балластом обеих цистерн:

$$h_2^{\max} = h_1^{\max} + \frac{v}{V_0 + 2v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{2TPC_0} - h_1^{\max} - z \right) =$$

$$= 0,4275 + \frac{40}{5485} (5 + 0,0161 - 0,4275 - 0,85) = 0,4548 \text{ м};$$

$$h_2^{\min} = h_1^{\min} + \frac{v}{V_0 + 2v} \left( T_0 + \frac{\rho g v}{2TPC_0} - h_1^{\min} - z \right) =$$

$$= 0,0262 + \frac{40}{5485} (5 + 0,0161 - 0,0262 - 0,85) = 0,05648 \text{ м},$$

а затем по формулам (32), (34), (35) — значение  $\theta_2^{\max}$ :

$$q_2^{\max} = -\frac{l_0}{r_0 \left( 1 + \frac{2v}{V_0} \right)} = -\frac{0,0177}{4,445 \left( 1 + \frac{40}{5435} \right)} = -0,00391;$$

$$D_2^{\max} = (q_2^{\max})^2 + \left( \frac{2h_2^{\max}}{3r_0} \right)^3 = 0,00391^2 + \left( \frac{2 \cdot 0,4548}{3 \cdot 4,445} \right)^3 = 0,0003328;$$

$$\sqrt{D_2^{\max}} = 0,01824;$$

$$\theta_2^{\max} = \arctg \left[ \sqrt[3]{(0,00391 + 0,01824)} + \sqrt[3]{(0,00391 - 0,01824)} \right] = 2,17^\circ.$$

$$\theta_2^{\min} = 0^\circ.$$

Сравнив измеренные и расчетные значения углов крена, получим:

$$(\theta_1^{\max} = 5,59) \approx (\theta_1 = 5) < (\theta_1^{\min} = 11,89);$$

$$(\theta_2^{\min} = 0) < (\theta_2 = 2) < (\theta_2^{\max} = 2,17).$$

Из этих неравенств следует  $(h_2^{\min} = 0,0565) < h_{\text{факт}} \leq (h_2^{\max} = 0,4548)$ .

Полученные результаты означают следующее:

1. Начальная остойчивость судна после заполнения цистерн балластом однозначно положительна и находится в указанных пределах 0,0565–0,457 м.

2. Поскольку в обоих неравенствах измеренные углы крена судна ближе к расчетным величинам  $\theta_1^{\max}$  и  $\theta_2^{\max}$ , при этом  $\theta_1 < \theta_1^{\max}$  и  $\theta_2 < \theta_2^{\max}$ , т. е. фактическая остойчивость судна несколько превосходит расчетное значение:  $h_2^{\phi} \geq 0,457$  м.

Представляет определенный интерес вопрос о том, как будут изменяться числовые значения углов крена судна ( $\theta_1^{\min}$ ,  $\theta_1^{\max}$ ,  $\theta_2^{\min}$ ,  $\theta_2^{\max}$ ) и его метацентрические высоты в процессе проверки остойчивости судна предлагаемым способом в зависимости от размера выбранных балластных цистерн ( $v$ ). Для этого на основе данных приведенного примера были выполнены соответствующие расчеты, основные результаты которых представлены в таблице основных параметров посадки и остойчивости судна (с. 1014) в процессе предлагаемого способа оценки и восстановления остойчивости судна (по данным рассмотренного примера). Из приведенных данных видно, что с увеличением объема балластных цистерн  $v$  значительно увеличиваются возможные значения углов крена судна после заполнения первой балластной цистерны ( $\theta_1^{\min}$  и  $\theta_1^{\max}$ ), в том

числе возрастает разница между ними ( $\theta_1^{\max} - \theta_1^{\min}$ ). Следовательно, с ростом объема балластных цистерн возрастает чувствительность и точность предложенного в работе метода, что связано с увеличением точности измерения углов крена судна, особенно их разницы.

### Результаты расчета основных параметров посадки и остойчивости судна в процессе реализации предлагаемого способа

$v, \text{ м}^3$	$h_1^{\min}, \text{ м}$	$h_1^{\max}, \text{ м}$	$\theta_1^{\min}, \text{ град.}$	$\theta_1^{\max}, \text{ град.}$	$h_2^{\min}, \text{ м}$	$h_2^{\max}, \text{ м}$	$\theta_2^{\max}, \text{ град.}$	$\theta_1^{\max} - \theta_1^{\min}, \text{ град.}$
6	0,0003	0,404	6,89	3,02	0,0049	0,4083	2,45	0,57
10	0,034	0,4069	7,98	3,35	0,011	0,4138	2,41	0,94
20	0,11	0,4138	9,75	4,15	0,0262	0,4275	2,33	1,82
30	0,186	0,421	10,96	4,89	0,0414	0,441	2,25	2,64
40	0,262	0,428	11,89	5,59	0,0565	0,4548	2,18	3,41
50	0,0338	0,4344	12,66	6,25	0,0715	0,4684	2,11	4,14
60	0,0414	0,4412	13,32	6,86	0,0865	0,482	2,04	4,82
65	0,0452	0,445	13,61	7,15	0,094	0,4887	2,00	5,15

Кроме того, видно, что после заполнения второй балластной цистерны угол крена  $\theta_2^{\max}$  судна мало зависит от объема балластных цистерн  $v$ . Это означает, что точность оценки остойчивости судна после заполнения второй балластной цистерны также будет мало зависеть от этого объема.

### Выводы (Conclusion)

На основе результатов проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработан практический способ оценки и восстановления начальной остойчивости судна в условиях неполной информации о принятом грузе, в основе которого — процедура последовательного заполнения жидким балластом двух низкорасположенных и симметричных относительно диаметральной плоскости судна цистерн. В отличие от известных способов предлагается измерять параметры посадки судна (угол крена), а также рассчитывать диапазон возможных значений метацентрической высоты *до* и *после* заполнения балластом каждой из выбранных цистерн.

2. Подробно изложены методика и необходимые расчетные формулы, позволяющие практически реализовать предложенный подход как при выборе размера балластных цистерн, так и при оценке посадки и начальной остойчивости судна, включая расчет предельного значения угла крена и возможных значений метацентрической высоты судна.

3. Приведенный численный пример реализации показал, что точность и чувствительность разработанного способа оценки и восстановления остойчивости судна существенным образом зависит от объема цистерн, используемых для балластировки (чем больше этот объем, тем точнее и чувствительнее предложенный способ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизов В. Г. Теория корабля: учебник / В. Г. Сизов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Транслит, 2014. — С. 95–100.
2. Дорогостайский Д. В. Теория и устройство судна / Д. В. Дорогостайский, М. М. Жученко, Н. Я. Мальцев. — Л.: Судостроение, 1976. — С. 178–187.
3. Rawson K. J. Basic Ship Theory / K. J. Rawson, E. C. Tupper. — London & New York: Longman, 1976. — Vol. 1. — Pp. 101–138.
4. Пат. 2240254 Российская Федерация, МПК В63В 39/00. Способ определения метацентрической высоты судна и система для его осуществления / В. Е. Салов, А. А. Финогенов, Д. Ю. Холодов; заяв. и патентообл. ЗАО «Судовые системы» (RU). — № 2003138261/11; заявл. 24.12.2003; опубл. 20.11.2004.

5. Пат. 2405712 Российская Федерация, МПК В63В 39/14. Способ контроля остойчивости судна / Ю. И. Нечаев, В. В. Ярисов; заяв. и патентообл. Ю. И. Нечаев, В. В. Ярисов. — № 2009117935/11; заявл. 12.05.2009; опубл. 10.12.2010.

6. Мельник В. Н. Эксплуатационные расчеты мореходных характеристик судна / В. Н. Мельник. — М.: Транспорт, 1990. — С. 28–50.

7. Никитин Е. В. Оценка посадки и остойчивости судна в условиях эксплуатации / Е. В. Никитин. — Севастополь: Академия ВМС им. П. С. Нахимова, 2011. — С. 316–317.

8. Derret D. R. Ship Stability for Masters and Mates / D. R. Derret, C. V. Barrass. — 5-th edition. — Butterworth-Heinemann, 1999. — P. 51–230.

9. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОШС), одобр. Рез. MSC.267(85), с попр. — 4-е изд. — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2019. — 242 с.

10. Annex 7. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016). Amendments to part B of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code). — MSC, 2016. — 33 p.

11. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М.: Главиздат, 1953. — С. 135–136.

## REFERENCES

1. Sizov, V. G. *Teoriya korablya. Uchebnik*. 4<sup>th</sup> ed. M.: Translit, 2014.
2. Dorogostaiskii, D. V., M. M. Zhuchenko, and N. Ya. Mal'tsev. *Teoriya i ustroistvo sudna*. L.: Sudostroenie, 1976.
3. Rawson, K. J. and E. C. Tupper. *Basic Ship Theory*. Vol. 1. London & New York: Longman, 1976.
4. Salov, V. E., A. A. Finogenov, and D. Yu. Kholodov. RU 2240 254 C1, IPC B 63B 39/00. Sposob opredeleniya metatsentricheskoi vysoty sudna i sistema dlya ego osushchestvleniya. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Nov. 2004.
5. Nechaev, Yu. I., and V. V. Yarisov. RU 2405 712 C1, IPC B 63B 39/14. Sposob kontrolya ostoichivosti sudna. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Dec. 2010.
6. Mel'nik, V. N. *Ekspluatatsionnye raschety morekhodnykh kharakteristik sudna*. M.: Transport, 1990.
7. Nikitin, E. V. *Otsenka posadki i ostoichivosti sudna v usloviyakh ekspluatatsii*. Sevastopol': Akademiya VMS im. P. S. Nakhimova, 2011.
8. Derrett, D. R., and Bryan Barrass. *Ship Stability for Masters and Mates*. 5th Edition. Butterworth-Heinemann, 1999.
9. *International code on intact stability, 2008 (2008 is code). Resolution MSC.267(85) as amended*. 4<sup>th</sup> edition. SPb.: АО «TsNIIMF», 2019.
10. Annex 7. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016). Amendments to part B of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code). MSC, 2016.
11. Bronshtein, I. N., and K. A. Semendyaev. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov*. M.: Glavizdat, 1953.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Никитин Евгений Васильевич** —  
доктор технических наук, профессор  
Черноморское высшее военно-морское ордена  
Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова  
299028, Российская Федерация, г. Севастополь,  
ул. Дыбенко, 1  
e-mail: yvnik76@yandex.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Nikitin, Yevgeny V.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
The Black Sea Naval College named  
after P. S. Nakhimov  
1 Dybenko Str., Sevastopol, 1299028,  
Russian Federation  
e-mail: yvnik76@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 9 декабря 2020 г.  
Received: December 9, 2020.