

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-60-66
УДК 629.5.015.12

С.М. Вилков
ОАО «Санкт-Петербургская судостроительная компания», Санкт-Петербург, Россия

КОНТРОЛЬ ОСТОЙЧИВОСТИ КОРАБЛЯ ПО УГЛУ КРЕНА НА УСТАНОВИВШЕЙСЯ ЦИРКУЛЯЦИИ

Объект и цель научной работы. Исследуются существующие подходы к оценке остойчивости корабля (судна) по углу крена на установившейся циркуляции (УЦ) с целью обоснования методики расчета величины его начальной поперечной метацентрической высоты.

Материалы и методы. В работе использованы данные публикаций по определению угла крена на УЦ. Проведен анализ существующих зависимостей по оценке начальной поперечной остойчивости по углу крена на УЦ. Установлено, что до настоящего времени нет обоснованной методики такой оценки, а публикации по теме содержат ряд неточностей и ошибок.

Основные результаты. Получены аналитические зависимости для расчета начальной поперечной метацентрической высоты корабля по углу крена на УЦ. Подтверждена необходимость использования при проведении расчетов уточненного значения аппликаты точки приложения гидродинамической силы.

Заключение. Разработана методика, позволяющая оперативно контролировать остойчивость корабля (судна) и аппликату его центра тяжести по углу крена на установившейся циркуляции.

Ключевые слова: установившаяся циркуляция корабля, угол крена, метацентрическая высота.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-60-66
UDC 629.5.015.12

S.M. Vilkov
St. Petersburg Shipbuilding Company JSC, St. Petersburg, Russia

SHIP STABILITY CONTROL IN TERMS OF STEADY-TURNING HEEL ANGLE

Object and purpose of research. This paper discusses existing approaches to ship stability assessment in terms of steady-turning heel so as to justify the calculation procedure for its initial metacentric height.

Materials and methods. The study relies on available literature discussing steady-turning heel calculation. It analyses current calculation expressions estimating initial transverse stability in terms of steady-turning heel angle. It has been established that so far this estimate has not been substantiated by any reliable procedure, and the literature on this topic contains a number of inaccuracies and even errors.

Main results. The study presents analytical calculation expressions for initial transverse metacentric height of ship in terms of its steady-turning heel. It confirms that calculations have to be performed with a more accurate value for Z-coordinate of hydrodynamic force application point.

Conclusion. The procedure developed under this study enables fast monitoring of ship stability and Z-coordinate of its CG in terms of steady-turning heel angle.

Keywords: steady turning, heel, metacentric height.

The author declares no conflicts of interest.

Для цитирования: Вилков С.М. Контроль остойчивости корабля по углу крена на установившейся циркуляции. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 1(403): 60–66.

For citations: Vilkov S.M. Ship stability control in terms of steady-turning heel angle. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 1(403): 60–66 (in Russian).

В процессе эксплуатации корабля по различным причинам (главным образом из-за накопившихся ошибок в учете переменных грузов) возникает потребность в уточнении начальной остойчивости и положения центра тяжести.

Оценка начальной остойчивости – этого, по образному выражению С.О. Макарова [1], «качества сокровенного» – важнейшая задача безопасности мореплавания. Существует несколько способов такой оценки. Это, прежде всего, кренование корабля [2], а также оценка начальной метацентрической высоты по периоду качки по «капитанской» формуле [3, 4] или по углу крена на установившейся циркуляции [5, 6].

Несмотря на интенсивное развитие новых технологий по оценке остойчивости корабля, сохраняют актуальность относительно простые и надежные методы такой оценки. Представляется, что определение остойчивости корабля по углу крена на УЦ относится именно к таким методам.

Необходимо, однако, отметить, что до настоящего времени нет достаточно обоснованной методики такой оценки, а публикации на эту тему часто содержат ряд неточностей и даже ошибок. В настоящей работе сделана попытка не только проанализировать и уточнить существующие подходы, но и разработать методику практического определения начальной метацентрической высоты корабля и аппликаты его центра тяжести по углу крена на УЦ.

Постановка задачи

Formulation of task

Обратимся к задаче определения начальной поперечной метацентрической высоты и аппликаты центра тяжести корабля на основе измерения его угла крена на УЦ. Будем считать, что углы крена корабля не выходят за пределы применимости метацентрической формулы остойчивости, а ветер и волнение отсутствуют.

Рассмотрим силы и моменты, действующие на корабль в поперечной плоскости при движении по криволинейной траектории с переложением рулем.

Составляя уравнение моментов сил, действующих в плоскости шпангоутов (рис. 1) относительно оси, проходящей через точку пересечения линии действия силы Y_r с диаметральной плоскостью корабля, будем иметь [7]:

$$Y_i(z_G - z_r) + Y_p(z_p - z_r) - M_\theta = 0, \quad (1)$$

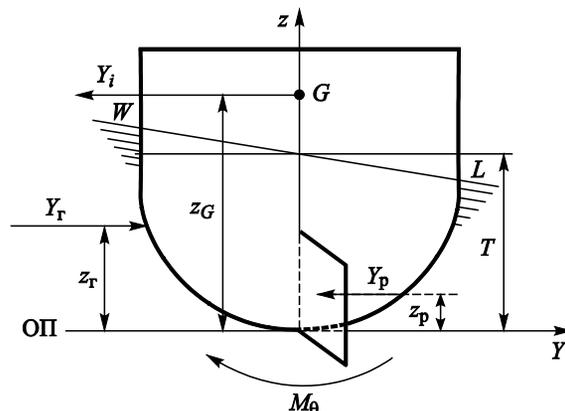


Рис. 1. Силы, вызывающие крен корабля на установившейся циркуляции:

Y_i – центробежная сила инерции массы корпуса; Y_r – гидродинамическая сила; Y_p – поперечная сила на движительно-рулевом комплексе; M_θ – восстанавливающий момент; T – осадка корабля; z_G – аппликата центра тяжести (ЦТ) корабля; z_r – аппликата точки приложения гидродинамической силы; z_p – аппликата точки приложения силы, действующей на переложенный руль; ОП – основная плоскость

Fig. 1. Forces contributing to steady-turning heel: Y_i – centrifugal force (hull inertia); Y_r – hydrodynamic force; Y_p – transverse force on steering & propulsion units; M_θ – restoring moment; T – ship draft; z_G – Z-coordinate of ship CG; z_r – Z-coordinate of hydrodynamic force application point; z_p – Z-coordinate of application point for the force acting on the turned rudder; BL – base line

Раскроем выражение для силы Y_i :

$$Y_i = \frac{D}{g}(1 + k_{11})\frac{v^2}{R}, \quad (2)$$

где D – сила тяжести (водоизмещение) корабля, g – ускорение свободного падения, k_{11} – коэффициент продольной присоединенной массы корабля, v – скорость корабля на УЦ, R – радиус УЦ.

Восстанавливающий момент M_θ в соответствии с метацентрической формулой остойчивости для малых углов крена корабля θ ($\leq 12^\circ$) имеет вид:

$$M_\theta = Dh\theta, \quad (3)$$

где h – начальная поперечная метацентрическая высота.

Расчеты [7] показывают, что сила Y_p соизмерима с Y_i только в маневренном периоде движения, поэтому при анализе крена на УЦ можно положить $Y_i \gg Y_p$ и опустить второе слагаемое в формуле (1). Кроме того, можно пренебречь малым по значению коэффициентом продольной присоединенной массы k_{11} по отношению к единице.

Окончательно вместо уравнения (1) можно записать выражение для угла крена на УЦ в виде:

$$\theta = \frac{v^2}{g \cdot R \cdot h} (z_G - z_r). \quad (4)$$

Анализ существующих подходов к оценке остойчивости по углу крена на установившейся циркуляции

Analysis of existing approaches to ship stability assessment in terms of steady-turning heel

Для практических расчетов выражение (4) часто представляют в виде зависимости не от параметров собственно циркуляции (радиуса R и скорости v), а от длины корабля L и его линейной скорости перед выходом на циркуляцию v_0 [7]:

$$\theta = \frac{\bar{v}^2 v_0^2 \bar{\omega}}{g \cdot L \cdot h} (z_G - z_r), \quad (5)$$

где $\bar{v} = v/v_0$ – относительная скорость корабля на УЦ, $\bar{\omega} = L/R$ – безразмерная угловая скорость корабля на УЦ.

Для практических расчетов величины \bar{v} используют приближенные зависимости, полученные в результате обработки модельных и натурных экспериментов [7–11].

К настоящему времени определено множество таких зависимостей, главным образом для морских и речных судов. Наиболее известной является эмпирическая зависимость Г.А. Фирсова [8], опубликованная в 1946 г.:

$$\bar{v} = \text{th} (0,408 / \bar{\omega}). \quad (6)$$

В последующем были получены многочисленные зависимости, которые могут быть представлены в обобщенном виде [11]:

$$\bar{v} = (1 + N_O \bar{\omega}^2)^{-q}, \quad (7)$$

где N_O и q – положительные числа.

Если ввести обозначение: $f(\bar{\omega}) = \bar{v}^2 \bar{\omega}$ и подставить в него выражение (7), получим:

$$f(\bar{\omega}) = (1 + N_O \bar{\omega}^2)^{-2q} \bar{\omega}. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что в предельных случаях, когда корабль идет прямым курсом ($\bar{\omega} = 0$) или вращается вокруг вертикальной оси без смеще-

ния ($\bar{\omega} \rightarrow \infty$), функция $f(\bar{\omega})$, а следовательно, и угол крена обращаются в ноль. Это означает, что при определенном значении $\bar{\omega}$, равном $\bar{\omega}^*$, угол крена достигает максимума.

Решая уравнение $\frac{df(\bar{\omega})}{d\bar{\omega}} = 0$, получим:

$$\bar{\omega}^* = (N_O (4q - 1))^{-\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Отсюда:

$$f(\bar{\omega}^*) = ((4q - 1) / 4q)^{2q} (N_O (4q - 1))^{-\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

Выражение для максимального угла крена θ_{\max} принимает вид:

$$\theta_{\max} = f(\bar{\omega}^*) \frac{v_0^2}{g \cdot L \cdot h} (z_G - z_r), \quad (11)$$

а максимальный кренящий момент можно представить в виде:

$$M_{\text{кр max}} = f(\bar{\omega}^*) \frac{D v_0^2}{g \cdot L} (z_G - z_r). \quad (12)$$

В качестве примера рассмотрим полуэмпирические зависимости для θ_{\max} и $M_{\text{кр max}}$, предложенные ведущими специалистами [7–10] для транспортных судов (табл.).

Наиболее часто в различных источниках используется формула Г.А. Фирсова (к сожалению, в некоторых публикациях и даже справочниках в этой формуле вместо множителя 0,238 ошибочно стоит 0,233):

$$M_{\text{кр max}} = 0,238 \frac{D v_0^2}{g \cdot L} \left(z_G - \frac{T}{2} \right). \quad (13)$$

В выражении для $M_{\text{кр max}}$, допускаемого Российским морским регистром судоходства [12], с ошибкой в безопасную сторону принято: $f(\bar{\omega}^*) = 0,20$.

При этом аппликата z_r , как и в формуле (13), принимается равной половине осадки:

$$M_{\text{кр max}} = 0,20 \frac{D v_0^2}{g \cdot L} \left(z_G - \frac{T}{2} \right). \quad (14)$$

Необходимо отметить, что если принять $z_r = T/2$, то расчеты по формулам (11) и (12) различных авторов, представленных в таблице, дают близкие результаты, и отдать предпочтение кому-либо из них затруднительно.

Таблица. Параметры полуэмпирических зависимостей для θ_{\max} и $M_{\text{кр max}}$ для транспортных судов
Table. Semi-empirical parameters for θ_{\max} and $M_{\text{heel max}}$ of cargo carriers

Параметры	Г.А. Фирсов [8]	Г.В. Соболев [7]	А.М. Басин [9]	Р.Я. Першиц [10]
q	–	1/3	1/2	1
N_0	–	10	3,9	1,9
$\bar{\omega}^*$	0,375	0,548	0,506	0,419
\bar{v}	0,796	0,630	0,707	0,750
$f(\bar{\omega}^*)$	0,238	0,217	0,253	0,236

Аппликата ЦТ корабля связана с h формулой

$$z_G = z_M - h, \quad (15)$$

где z_M – аппликата поперечного метацентра корабля. После преобразований выражения (11) относительно h , получим:

$$h = \frac{z_M - z_T}{1 + \frac{g \cdot L \cdot \theta_{\max}}{f(\bar{\omega}^*)v_0^2}}. \quad (16)$$

Если принять, что $z_T = T/2$, то:

$$h = \frac{z_M - \frac{T}{2}}{1 + \frac{g \cdot L \cdot \theta_{\max}}{f(\bar{\omega}^*)v_0^2}}. \quad (17)$$

Для формулы Г.А. Фирсова (13) выражение (17) имеет вид:

$$h = \frac{z_M - \frac{T}{2}}{1 + \frac{g \cdot L \cdot \theta_{\max}}{0,238 \cdot v_0^2}}. \quad (18)$$

Если аналогичные преобразования проделать с выражением (4), то получим:

$$h = \frac{z_M - z_T}{1 + \frac{g \cdot R \cdot \theta}{v^2}}. \quad (19)$$

Необходимо отметить, что выражение для величины h по структуре, аналогичной формулам (18) и (19), впервые было опубликовано в 1968 г. (статья Л.Р. Аксютин «Определение метацентрической высоты по углу крена на циркуляции» [5]), а затем повторено во многих его публикациях, в т.ч. в книге [13, с. 132, формула (63)].

Это выражение имеет вид:

$$h = \frac{0,233v_{0,8}^2(2z_M - d)}{gD_{\text{ц}} \sin \theta + 0,466v_{0,8}^2}, \quad (20)$$

где $D_{\text{ц}} = 2R$ – диаметр УЦ, м; $v_{0,8}$ – скорость на УЦ, принимаемая равной $0,8v_0$, м/с; d – осадка судна, м.

Примем в выражении (20) $\sin \theta \approx \theta$, $d = T$ и преобразуем его к виду (18):

$$h = \frac{z_M - \frac{T}{2}}{1 + \frac{g \cdot R \cdot \theta}{0,233 \cdot v_{0,8}^2}}. \quad (21)$$

Если сопоставить формулу (21) с формулами (18) и (19), то становится очевидным, что она ошибочна и не может быть рекомендована для создания методики оценки остойчивости корабля по углу крена на УЦ. Действительно, даже если принять, что скорость на УЦ v равна $0,8v_0$, как предлагает автор [13], то за счет появления множителя «0,233» в формуле (21), величина h будет занижена в несколько раз.

Отметим, что позднее Ю.А. Комаровский в статье «Использование GPS-аппаратуры для оценки остойчивости судна по углу крена на установившейся циркуляции» [6] также использовал ошибочное выражение (20).

Обоснование методики оценки остойчивости корабля по углу крена на установившейся циркуляции

Justification of the procedure for ship stability assessment in terms of steady-turning heel

Следует отметить, что формулу (16) можно использовать только когда известен максимально возможный угол крена θ_{\max} . При этом чему равен

этот угол у конкретного корабля, заранее неизвестно. Кроме того, если существуют опасения, что остойчивость корабля недостаточна, выходить на максимальный угол крена на циркуляции опасно. Таким образом, применять формулу (16) для оценки остойчивости по углу крена на УЦ не представляется возможным.

Кроме того, часто принимаемое в публикациях, например [11], значение $z_r = T/2$ не вполне корректно. Как показали исследования [14], z_r существенно зависит от ширины и осадки корабля (судна). Для определения z_r можно воспользоваться зависимостью В.Г. Павленко [11] в виде (22), представленной на рис. 2. Эта зависимость практически точно аппроксимирует график Р.Я. Першица [14], построенный на основе обобщения исследований по определению аппликаты точки приложения гидродинамических сил, выполненных в 1950-х гг.:

$$\frac{z_r}{T} = 4 - \frac{B}{T} + 0,02 \left(\frac{B}{T} - 5,35 \right)^3; \quad 2,5 \leq \frac{B}{T} \leq 8,0. \quad (22)$$

Заметим, что $z_r/T = 0,5$ при отношении $B/T \approx 3,34$ (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что для получения корректных оценок остойчивости необходимо при определении z_r использовать формулу (22). В этой связи следует обратить внимание на формулу (14) для максимального кренящего момента, допускаемого Российским морским регистром судоходства. Очевидно, что, если $B/T < 3,34$, то расчет по формуле (14) приведет к ошибке в опасную сторону. В этом случае вместо $z_r = T/2$ необходимо использовать значение z_r по формуле (22).

Обратимся к формуле (19). С ее помощью можно достаточно просто получить оценку началь-

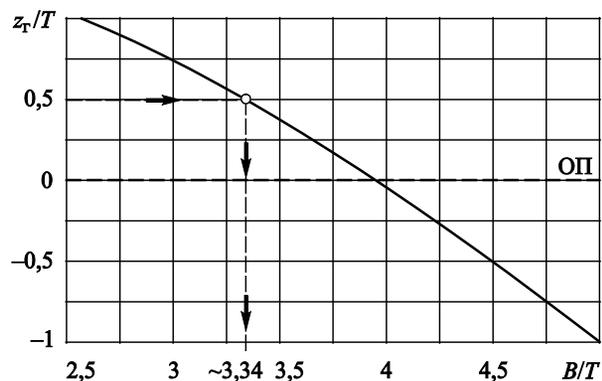


Рис. 2. Зависимость величины z_r/T от отношения B/T
Fig. 2. Ratio z_r/T as function of B/T

ной метацентрической высоты, а затем по формуле (15) – и аппликату ЦТ корабля. Однако на практике точно определить радиус циркуляции корабля без оборудованного полигона – непростая задача (ссылки на данные работы есть в статье Ю.А. Комаровского [6]).

Чтобы обойти это затруднение, умножим и разделим второе слагаемое знаменателя формулы (19) на 2π . После преобразований получим выражение:

$$h = \frac{z_M - z_r}{1 + \frac{gt_{\text{ц}}\theta}{2\pi v}}, \quad (23)$$

где $t_{\text{ц}} = 2\pi R/v$, c – период циркуляции корабля с установившейся скоростью v .

Для угла крена θ° вместо (23) будем иметь:

$$h = \frac{z_M - z_r}{1 + 0,00278 \frac{gt_{\text{ц}}\theta^\circ}{v}}. \quad (24)$$

Полученная зависимость (24) может быть использована для оперативной оценки остойчивости корабля по углу крена на УЦ, а затем – аппликаты ЦТ корабля по формуле (15). При этом отпадает необходимость определения радиуса установившейся циркуляции и существенно снижается погрешность вычисления метацентрической высоты.

Методика оценки начальной остойчивости по углу крена на установившейся циркуляции

Procedure for initial stability assessment in terms of steady-turning heel

Для получения оперативной оценки начальной поперечной метацентрической высоты корабля по углу крена на УЦ необходимо:

- определить величину аппликаты точки приложения гидродинамических сил z_r по формуле (22) при действующей осадке T ;
- определить величину аппликаты поперечного метацентра z_M по кривым элементов ТЧ (или по приближенным зависимостям [2]);
- задать угол перекладки руля α° и линейную скорость корабля перед выходом на циркуляцию v_0 ;
- выйти на режим УЦ;
- с помощью соответствующего оборудования замерить скорость корабля v (м/с), угол крена θ° (°) и период циркуляции $t_{\text{ц}}$ (с);

по формуле (24) определить значение величины метацентрической высоты h , а затем по (15) – значение величины аппликаты ЦТ корабля z_G .

Для уверенной оценки искомых параметров целесообразно провести от 3 до 5 вариантов маневра. Например, повторить измерения при аналогичных исходных данных, но при перекаладке руля на противоположный борт; изменить скорость при входе в циркуляцию или угол перекаладки руля. На основе полученных данных необходимо найти среднее значение искомых параметров.

Примеры расчета устойчивости корабля по углу крена на установившейся циркуляции

Examples of stability calculations in terms of steady-turning heel

Пример № 1. Корабль с элементами: $D = 3200$ т, $L = 120$ м, $B = 14$ м, $T = 4,5$ м, $z_M = 7,0$ м – на УЦ имеет скорость $v = 10$ м/с и угол крена $\theta^\circ = 5^\circ$. При этом период его УЦ ($t_{ц}$) составил 250 с. Необходимо определить величины h и z_G .

Решение. По формуле (22) для $B/T = 3,11$ находим: $z_r = 0,665T = 2,99$ м. Затем по формуле (24) получаем: $h = 0,91$ м, а по формуле (15): $z_G = 6,09$ м.

Для угла крена на УЦ в этом примере: $\theta^\circ = 7^\circ$ получим: $h = 0,69$ м, $z_G = 6,31$ м.

Замечание. Если в этом примере в формуле (24) принять $z_r = 0,5T = 2,25$ м, то для угла крена $\theta^\circ = 5^\circ$ мы получим $h = 1,08$ м. Погрешность от такой замены составляет более 18 % и направлена в опасную сторону.

Если при прочих равных условиях угол крена $\theta^\circ = 7^\circ$, то получим $h = 0,82$ м. При этом погрешность составит около 19 % и также направлена в опасную сторону.

Пример № 2. Корабль с элементами: $D = 3400$ т, $L = 110$ м, $B = 13$ м, $T = 4,6$ м, $z_M = 7,2$ м – на УЦ имеет скорость $v = 9$ м/с и угол крена $\theta^\circ = 5^\circ$. При этом период УЦ ($t_{ц}$) составил 150 с. Необходимо определить величины h и z_G .

Решение. По формуле (22) для $B/T = 2,83$ находим: $z_r = 0,850T = 3,91$ м. Затем по формуле (24) получаем: $h = 1,00$ м, а по формуле (15): $z_G = 6,20$ м.

Для угла крена на УЦ в этом примере $\theta^\circ = 10^\circ$ будем иметь $h = 0,59$ м, $z_G = 6,61$ м.

Замечание. Если для этого примера в формуле (24) принять $z_r = 0,5T = 2,3$ м, то для угла крена $\theta^\circ = 5^\circ$ получим $h = 1,50$ м. Погрешность от такой замены составляет 50 % и направлена в опасную сторону.

Если при прочих равных условиях угол крена $\theta^\circ = 10^\circ$, получим $h = 0,88$ м. При этом погрешность составит около 50 % и будет направлена также в опасную сторону.

Выводы

Conclusion

1. Проанализированы существующие зависимости по оценке устойчивости корабля по углу крена на УЦ. Установлено, что до настоящего времени отсутствует практическая методика такой оценки, а имеющиеся зависимости содержат неточности и даже ошибки и не могут быть использованы для контроля устойчивости.
2. Получены зависимости начальной поперечной метацентрической высоты корабля и аппликаты его центра тяжести от угла крена на УЦ.
3. Предложена методика контроля начальной устойчивости корабля и аппликаты его центра тяжести по углу крена на УЦ.
4. Подчеркнута необходимость использования при проведении расчетов уточненного значения аппликаты точки приложения гидродинамической силы.

Список использованной литературы

1. Макаров С.О. Разбор элементов, составляющих боевую силу судов // Морской сборник. 1894. № 6. С. 1–106.
2. Благовещенский С.Н., Холодильник А.Н. Справочник по статике и динамике корабля : [В 2 т.]. Т. 1: Статика корабля. Ленинград : Судостроение, 1975. 336 с.
3. Ремез Ю.В. Качка корабля. Ленинград : Судостроение, 1983. 328 с.
4. Антоненко С.В. Практическая оценка устойчивости в открытом море по капитанской формуле // Мореходство и морские науки – 2009 : избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции / Под ред. В.Н. Храмушина. Южно-Сахалинск : СахГУ, 2010. С. 21–28.
5. Аксютин Л.Р. Определение метацентрической высоты по углу крена на циркуляции // Морской флот. 1968. № 11. С. 17.
6. Комаровский Ю.А. Исследование GPS-аппаратуры для оценки устойчивости судна по углу крена на установившейся циркуляции // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2015. № 2(23). С. 39–50.
7. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения : (Гидродинамика криволинейного движения и регулирование курса). Ленинград : Судостроение, 1976. 477 с.

8. *Фирсов Г.А.* Формула для расчета крена корабля на установившейся циркуляции // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. 1946. № 5. С. 679–682.
9. *Басин А.М.* Ходкость и управляемость судов. Москва : Транспорт, 1977. 456 с.
10. *Першиц Р.Я.* Управляемость и управление судном. Ленинград : Судостроение, 1983. 272 с.
11. *Павленко В.Г.* Маневренные качества речных судов. Москва : Транспорт, 1979. 183 с.
12. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. IV. Остойчивость : НД № 2-020101-152 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2022. 80 с.
13. *Аксютин Л.Р.* Контроль остойчивости морских судов. Изд. 3-е, переб. и доп. Одесса : Феникс, 2003. 178 с.
14. *Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А.* Справочник по теории корабля. Ходкость и управляемость. Ленинград : Судпромгиз, 1960. 688 с.
5. *Aksyutin L.R.* Determination of Metacentric Elevation by Roll Angle at Circulation // Maritime Fleet. 1968. No. 11. P. 17 (*in Russian*).
6. *Komarovsky Y.A.* Research of GPS-apparatuses for estimation of vessel stability by roll angle at steady circulation // Bulletin of FEFU Engineering School. 2015. No. 2(23). P. 39–50 (*in Russian*).
7. *Sobolev G.V.* Ship controllability and ship navigation automation. Hydrodynamics of Curvilinear Motion and Ship Course Regulation. Leningrad : Sudostroenie, 1976. 477 p. (*in Russian*).
8. *Firsov G.A.* Formula for calculating ship roll at steady-state circulation // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences. 1946. No. 5. P. 679–682 (*in Russian*).
9. *Basin A.M.* Navigability and controllability of ships. Moscow : Transport, 1977. 456 p. (*in Russian*).
10. *Pershitz R.Ya.* Steerability and control of the ship. Leningrad : Sudostroenie, 1983. 272 p. (*in Russian*).
11. *Pavlenko V.G.* Maneuvering qualities of river ships. Moscow : Transport, 1979. 183 p. (*in Russian*).
12. Rules of classification and construction of sea vessels. Part IV. Stability : ND No. 2-020101-152 / Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022. 80 p. (*in Russian*).
13. *Aksyutin L.R.* Control of stability of sea-going ships. Vol. 3, revised and extended. Odessa: Fenix, 2003. 178 p. (*in Russian*).
14. *Voytkunsky Ya.I., Pershits R.Ya., Titov I.A.* Handbook on Ship Theory. Navigability and controllability. Leningrad : Sudpromgiz, 1960. 688 p. (*in Russian*).

References

1. *Makarov S.O.* Analysis of Elements Constituting Combat Strength of Ships // Maritime Collection. 1894. № 6. P. 1–106 (*in Russian*).
2. *Blagoveschensky S.N., Kholodilin A.N.* Handbook on Ship Statics and Dynamics. Vol. 1: Ship Statics. Leningrad : Sudostroenie, 1975. Vol. 1. 336 p. (*in Russian*).
3. *Remez Y.V.* Ship Rocking. Leningrad : Sudostroenie, 1983. 328 p. (*in Russian*).
4. *Antonenko S.V.* Practical estimation of stability in the open sea by the captain's formula // Navigation and Marine Researches –2009: Selected reports of the Second Sakhalin Regional Marine Scientific and Technical Conference / Edited by *V.N. Khramushin*. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin State University, 2010. P. 21–28 (*in Russian*).

Сведения об авторе

Вилков Сергей Михайлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ОАО «Санкт-Петербургская судостроительная компания». Адрес: 199034, Россия, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., д. 7, лит. А, пом. 24Н. E-mail: info@spbcs.ru.

About the author

Sergey M. Vilkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of the St. Petersburg Shipbuilding Company JSC. Address: 7a, room 24N, 14th Line of Vasilyevsky Ostrov, St. Petersburg, Russia, post code 199034. E-mail: info@spbcs.ru.

Поступила / Received: 27.09.22
Принята в печать / Accepted: 01.02.23
© Вилков С.М., 2023