

УДК 629.5.012.64

АНАЛИЗ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ СУДНА ПОРОЖНЕМ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

С. В. Сауляк¹

Рассмотрена проблема определения координат центра тяжести судна, на начальных стадиях проектирования. Изложен аналитический метод определения абсциссы и аппликаты центра тяжести судна порожнем, в зависимости от расположения машинного отделения, типа энергетической установки и количества ярусов надстроек и рубок.

***Ключевые слова:** вес порожнем, координаты центра тяжести, измеритель масс, машинное отделение, энергетическая установка, сплошная надстройка, ярус рубки.*

При проектировании судна для определения его веса порожнем и координат центра тяжести, проектировщиками используется несколько способов.

Самым надежным и наиболее трудоемким является способ, при котором, вес порожнем определяется точным учетом весов всех деталей корпуса, устройств и систем судна. Но это возможно выполнить только тогда, когда имеются перечень и рабочие чертежи всех корпусных деталей, технические паспорта на все оборудование и тому подобное.

На начальных стадиях проектирования воспользоваться таким способом не представляется возможным.

Целью статьи является анализ определения координат центра тяжести судна, на начальных стадиях проектирования, при помощи аналитического метода, в зависимости от расположения машинного отделения, типа энергетической установки и количества ярусов надстроек и рубок.

Наиболее распространенным аналитическим методом является определения веса порожнем при помощи модулей и измерителей [1].

Суть метода заключается в разделении веса порожнем на сравнительно небольшое количество укрупненных статей нагрузки

$$\Delta_{\text{пор}} = P_{\text{к}} + P_{\text{п, и}} + P_{\text{сс}} + P_{\text{су}} + P_{\text{ожп}} + P_{\text{эу}} + P_{\text{озу}} + P_{\text{эо}} + P_{\text{в}} + P_{\text{ко}} + P_{\text{з}}, \text{ т.} \quad (1)$$

где

¹ © Сауляк С. В., преподаватель, Одесская национальная морская академия.

P_k – вес металлического корпуса, т;

$P_{п,и}$ – вес покраски и изоляции, т;

$P_{сс}$ – вес судовых систем, т;

$P_{су}$ – вес судовых устройств, т;

$P_{ожп}$ – вес оборудования жилых помещений, т;

$P_{эу}$ – вес энергетической установки, т;

$P_{оэу}$ – вес оборудования энергетической установки, т;

$P_{эо}$ – вес электрооборудования и связи, т;

P_b – вес вооружения, т;

$P_{ко}$ – вес кранового оборудования и связи, т;

P_3 – вес запаса водоизмещения, т.

Расчет выполняется в табличной форме (табл. 1).

Координаты центра тяжести веса порожнем определяются по формулам:

$$x_{g(\text{пор})} = \frac{\sum P_i \cdot x_i}{\Delta_{\text{пор}}}, \text{ м.} \quad (2)$$

$$y_{g(\text{пор})} = \frac{\sum P_i \cdot y_i}{\Delta_{\text{пор}}}, \text{ м.} \quad (3)$$

$$z_{g(\text{пор})} = \frac{\sum P_i \cdot z_i}{\Delta_{\text{пор}}}, \text{ м.} \quad (4)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты центра тяжести статьи нагрузки, определяемые по чертежам общего расположения, м.

Более упрощенным способом определения веса судна порожнем, являются методы, приведенные в методических указаниях [2].

Вес порожнем также разбивается на укрупненные статьи нагрузки:

$$\Delta_{\text{пор}} = P_{ст} + P_{нр} + P_{об} + P_{эу} + P_3, \text{ т.} \quad (5)$$

где

$P_{ст}$ – вес стали металлического корпуса, т;

$P_{нр}$ – вес надстроек и рубок, т;

$P_{об}$ – вес судового оборудования, т;

$P_{эу}$ – вес энергетической установки, т;

P_3 – вес запаса водоизмещения, т.

Таблица 1

Определение веса порожнем и координат центра тяжести судна

№ п/п	Статья нагрузки	Величина измерителя масс, q_i	Расчетная формула	Вес статьи нагрузки, P, T	Координаты центра тяжести			Моменты		
					x, м	y, м	z, м	$P \cdot x, TM$	$P \cdot y, TM$	$P \cdot z, TM$
1	Корпус	0,17	$P_{кр} = q_{кр} \cdot L \cdot B \cdot d$							
2	Покраска и изоляция	0,195	$P_n = q_n \cdot (L \cdot B \cdot D_1)^{0,667}$							
3	Судовые системы	0,135	$P_{cc} = q_{cc} \cdot (L \cdot B \cdot D)^{0,667}$							
4	Судовые устройства	0,011	$P_{cy} = q_{cy} \cdot L \cdot B \cdot D$							
5	Оборудование жилых помещений	0,77	$P_j = q_j \cdot n_j$							
6	Вес энергетической установки	*	$\sum P_{гд}$							
7	Вес оборудования энергетической установки	0,80	$P_{эу} = q_{эу} \cdot \sum P_{гд}$							
8	Вес электрооборудования и связи	0,09	$P_{cc} = q_{cc} \cdot (L \cdot B \cdot D)^{0,667}$							
9	Вес вооружения	0,0003	$P_v = q_v \cdot L \cdot B \cdot D$							
10	Вес кранового оборудования	*	$P_{ко}$							
11	Запас водоизмещения	-	$P_3 = 0,02 \cdot \Delta$							
12	Итого:	-	-							

Примечание: * – вес статьи нагрузки выбирается по каталогу фирмы производителя.

Вес всех составляющих веса судна порожнем вычисляется при помощи измерителей масс.

Определение координат центра тяжести веса судна порожнем в методических указаниях [2], носит рекомендательный характер.

Точность же расчета координат центра тяжести веса судна порожнем существенно влияет на достоверность оценки мореходных качеств проектируемого судна и, в первую очередь на его остойчивость и посадку (удифферентовку).

Следовательно, на начальной стадии проектирования, когда еще проектанты не выполнено эскизное проектирование чертежей общего расположения, при выборе главных размерений судна, влияющих на коор-

динаты его центра тяжести и мореходные качества, необходимо применить совсем другой способ.

Одним из таких способов является аналитический метод определения координат центра тяжести веса судна порожнем. Этот метод основан на обработке статистических данных по построенным судам.

Общеизвестно, что абсцисса центра тяжести веса судна порожнем зависит от расположения машинного отделения по его длине. Для облегчения определения координаты x_g можно рассмотреть три случая расположения машинного отделения:

- кормовое расположение машинного отделения;
- среднее расположение машинного отделения;
- носовое расположение машинного отделения.

При кормовом расположении машинного отделения абсцисса центра тяжести в методических указаниях [3] составляет

$$x_{g(\text{пор})} = -(0,07 \div 0,09) \cdot L, \text{ м.} \quad (6)$$

где L – длина судна между перпендикулярами, м.

Если вес судна порожнем принять за единичный вес $\Delta_{\text{пор}} = 1$, тогда по статистическим данным, вес, приходящийся на энергетическую установку и оборудование размещаемое в машинном отделении будет составлять $P_{\text{эу}} = 0,05 \div 0,20$. Вес остальных укрупненных статей нагрузки судна порожнем составит $\sum P_i = 0,95 \div 0,80$.

Абсцисса центра тяжести машинного отделения при кормовом его расположении приблизительно составит $x_{g(\text{эу})} = -0,36 \cdot L, \text{ м.}$

Следовательно, для определения абсциссы центра тяжести остальных укрупненных статей нагрузки, веса судна порожнем в зависимости от его длины между перпендикулярами, составляем аналитическое уравнение:

$$\begin{aligned} x_{g(\text{пор})} \Delta_{\text{пор}} &= P_{\text{эу}} \cdot x_{g(\text{эу})} + \sum P_i \cdot x_{g(i)}; \\ x_{g(\text{пор})} &= \frac{P_{\text{эу}} \cdot x_{g(\text{эу})} + \sum P_i \cdot x_{g(i)}}{\Delta_{\text{пор}}}; \\ \sum P_i \cdot x_{g(i)} &= x_{g(\text{эу})} \cdot P_{\text{эу}} - P_{\text{эу}} \cdot x_{g(\text{пор})}; \\ x_{g(i)} &= \frac{x_{g(\text{пор})} \cdot P_{\text{эу}} - P_{\text{эу}} \cdot x_{g(\text{эу})}}{\sum P_i}; \\ x_{g(i)} &= \frac{-(0,07 \div 0,09) \cdot L P_{\text{эу}} - P_{\text{эу}} \cdot (-0,36 \cdot L)}{\sum P_i}. \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки весов $P_{\text{эу}} = 0,05$ и $\sum P_i = 0,95$ в уравнение (7) абсцисса центра тяжести остальных укрупненных статей нагрузки составит:

$$x_{g(i)} = \frac{(-(0,07 \div 0,09) \cdot L) - 0,05 \cdot (-0,36 \cdot L)}{0,95} = -(0,055 \div 0,076) \cdot L.$$

После подстановки весов $P_{\text{эу}} = 0,20$ и $\sum P_i = 0,80$ в уравнение (7) абсцисса центра тяжести остальных укрупненных статей нагрузки составит:

$$x_{g(i)} = \frac{(-(0,07 \div 0,09) \cdot L) - 0,20 \cdot (-0,36 \cdot L)}{0,80} = (0,003 \div (-0,023)) \cdot L.$$

Тогда при перемещении машинного отделения в нос судна, абсцисса центра его тяжести при среднем и носовом расположении соответственно составит $x_{g(\text{но})} = 0,0 \cdot L$, м., и $x_{g(\text{но})} = 0,36 \cdot L$, м.

После подстановки этих координат и весов $P_{\text{эу}} = 0,05$ и $\sum P_i = 0,95$ в уравнение (7) абсцисса центра тяжести веса судна порожнем в зависимости от его длины, при среднем и носовом расположении машинного отделения составит:

$$x_{g(\text{пор})}^P = P_{\text{эу}} \cdot (0,00 \cdot L) + \sum_i P_i \cdot (-(0,055 \div 0,076) \cdot L) = 0,95 \cdot (-(0,055 \div 0,076) \cdot L) = -(0,052 \div 0,072) \cdot L;$$

$$x_{g(\text{пор})}^P = P_{\text{эу}} \cdot 0,36 \cdot L + \sum_i P_i \cdot (-(0,055 \div 0,076) \cdot L) = 0,05 \cdot 0,36 \cdot L + 0,95 \cdot (-(0,055 \div 0,076) \cdot L) = -(0,034 \div 0,054) \cdot L.$$

После подстановки этих же координат и весов $P_{\text{эу}} = 0,20$ и $\sum P_i = 0,80$ в уравнение (7) абсцисса центра тяжести веса судна порожнем в зависимости от его длины, при среднем и носовом расположении машинного отделения составит:

$$x_{g(\text{пор})} = P_{\text{эу}} \cdot (0,00 \cdot L) + \sum P_i \cdot ((0,003 \div (-0,023)) \cdot L) = 0,80 \cdot ((0,03 \div (-0,023)) \cdot L) = (0,029 \div (-0,022)) \cdot L;$$

$$x_{g(\text{пор})}^P = P_{\text{эу}} \cdot 0,36 \cdot L + \sum_i P_i \cdot ((0,003 \div (-0,023)) \cdot L) = 0,20 \cdot 0,36 \cdot L + 0,80 \cdot ((0,003 \div (-0,023)) \cdot L) = (0,074 \div 0,054) \cdot L.$$

Аппликата центра тяжести веса судна порожнем зависит от высоты корпуса, наличия надстроек и рубок, а также типа энергетической установки. Если надстройки и рубки учесть приведенной высотой корпуса, тогда для облегчения определения координаты z_g можно рассмотреть три случая оборудования судна энергетическими установками:

- судно с малооборотным дизелем;
- судно со среднеоборотным дизелем;

➤ судно с высокооборотным дизелем.

Автор книги [4] рекомендует принимать аппликату центра тяжести веса судна порожнем

$$z_{g(\text{пор})} = (0,70 \div 0,75) \cdot D, \text{ м.} \quad (8)$$

где D – высота корпуса судна на миделе, м.

Воспользуемся выше описанным способом при составлении аналитического уравнения и принимаем вес судна порожнем за единичный вес $\Delta_{\text{пор}} = 1$. Тогда вес, по статистическим данным, приходящийся на малооборотный двигатель в составе энергетической установки судна будет составлять $P_{\text{мд}} = 0,05 \div 0,10$. Вес остальных укрупненных статей нагрузки корпуса судна порожнем составит $\sum P_i = 0,95 \div 0,90$. Аппликата центра тяжести двигателя составит $z_{g(\text{мд})} = 0,5 \cdot D$.

Если на судно устанавливается среднеоборотный или высокооборотный двигатель такой же мощности что и малооборотный, тогда вес таких двигателей будет составлять $P_{\text{сд}} = 0,02 \div 0,04$ и $P_{\text{вд}} = 0,01 \div 0,02$ соответственно. Аппликата центра тяжести двигателей составит $z_{g(\text{сд})} = 0,3 \cdot D$, и $z_{g(\text{вд})} = 0,2 \cdot D$.

Так как вес среднеоборотного и высокооборотного двигателя в составе веса судна порожнем составляет $P_{\text{д}} = 0,01 \div 0,04$, следовательно, существенного влияния на изменение положения аппликаты центра тяжести судна порожнем эти двигателя не окажут, и в дальнейшем случаи, когда судно оборудовано такими двигателями не рассматривались.

Для определения аппликаты центра тяжести остальных укрупненных статей нагрузки веса судна порожнем, в зависимости от его высоты корпуса на миделе, составляем аналитическое уравнение:

$$\begin{aligned} z_{g(\text{пор})} \Delta_{\text{пор}} &= P_{\text{мд}} \cdot z_{g(\text{мд})} + \sum P_i \cdot z_{g(i)}; \\ z_{g(\text{пор})} &= \frac{P_{\text{мд}} \cdot z_{g(\text{мд})} + \sum P_i \cdot z_{g(i)}}{\Delta_{\text{пор}}}; \\ \sum P_i \cdot z_{g(i)} &= z_{g(\text{пор})} \Delta_{\text{пор}} - P_{\text{мд}} \cdot z_{g(\text{мд})}; \\ z_{g(i)} &= \frac{z_{g(\text{пор})} \Delta_{\text{пор}} - P_{\text{мд}} \cdot z_{g(\text{мд})}}{\sum P_i}; \\ z_{g(i)} &= \frac{(0,70 \div 0,75) \cdot D \Delta_{\text{пор}} - P_{\text{мд}} \cdot 0,5 D}{\sum P_i}. \end{aligned} \quad (9)$$

После подстановки весов $P_{\text{мд}} = 0,05$ и $\sum P_i = 0,95$ в уравнение (9) абсцисса центра тяжести остальных укрупненных статей нагрузки составит:

$$z_{g(i)} = \frac{(0,70 \div 0,75) \cdot D - 0,05 \cdot 0,5 \cdot D}{0,95} = (0,71 \div 0,76) \cdot D .$$

После подстановки весов $P_{\text{мд}} = 0,10$ и $\sum P_i = 0,90$ в уравнение (9) абсцисса центра тяжести остальных укрупненных статей нагрузки составит:

$$z_{g(i)} = \frac{(0,70 \div 0,75) \cdot D - 0,10 \cdot 0,5 \cdot D}{0,90} = (0,72 \div 0,78) \cdot D .$$

Если судно оборудуется надстройками и рубкой, которые по своей протяженности будут занимать всю его длину, тогда вес, по статистическим данным, приходящийся на эти надстройки, рубку и оборудование устанавливаемое выше верхней палубы в составе веса порожнем судна будет составлять $P_{\text{н}} = 0,10 \div 0,25$. Вес остальных укрупненных статей нагрузки корпуса судна порожнем с вычетом веса главного двигателя составит $\sum P_i = 0,85 \div 0,65$. Аппликата центра тяжести, так называемой сплошной надстройки, при ее высоте от одного до двух ярусов, составит $z_{g(\text{н})} = (1,3 \div 1,7) \cdot D$.

После подстановки этих координат и весов $P_{\text{н}} = 0,10$, $P_{\text{мд}} = 0,05$ и $\sum P_i = 0,85$ в уравнение (9) аппликата центра тяжести веса судна порожнем в зависимости от его высоты корпуса на миделе, с одним ярусом сплошной надстройки составит:

$$z_{g(\text{пор})} = z_{\text{мд}}(0,5 \cdot P_{\text{мд}}) + z_{\text{н}}(1,3 \cdot P_{\text{н}}) + \sum z_i \cdot P_i = 0,05(0,5 \cdot D) + 0,10 \cdot (1,3 \cdot D) + 0,90 \cdot (0,71 \div 0,76) \cdot D = (0,79 \div 0,84) \cdot D .$$

После подстановки этих координат и весов $P_{\text{н}} = 0,25$, $P_{\text{мд}} = 0,10$ и $\sum P_i = 0,65$ в уравнение (9) аппликата центра тяжести веса судна порожнем в зависимости от его высоты корпуса на миделе, с двумя ярусами сплошной надстройки составит:

$$z_{g(\text{пор})} = z_{\text{мд}}(0,5 \cdot P_{\text{мд}}) + z_{\text{н}}(1,3 \cdot P_{\text{н}}) + \sum z_i \cdot P_i = 0,10(0,5 \cdot D) + 0,25 \cdot (1,7 \cdot D) + 0,65 \cdot (0,72 \div 0,78) \cdot D = (0,94 \div 0,98) \cdot D .$$

Выводы

1. Результаты расчетов наглядно демонстрируют зависимости размеров судна и координат центра тяжести его веса порожнем, от расположения машинного отделения по длине судна, типа главного двигателя и наличия сплошной надстройки, что в свою очередь позволяет проектантам на начальных этапах проектирования заранее продумывать эти вопросы и согласовывать с заказчиком.
2. Но в тоже время зависимости полученные путем обработки статистических данных не дают полную картину о закономерностях связывающих координаты центра тяжести веса порожнем с граничными условиями, по которым они определялись. Что в свою очередь предполагает дальнейшие исследования этих вопросов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валько Н. Г. Проектирование многоцелевого сухогрузного судна смешанного плавания: Метод. указание. – Одесса, 1993. – 70 с.
2. Гулиев Ю. М. Приближенный расчет нагрузки транспортных судов: Метод. указание. – Одесса, 1993. – 30 с.
3. Баскаков С. Н. Статика корабля: Метод. указание – Одесса, 2001 – 41 с.
4. Муру Н. П. Прикладные задачи плавучести и остойчивости судна. – Ленинград: Судостроение, 1985 – 216 с.
5. Сизов В. Г. Теория корабля: Учебн. пособие. – Одесса: Феникс, 2008 – 459 с.

Рукопись поступила в редакцию 25.12.2012 г.