

# МАСТЕРСКАЯ

## Считаем водоизмещение

В прошлом номере «Кия» мы начали рассмотрение состава текстовой документации (дополняющей обязательную графическую), которую судостроитель-любитель так или иначе должен подать на рассмотрение экспертом при регистрации строящегося/переоборудуемого судна. Речь шла о спецификации судна – документе, в котором кратко описаны его основные характеристики, устройство корпуса, состав оборудования и снабжения. Сейчас поговорим о документе, важность которого часто недооценивается самостоятельным конструктором, хотя без тщательного его исполнения невозможно ни правильно задать геометрию корпуса, ни выбрать подходящий двигатель, ни убедиться в достаточной грузоподъемности судна, которая не нарушит при этом других важных эксплуатационных качеств. Этот документ – таблица нагрузки масс. В старой классической литературе она называлась таблицей весовой нагрузки, но с введением единой системы единиц СИ правильное стало называть входящие в нее величины массами, а не весами.

Для чего производится расчет таблицы нагрузки? Она позволяет решить на стадии проектирования следующие задачи:

1. Предварительная оценка водоизмещения и положения центра тяжести (ЦТ) по длине после выбора главных размерений, как правило, в несколько приближений – для определения осадки и назначения высоты борта, проверки возможности достижения желаемого режима движения (переходный, глиссирование), назначения адекватной мощности двигателя.

2. Предварительная оценка остойчивости судна в нескольких вариантах значения и размещения нагрузки, которые могут возникнуть на практике – для проверки достаточности выбранной ширины корпуса; возможно, пересмотра некоторых принципиальных конструктивных решений (компоновка подводной части, высота надстроек, устройство балластных цистерн и т.д.).

Для парусника предварительная проверка остойчивости еще важнее, поскольку влияет на назначение массы балласта, уточнение типа парусного вооружения и площади парусов.

3. Получение уточненного положения ЦТ корпуса, как наиболее сильно влияющей

на положение общего ЦТ статьи нагрузки – после выбора размеров и толщин его конструктивных элементов (имеет смысл для достаточно крупных лодок – от 4.5–5 м длины; в предварительном расчете оно берется по статистике, но затем нуждается в проверке). Это тоже довольно важная задача, поскольку неопытный строитель часто ошибается в оценке массы корпуса, причем обычно в меньшую сторону, а перетяженный корпус всегда ухудшает эксплуатационные характеристики судна.

4. Контроль водоизмещения и положения ЦТ при внесении тех или иных изменений в конструкцию корпуса и состав оборудования. Нередки случаи, когда неграмотно проведенное переоборудование или доработка, например при тяжелой декоративной зашивке рубки или оборудовании солярия на крыше, ухудшает остойчивость до неприемлемой. Также очень часто замена двигателя становится причиной возникновения неправильного дифферента, дельфинирования на ходу и т.п.

Как это делается? По принципу старого как мир «правила рычага». Конструктор выписывает в столбик названия всех  $n$  отдельных масс, составляющих полное водоизмещение судна, группируя их по принципу принадлежности к статьям нагрузки. Отдельно – массы, входящие в состав корпуса, отдельно – энергетическую установку со всеми ее системами, отдельно – судовые устройства и оборудование, отдельно – балласт и полезный груз. Все должно быть учтено как можно полнее, иначе ценность проведенной работы окажется небольшой. В следующий столбец вписывается значение массы элемента  $P_i$ , далее – два значения отстояния его частного центра тяжести от некоторого условного начала отсчета по длине и высоте  $x_i$  и  $z_i$ . Если элемент расположен в нос и вверх от точки отсчета, отстояние вписывается со знаком «+», если вниз и в корму – со знаком «-». В следующих столбцах вычисляются моменты этих масс относительно начала отсчета, т.е. произведения отдельных масс на их отстояния по длине и высоте  $P_i \cdot x_i$  и  $P_i \cdot z_i$ . В принципе, это все необходимые данные, в упрощенном виде они показаны в таблице. Чем больше и сложнее судно, тем более развитой будет таблица по содержанию разделов.

Далее моменты суммируются по статьям нагрузки. Сумма по частным массам, если они были учтены все, как это понятно, дает значение полного водоизмещения  $D = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum P_i$ . Суммы по частным моментам  $P_i \cdot x_i$  и  $P_i \cdot z_i$  дают общие моменты относительно начала отсчета  $M_x = \sum P_i \cdot x_i$  и  $M_z = \sum P_i \cdot z_i$ . Далее самое важное: каждый из суммарных моментов делится на значение водоизмещения, в результате получаем значения отстояний общего центра масс по длине и высоте от начала отсчета ( $x_g = M_x / D$  и  $z_g = M_z / D$ ). Эти координаты ЦТ и будут использоваться в дальнейших расчетах плавучести, остойчивости и ходкости судна. При необходимости расчет проводится для нескольких состояний нагрузки судна: в минимальном грузу, с половинными запасами, в полном грузу. Особый интерес представляет высота положения ЦТ в экстремальных случаях, например, когда в небольшой легкой лодке в полный рост встанут все пассажиры, или на верхнем рулевом посту катера соберется весь наличный экипаж.

Составление таблицы нагрузки является собой инженерный труд в чистом виде, поскольку соединяет творческий подход в оценках и подборе данных с бухгалтерской тщательностью при соединении их воедино. Что при этом надо отметить особо? Начало координат, вообще говоря, может размещаться произвольно. Для удобства работы за него принимается точка, чье положение будет оставаться неизменным при всех возможных изменениях, вносимых в форму и конструкцию корпуса. Для водоизмещающих судов это может быть пересечение основной линии с мидельшпангоутом либо самым широким шпангоутом корпуса. Для глиссеров за «ноль» удобно брать точку пересечения линии киля с плоскостью транца. У катеров переходного режима возможен и первый, и второй способ, в зависимости от особенностей формы корпуса.

На предварительных стадиях проекта многие статьи нагрузки придется брать условно, либо по близким аналогам, а также вычисляя массы известным школьным способом – умножением объема материала на его приблизительную плотность, которую придется искать в справочниках и стандартах. Так, плотность стали принимается равной 7850 кг/м<sup>3</sup>, фанеры – 600–800 кг/м<sup>3</sup>, алюминиевого сплава – ок.

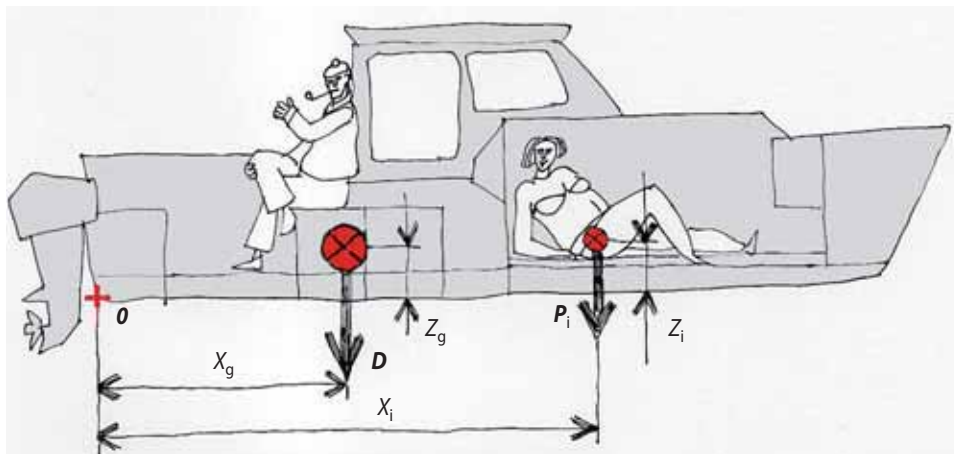
2800 кг/м<sup>3</sup>, стеклопластика на основе ткани – ок. 1750 кг/м<sup>3</sup>.

Полезная нагрузка по традиции именуется дедвейтом и включает массы людей на борту (по стандарту принимается равной в среднем 80 кг на человека), их багажа, по 20 кг на каждого, а также массу штатных запасов воды, топлива и масла.

Массу корпуса в целом удобно на первых порах принимать по принятому значению «кубического модуля»  $q$ , т.е. некоторому удельному весу конструкций, отнесенному к произведению главных размерений  $q = P_k / LBH$  (здесь  $L, B, H$  – длина, ширина и высота борта на миделе). Его можно пересчитать с известного прототипа либо в очень приблизительных прикидках принять в пределах 25–40 кг/м<sup>3</sup>. Меньшая величина относится к открытым легким лодкам из фанеры и алюминия, большая – к деревянным и пластиковым мореходным катерам с палубой и рубкой (рубка не включена в высоту  $H$ ). Между ними – разнообразие конструктивных типов, более или менее тяжелых относительно своих размерений. Но следует помнить, с одной стороны, что расчеты по кубическому модулю сами по себе очень условны, поскольку требуют четкой базы для сопоставления. С другой стороны, для практики полезно сделать хоть какие-то расчетные прикидки, варьируя разные параметры, чем не иметь вообще никаких данных по водоизмещению – слишком велика важность этой величины, а ошибки в расчетах часто взаимно компенсируются, плюс при проектировании надо обязательно закладывать в таблицу некоторый запас водоизмещения, обычно в размере 10–15% набранной суммы известных статей. По опыту, он наверняка будет выбран, если не превышен. Но превышение – уже признак недостаточной точности конструкторской работы.

Наиболее кропотливая часть расчета – вычисление положения центра масс «голого» корпуса. В первых условных прикидках можно принять, что по длине он будет располагаться примерно в центре площади плана палубы, и в центре бокового профиля – по высоте. Но когда конструкция будет проработана и расписана вплоть до элемента, чья масса сколь-нибудь заметна и оценима, каждая деталь конструкции достойна быть вписанной в таблицу расчета нагрузки масс. Точность знания положения общего ЦТ тогда существенно возрастет, и, по опыту, результат расчета не будет существенно отличаться от истины. Как правило, ЦТ типичного глиссирующего корпуса лежит на расстоянии 35–43% длины от транца.

При назначении положений отдельных элементов набора и обшивки корпуса следует помнить нехитрые геометрические зависимости: ЦТ длинного бруса лежит посередине его длины, ЦТ плоской фигуры совпадает с центром ее площади, ЦТ прямоугольника лежит на половине его размера по каждой стороне, ЦТ



Статья нагрузки	P, кг	x, м	z, м	P <sub>x</sub> , кгм	P <sub>z</sub> , кгм
Корпус	370.00	2.24	0.42	828.80	155.40
Двигатель	42.00	- 0.10	0.50	- 4.20	21.00
Аккумулятор	15.00	2.50	- 0.25	37.50	- 3.75
Балласт	100.00	2.10	- 0.40	210.00	- 40.00
Топливо	35.00	1.00	-0.25	35.00	-8.75
Водитель	80.00	2.20	1.20	176.00	96.00
Пассажир 1	80.00	2.20	1.20	176.00	96.00
Пассажир 2	80.00	1.30	1.20	104.00	96.00
Пассажир 3	80.00	1.30	1.20	104.00	96.00
Пассажир 4	80.00	0.80	1.20	64.00	96.00
Пассажир 5	80.00	0.80	1.20	64.00	96.00
Суммы	1042.00			1795.10	699.90
<b>Положение ЦТ</b>		<b>1.72</b>	<b>0.67</b>		

треугольника – на 1/3 его высоты со стороны основания. В случае сложных по форме фигур всегда есть возможность разбить их на простые части. Но наиболее правильно при расчете и геометрии деталей, и всей таблицы масс применить компьютер. Существуют программы-моделеры, которые автоматически ведут учет геометрических характеристик прорисованных трехмерных объектов и при правильном введении их массовых характеристик выдают в результате и массу сборки, и положение общего ЦТ. Если самостоятельный конструктор в состоянии освоить такую программу – ему и карты в руки, важно только вывести данные по сборке в таблицу таким образом, чтобы их мог прочесть эксперт. Но компьютер значительно облегчит работу проектианта, даже если пользоваться им только для расчета самой таблицы, сводя в нее элементы «вручную», для этого пригоден любой табличный процессор наподобие Microsoft Excel.

Как упоминалось, составление таблицы нагрузки обязательно входит в объем работ над проектом нового судна. Ее данные будут использованы на дальнейших стадиях проектирования. Отдельно стоит сказать о проекте переоборудования существующего судна. Если изначально оно имело нормальную посадку и

стойчивость, то нет смысла расписывать все статьи его нагрузки, достаточно учесть лишь те, что подвергаются замене. Действующее положение ЦТ можно определить, например, сфотографировав на достаточно большом удалении подвешенное на стропе крана судно в двух положениях – с дифферентом на нос и на корму, и совместив два снятых вида каким-либо образом. ЦТ будет располагаться на пересечении двух вертикалей, проведенных через точку подвеса для каждого случая. При пересчете нагрузки снимаемые с судна элементы вычитаются, а добавляемые суммируются с исходными водоизмещением и моментами относительно выбранного начала координат. Тогда по изменению положения ЦТ уже можно судить, насколько успешно пройдет переоборудование с точки зрения статики. Если в результате перемен положение ЦТ уйдет вперед-назад более чем на 2–3% длины, а по высоте – поднимется хотя бы на несколько сантиметров относительно прежнего положения, это даст повод для беспокойства, достаточный для того, чтобы заняться проверкой центровки, устойчивости и оптимизацией расположения масс. Ведь от этого будет зависеть ваша безопасность на воде. ■

Алексей Даняев