

УДК 629.12

DOI: 10.37890/jwt.vi75.363

## **Расчет нагрузки масс пассажирского речного тримарана в задачах исследовательского проектирования**

**А.Э. Корепанов**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-0799>

**Е.П. Роннов**

*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** В статье приводится методика расчета нагрузки масс для определения водоизмещения пассажирских судов-тримаранов на начальных стадиях проектирования. Состояние данного вопроса на сегодня недостаточно изучено, т.к. нет методики, позволяющей рассчитать водоизмещение судна-тримарана. Областью исследования является проектирование судов, в частности проектирование пассажирских судов-тримаранов, а объектом является определение составляющих нагрузки масс для нахождения общего водоизмещения судна-тримарана. Приведено уравнение масс для пассажирских судов-тримаранов, статистические зависимости и аналитические формулы для нахождения составляющих этого уравнения. На основании сравнительного анализа судов-прототипов и проектируемых судов-тримаранов были получены удовлетворительные результаты, которые показали, что предлагаемая методика может быть использована для расчета водоизмещения судов данного типа на начальных стадиях проектирования.

**Ключевые слова:** судно-тримаран, аутригеры, катамаран, нагрузка масс, водоизмещение, уравнение масс, статистические зависимости, мидель-шпангоут, модули и измерители масс.

## **Calculation of the mass load of a passenger river trimaran in research design problems**

**Alexey E. Korepanov**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0894-0799>

**Evgeniy P. Ronnov**

*<sup>1</sup>Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article presents a method for calculating the mass load for determining the displacement of passenger trimaran vessels at the initial stages of design. The state of this issue has not been sufficiently studied today, since there is no methodology that allows calculating the displacement of a trimaran vessel. The field of research is the design of vessels, in particular the design of passenger trimaran vessels, and the purpose is to determine the components of the mass load to determine the total displacement of the trimaran vessel. The equations of masses for trimaran passenger ships and statistical dependencies are given, as well as analytical formulas for finding the components of this equation. On the basis of a comparative analysis of prototype vessels and projected trimaran vessels, satisfactory results were obtained, which showed that the proposed methodology can be used to calculate the displacement of vessels of this type at the initial stages of design.

**Keywords:** trimaran vessel, outriggers, catamaran, mass load, displacement, mass equation, statistical dependencies, midship frame, modules and mass meters.

### **Введение**

Одной из основных и сложных задач, возникающих при обосновании любого судна, в том числе и пассажирских судов-тримаранов, является максимально достоверное определение водоизмещения. Расчет укрупненной нагрузки масс на этом этапе во многом базируется на статистических зависимостях [1-4]. Несмотря на большой интерес и интенсивность развития судов-тримаранов, особенно в зарубежной практике, методика расчета их нагрузки масс на начальных стадиях проектирования практически отсутствует. Это связано с тем, что в настоящее время используемые на этой стадии эмпирические зависимости для судов-тримаранов внутреннего и смешанного (река-море) плавания в силу недостаточной статистической базы отсутствуют.

В этих условиях предпринята попытка разработать методику расчета водоизмещения тримарана, используя, где возможно, данные по скоростным отечественным катамаранам, а также непосредственно прямой расчет некоторых масс.

### **Методы и результаты**

Полное водоизмещение судна-тримарана определяется из уравнения баланса масс [1, 2]:

$$D = D_{\text{пор}} + DW \quad (1)$$

где,  $D_{\text{пор}}$  – водоизмещение порожнем;  
 $DW$  – дедвейт.

Водоизмещение порожнем  $D_{\text{пор}}$  в соответствии с ОСТ 5Р.0206-2002 с учетом того, что некоторые относительно небольшие по массе разделы объединены, можно представить в виде суммы следующих составляющих:

$$D_{\text{пор}} = \sum_{i=1}^7 P_i + \Delta D \quad (2)$$

где,  $P_1$  – корпус;  
 $P_2$  – масса судовых устройств;  
 $P_3$  – масса судовых систем;  
 $P_4$  – масса судовой энергетической установки;  
 $P_5$  – масса электро-радио оборудования;  
 $P_6$  – масса постоянных жидких грузов;  
 $P_7$  – масса снабжения и имущества;  
 $\Delta D$  – запас водоизмещения.

В раздел «корпус» кроме массы металлического корпуса входят дельные вещи, неметаллические части корпуса, покрытие, окраска, изоляция, оборудование помещений. Они на начальных стадиях проектирования условно могут быть включены в другие разделы, определяемые одинаковым модулем.

Относительная доля составляющих уравнения (2) примерно такая же, как и у пассажирских катамаранов [5]. Так, в составе полного водоизмещения отечественных пассажирских судов-катамаранов среднее значение массы металлического корпуса с надстройкой занимает не менее 40-45% (в том числе металлический корпус (23-33%), масса судовых устройств 5-13%, масса судовых систем 4-8%, масса судовой энергетической установки и вспомогательных механизмов 9-15%, масса электро-радио оборудования 2-8%, постоянные жидкие грузы 1-2%, снабжение и имущество 1-2%, запас водоизмещения 2-5%, дедвейт 15-25%. Можно предположить, что массы  $P_2$ - $P_7$  для тримарана и катамарана практически не зависят от их конструктивных типов корпуса и могут быть определены на основании статистических зависимостей этих масс, полученных на базе судов-катамаранов, представленных в таблице 1. Численный анализ зависимостей измерителей масс (кроме масс  $P_1$  и  $P_4$ ) от ряда

модулей показал, что наивысшие показатели корреляции имеют место при модуле  $(LBH)^{2/3}$ , который был использован в дальнейших исследованиях. Модуль массы  $P_4$  на основании аналогичных выводов принят в виде  $N^{2/3}$ .

Таблица 1

**Разделы нагрузки масс пассажирских судов катамаранов и тримаранов**

Проект	Раздел нагрузки масс *, т					
	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$
HSC150B	14,417	3,595	-	7,913	1,348	3,6
L1100	7,323	3,329	-	7,05	1,076	2
P104	6,28	5,37	-	4,08	1,41	2,6
939	16,06	14,85	-	6,38	2,96	3,8
P80	56,42	29,83	-	14,32	8,05	7,56
P132	9,02	7,76	-	5,41	1,25	1,5
Super Speed	-	-	49,96	-	-	-
Benchijigua	-	-	313	-	-	-
Condor Liberation	-	-	243,3	-	-	-
Queen Beetle	-	-	154,64	-	-	-
Auto Express 118 - Bajamar Express	-	-	316,4	-	-	-
Tri swath	-	-	12,5	-	-	-

\* – обозначение разделов нагрузки масс см. формулу (2).

Результаты расчета измерителя масс  $\Psi_i$  выполненные с использованием пакета STATISTICA 10, приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Значение модуля и измерителя масс судов-прототипов**

Проект	Значения измерителей масс $\Psi_i$						Значения модулей	
	$\Psi_2$	$\Psi_3$	$\Psi_4$	$\Psi_5$	$\Psi_6$	$\Psi_7$	$LBH^{2/3}$	$Ne^{2/3}$
HSC150B	0,136	0,034	-	0,075	0,013	0,034	105,63	-
L1100	0,070	0,032	-	0,068	0,010	0,019	104,05	-
P104	0,065	0,055	-	0,042	0,014	0,027	97,27	-
939	0,129	0,119	-	0,051	0,024	0,030	124,97	-
P80	0,238	0,126	-	0,060	0,034	0,032	237,05	-
P132	0,114	0,098	-	0,068	0,016	0,019	79,47	-
Super Speed	-	-	0,137	-	-	-	-	364,54

Benchijigua	-	-	0,305	-	-	-	-	1024,67
Condor Liberation	-	-	0,268	-	-	-	-	906,65
Queen Beetle	-	-	0,216	-	-	-	-	717,02
Auto Express 118 - Bajamar Express	-	-	0,309	-	-	-	-	1024,67
Tri swath	-	-	0,084	-	-	-	-	147,97

Измеритель массы  $i$ -ой составляющей нагрузки рассчитывается по формуле:

$$\Psi_i = P_i / M_i \quad (3)$$

где,  $P_i$  – масса  $i$ -ой составляющей нагрузки судна-прототипа;

$M_i$  – модуль судна-прототипа.

Используя представленные статистические данные, получены следующие эмпирические зависимости (см. таблицу 3).

Таблица 3

Эмпирические зависимости для расчета масс  $P_2$ - $P_7$

Наименование $i$ -й массы	Расчетная формула	Коэффициент детерминации	Критерий Фишера
Масса судовых устройств	$P_2 = 0,329 \times (LBH)^{2/3} - 22,78$	0,95	99,8
Масса судовых систем	$P_3 = 0,168 \times (LBH)^{2/3} - 10,12$	0,83	26,2
Масса судовой энергетической установки	$P_4 = 0,352 \times Ne^{2/3} - 63,94$	0,96	121,5
Масса электро-радио оборудования	$P_5 = 0,059 \times (LBH)^{2/3} + 0,17$	0,84	28,7
Масса постоянных жидких грузов	$P_6 = 0,047 \times (LBH)^{2/3} - 3,18$	0,96	123,8
Масса снабжения и имущества	$P_7 = 0,037 \times LBH^{2/3} - 1,11$	0,92	63,4

**Масса металлического корпуса с надстройкой.** В разделе **корпус** основная доля (до 75%) приходится на массу металлического корпуса. На стадиях исследовательского проектирования она определяется по эмпирическим формулам с использованием того или иного вида модулей, широко представленных в литературе [2, 3]. Однако отсутствие достаточной статистической базы по спроектированным судам-тримаранам исключает такой подход и оставляет только путь разработки виртуальной математической модели требуемой конструкции корпуса с постатейным расчетом масс его элементов. Учитывая, что корпус тримарана состоит из центрального корпуса, двух боковых – аутригеров, соединяющего их моста и надстройки, математическая модель должна отражать эти три составляющие, сумма масс которых составит искомую массу металлического корпуса:

$$P_1 = P_{1,c} + 2 \times P_{1,a} + 2 \times P_{1,m} + P_{1,n} \quad (4)$$

где,  $P_{1,c}$  – масса металла центрального корпуса тримарана;

$P_{1,a}$  – масса металла аутригера;

$P_{1,m}$  – масса металла моста, соединяющего центральный корпус и аутригер;

$P_{1,n}$  – масса металла надстройки.

Математическая модель расчета массы, например центрального корпуса  $P_{1,c}$  в общем случае имеет следующий вид:

$$P_{1,c} = \sum P_{i,c} \quad (5)$$

$$P_{i,c} = f(\bar{P}_{ijc}, n_{ijc}, Q_{ijc}, S, U) \quad (6)$$

$$F(S, U) > [F(S, U)]_{\text{доп}} \quad (7)$$

где,  $P_{i,c}$  –  $i$ -я составляющая масс металла центрального корпуса (масса наружной обшивки, палуб и платформ, переборок и т.д.), т;

$\bar{P}_{ijc}$  – масса  $j$ -го элемента  $i$ -ой составляющей массы центрального корпуса продольных и поперечных рамных и холостых связей, кницы, распорки и т.д.;

$n_{ijc}$  – количество  $j$ -х элементов  $i$ -ой составляющей масс;

$Q_{ijc}$  – вектор характеристик  $j$ -го элемента (размеры элемента, свойства материала и т.п.);

$S$  – вектор проектных элементов и характеристик судна (главные размерения, мощность главных двигателей, шпация, класс Российского Классификационного Общества (далее РКО) и т.д.);

$U$  – вектор нормативных требований РКО;

$F(S, U)$  – суммарная площадь поперечного сечения продольных связей отдельно палубного и днищевое пояса эквивалентного бруса. Это условие принимается в связи с ограничением длины судна в 50 метров и менее.

В целом приведенная математическая модель расчета массы металлического корпуса является заключительной частью общей модели, включающей в себя аналитическое представление судовой поверхности, расстановку поперечных переборок, поперечных и продольных рамных и холостых связей с определением их количества, геометрических размеров, толщины наружной обшивки, палуб и платформ, второго дна и их массы.

Учитывая, что отношение  $L/V$  центрального корпуса и особенно аутригеров, много больше, чем у традиционных водоизмещающих судов, и что бы без необходимости не усложнять виртуальную модель судовой поверхности на данной стадии, были приняты клинообразные обводы в оконечностях, вертикальный борт и плоское днище при минимальном радиусе скулы.

При принятой системе набора деление на отсеки корпуса выполнялось из условия требуемого РКО [6] минимального числа поперечных переборок, размеров нормируемых отсеков, длины машинного отделения (далее МО). Длину МО судна-тримарана определяем по статистической зависимости по формуле:

$$L_{\text{мо}} = L \times 0,246 + 2,848 \quad (8)$$

При получении данной регрессионной формулы: коэффициент детерминации составил  $R^2_{\text{скор}} = 0,92 > 0,7$ ; критерий Фишера  $F(1,4) = 58$ ;  $p = 0,0016 < 0,05$ ; показатель Шапира-Уилка  $p = 0,19 > 0,05$ .

Для получения статистической зависимости (8) были взяты суда-тримараны, такие как: Super Speed, Benchijigua, Condor Liberation, Queen Beetle, Auto Express 118, Tri Swath.

При получении длины МО более 12 метров по формуле (8), его необходимо разделить на два непроницаемых отсека.

Длина топливного отсека, расположенного по ширине судна, принята равной четырем шпациям. Длину коффердама, отделяющего топливный отсек от других отсеков, принимаем равным двум шпациям. Горизонтальный коффердам устанавливается под надстройкой в верхней части топливного отсека и имеет высоту 0,9 м.

Общая длина сухих трюмов находится вычитанием из длины судна  $L$  суммы ранее назначенных длин всех отсеков. Длина одного трюма определяется делением

общей полученной длины полезных трюмов на их число. В районе цилиндрической вставки в целях унификации длина трюмов (отсеков) принята одинаковой, кратной рамной шпации.

При конструировании связей для расчета количества различных шпангоутов корпус по длине разделяется на носовую оконечность, среднюю часть, район машинного отделения, и кормовую часть [7].

Толщины наружной обшивки, палуб и переборок принимались как минимально необходимые по требованию Правил [6].

Размеры балок холостого и рамного набора определялись с учетом выполнения требований [6] к минимальному значению момента сопротивления соответствующих балок.

Масса наружной обшивки, палуб, второго дна определялись по их фактической площади и средней толщине поясов.

Аналогичный подход использовался при расчете массы металлического корпуса аутригера и моста. Масса металла надстройки определялась исходя из ее размеров, которые принимались в зависимости от численности пассажиров по работе [8], и материала наружных стенок и переборок.

По изложенной модели был разработан алгоритм и компьютерная реализация процедуры расчета массы металлического корпуса пассажирского тримарана на языке программирования Visual Basic. Тестовые расчеты показали адекватность принятой математической модели.

В таблице 4 приведен сравнительный анализ существующих судов-тримаранов с проектируемыми судами аналогичных размеров.

Таблица 4

**Сравнительный анализ судов-тримаранов**

Расчетные величины	Вариант первый		Вариант второй	
	Судно прототип	Проектируемое судно	Судно прототип	Проектируемое судно
Название судна	Super Speed	-	Queen Beetle	-
Фото		-		-
$L_{н}$	54,5	54,5	83,5	83,5
$L_{КВЛ} = L_{ц.к.}, м$	52,1	52,1	79,6	79,6
$B_{КВЛ}, м$	15	15	20,2	20,2
$H, м$	5,5	5,5	6,3	6,3
$T_{КВЛ}, м$	2,1	2,1	2,4	2,4
$L_{аут}, м$	31,3	31,3	36,8	36,8
$B_{ц.к.}, м$	4,5	4,5	8,3	8,3
$B_{аут}, м$	1,1	1,1	0,8	0,8

$T_{аут}$ , м	1	1	0,8	0,8
$n_{нас}$ , чел	473	473	502	502
$n_{эк}$ , чел	8	8	20	20
$v$ , км/ч	55	-	68	-
$N_e$ , кВт	3x2320	3x2320	4x4800	4x4800
$D_{пор}$ , т	316	327	690	718
$\frac{\delta D_{пор} =  D_{пор} - D'_{пор} }{D'_{пор} / (D_{пор} - D'_{пор} / \min)} \times 100\%$	3,5%		4%	
$D'_{пор}$ – водоизмещение порожнем проектируемого судна.				

Из таблицы 4 видно, что погрешность водоизмещения порожнем проектируемого судна от судна Super Speed составляет 3,5%, а для судна Queen Beetle составляет 4%, что находится в диапазон от 2% до 5% запаса водоизмещения, вследствие чего может быть учтено правильным выбором запаса водоизмещения.

#### Заключение

Предложенные статистические зависимости для расчета основных составляющих нагрузки масс и процедура расчета масс металлического корпуса, основанная на постатейном расчете по виртуальной модели конструкции корпуса и надстройки, составляют методику расчета водоизмещения речного пассажирского судна-тримарана.

Выполненные тестовые расчеты и анализ их результатов позволяют сделать вывод о том, что предлагаемая методика может быть использована для расчета нагрузки масс на стадии исследовательского проектирования рассматриваемого типа судов.

#### Список литературы

1. Ашик В. В. Проектирование судов. Ленинград.: Издательство «Судостроение». 1985. 320 с.
2. Роннов Е. П. Проектирование судов внутреннего плавания. Нижний Новгород.: Издательство ФГОУ ВПО «ВГАВТ». 2009. 288 с.
3. Егоров Г.А. Определение весовой нагрузки судов смешанного «река-море» плавания нового поколения в начальной стадии проектирования. Морской вестник № 4(48), 2013, с 19-22.
4. Бронников А.В. Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1991. 320 с.
5. Алферьев М.Я., Мадорский Г.С. Транспортные катамараны внутреннего плавания. М., «Транспорт», 1976. 336с.
6. Правила классификации и постройки судов Часть 1 «Корпус и его оборудование». Москва, «Российское Классификационное Общество», 2019. 192 с.
7. Протопопов В.Б., Свечников О.И., Егоров Н.М. Конструкция корпуса судов внутреннего и смешанного плавания. Л.: Судостроение, 1984. 376 с.
8. Корепанов А.Э., Роннов Е.П. Обоснование главных размерений тримарана из условия пассажироместимости в задачах исследовательского проектирования, Научные проблемы водного транспорта, 2022, №70 (1), с 39-47.

### References

1. Ashik V. V. Proektirovanie sudov [Ship design]. Leningrad.: Izdatel'stvo «SudostroeniE». 1985. 320 s.
2. Ronnov E. P. Proektirovanie sudov vnutrennego plavaniya [Design of inland navigation vessels]. Nizhny Novgorod.: Izdatel'stvo FGOU VPO «VGAVT». 2009. 288 s.
3. Egorov G.A. Opredelenie vesovoi nagruzki sudov smeshannogo «reka-more» plavaniya novogo pokoleniya v nachal'noi stadii proektirovaniya [Determination of the weight load of vessels of mixed "river-sea" navigation of a new generation at the initial design stage], Morskoi vestnik [Marine Bulletin], no. 4(48), 2013, pp. 19-22.
4. Bronnikov A.V. Proektirovanie sudov [Ship design]. L.: Sudostroenie, 1991. 320 s.
5. Alfer'ev M.YA., Madorskii G.S. Transportnye katamarany vnutrennego plavaniya [Inland transport catamarans]. M., «Transport», 1976. 336s.
6. Pravila klassifikatsii i postrojki sudov Chast' 1 «Korpus i ego oborudovanie». Moskva, «Rossijskoe Klassifikacionnoe Obshchestvo», 2019. 192 s.
7. Protopopov V.B., Svechnikov O.I., Egorov N.M. Konstruktsiya korpusa sudov vnutrennego i smeshannogo plavaniya [Construction of the hull of inland and mixed navigation vessels.]. L.: Sudostroenie, 1984. 376 s.
8. Korepanov A.EH., Ronnov E.P. Obosnovanie glavnykh razmerenii trimarana iz usloviya passazhirovmestimosti v zadachakh issledovatel'skogo proektirovaniya [Substantiation of the main dimensions of the trimaran from the passenger capacity condition in research design tasks], Nauchnye problemy vodnogo transporta [Scientific problems of water transport], 2022, №70 (1), pp. 39-47.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Корепанов Алексей Эдуардович**, аспирант, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, Россия, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

**Alexey E. Korepanov**, graduate student, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, Russian Federation, e-mail: a.e.korepanov@yandex.ru

**Роннов Евгений Павлович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедры проектирования и технологии постройки судов, Волжский государственный университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, Россия, e-mail: eronnov@mail.ru

**Evgeniy P. Ronnov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Shipbuilding Design and Technology Department, Volga State University of Water Transport, 603951, Nizhny Novgorod, Nesterova, 5, Russian Federation, e-mail: eronnov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2023; опубликована онлайн 20.06.2023.  
Received 02.02.2023; published online 20.06.2023.