



## ПРОВЕРКА ОСТОЙЧИВОСТИ СКОРОСТНЫХ АВТОПАССАЖИРСКИХ КАТАМАРАНОВ НА ЭТАПЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Буй Д.Т., Бондаренко А.В.**

*Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев*

*Проведен анализ методов расчета плеч статической остойчивости скоростных автопассажирских катамаранов на этапе концептуального проектирования. Дано описание алгоритма расчета и выполнена оценка погрешности вычислений.*

*Ключевые слова: автопассажирский катамаран, плечи статической остойчивости, концептуальное проектирование, погрешность, задача синтеза.*

**Постановка проблемы.** Остойчивость судна является одним из важнейших мореходных качеств, требования к которой регламентируются Правилами классификационного общества. Поскольку остойчивость связана с геометрическими характеристиками судна, то уже на начальных этапах проектирования возникает задача проверки выполнения этих требований. Для этого, как правило, необходимо построить диаграмму статической остойчивости (ДСО).

**Анализ последних исследований** показал, что в настоящее время наиболее разработаны приближенные методики [1 – 4], применяемые для расчета плеч ДСО однокорпусных судов. Для катамаранов построение ДСО является более трудной задачей из-за сложности их формы корпуса и неприменимости методик, используемых для однокорпусных судов. Из известных авторам научных публикаций по расчету ДСО катамаранов на начальных этапах проектирования следует отметить [5 – 6], но данные по погрешности отсутствуют. Поэтому, выбор наиболее точного метода определения плеч статической остойчивости на концептуальном этапе проектирования катамаранов является актуальной задачей.

**Цель работы** – анализ и выбор метода, позволяющего выполнять расчет остойчивости скоростных автопассажирских катамаранов (АПК) в задаче синтеза с наименьшей погрешностью.

**Изложение основного материала исследования.** Из теории корабля известно, что общая формула для расчета плеч статической остойчивости имеет следующий вид [4]:

$$l = y_c \cos \theta + (z_c - z_{c0}) \sin \theta - (z_g - z_{c0}) \sin \theta ,$$

где  $\theta$  – угол крена;  $y_c$  – отстояние центра величины (ЦВ) от диаметральной плоскости (ДП);  $z_c$  – аппликата центра величины;  $z_c, z_{c0}$  – аппликата центра величины при текущем угле крена и  $0^\circ$  соответственно;  $z_g$  – аппликата центра тяжести (ЦТ).

Для определения плеч ДСО катамаранов рассмотрим приближенный метод, который можно применить на начальных этапах проектирования [5]. Согласно этому методу, плечо остойчивости формы катамарана:

$$l_v = y_c \cos \theta + (z_c - z_{c0}) \sin \theta .$$

При этом  $y_c$  и  $z_c - z_{c0}$  определяются как функции от угла крена  $\theta$ :

$$y_c = \frac{a\theta}{1 + c\theta^{4/3}} ;$$

$$z_c - z_{c0} = b\theta^2 ,$$



где  $a, b, c$  – коэффициенты, которые определяются исходя из того, что кривые  $y_c = f(\theta)$  и  $z_c - z_{c0} = f(\theta)$  должны удовлетворять условиям, представленным в табл. 1.

Таблица 1 – Условия для определения коэффициентов  $a, b, c$

$\theta$	$y_c$	$dy_c/d\theta$	$z_c - z_{c0}$
0	0	$r_0$	0
$\pi/2$	$y_{c90}$	0	$z_{c90} - z_{c0}$

В результате найдено

$$a = r_0; b = \frac{z_{c90} - z_{c0}}{(\pi/2)^2}; c = \frac{r_0 \pi/2 - y_{c90}}{y_{c90} (\pi/4)^{4/3}}.$$

Подставляя коэффициенты  $a, b, c$  в выражение для расчета плеч остойчивости формы катамаранов, после ряда элементарных преобразований получаем приближенную формулу:

$$l_v = \frac{r_0 \theta}{A \theta^{4/3} + 1} \cos \theta + B \theta^2 \sin \theta,$$

где  $A, B$  – постоянные коэффициенты:

$$A = \frac{1}{2,46} \left( 1,57 \frac{r_0}{y_{c90}} - 1 \right);$$

$$B = \frac{z_{c90} - z_{c0}}{2,46}.$$

Тогда плечи статической остойчивости катамарана рассчитываются по общеизвестной формуле:

$$l = l_v - (z_g - z_{c0}) \sin \theta.$$

Таким образом, для расчета плеч остойчивости формы катамарана по приближенной формуле необходимо знать значения  $r_0, z_{c0}, y_{c90}, z_{c90}$ , которые могут быть определены по теоретическому чертежу или по приближенным зависимостям.

При использовании приближенных формул, поперечный метацентрический радиус катамарана можно рассчитать по следующим выражениям [5]:

$$r_0 = \frac{c_{II} C_W}{TC_B} \left( 1 + \frac{C_W^2}{2(c_{II} / B_1)^2 (1 + C_W)(1 + 2C_W)} \right)$$

или

$$r_0 = \frac{c_{II}^2 C_W}{d C_B}$$

или

$$r_0 = \frac{(c + B_1)^2 C_W}{4d C_B},$$

где  $2c_{II}$  – расстояние между диаметрными плоскостями корпусов катамарана;  $c$  – расстояние между бортами корпусов в районе мидель-шпангоута в плоскости грузовой



ватерлинии (ГВЛ);  $B_1$  – ширина одного корпуса катамарана;  $d$  – осадка;  $C_W$  – коэффициент полноты площади ГВЛ корпуса;  $C_B$  – коэффициент полноты водоизмещения корпуса.

Для определения ординаты центра величины  $z_{C0}$  катамарана может использоваться формула Л. Эйлера:

$$z_{C0} = \frac{1}{1 + \frac{C_B}{C_W}} d.$$

Апplikата центра величины  $z_{C90}$  при угле крена  $90^\circ$  определяется по приближенной формуле:

$$z_{C90} = \frac{DC_W}{2C_B},$$

где  $D$  – высота борта в плоскости мидель-шпангоута.

Ордината центра величины катамарана  $y_{C90}$  при угле крена  $90^\circ$  приближено может быть найдена по выражению:

$$y_{C90} = \frac{1}{2} \left[ B_0 - \left( \frac{B_0}{2} - c_{II} - \eta \right) C_B \right].$$

Здесь

$$\eta = \frac{1}{4D} [(D-d)(B_0 - 2c_{II} + B_1)C_W - 6C_B B_1 d],$$

где  $B_0$  – наибольшая ширина катамарана.

Авторами были выполнены расчеты по описанному выше приближенному методу, которые показали значительную погрешность расчетов (см. табл. 3).

Для более точного решения задачи оценки остойчивости катамарана в [7] предлагается метод, который основывается на теоретической базе и решается с помощью ЭВМ (для различия от приближенного метода назовем его теоретическим).

В соответствии с новым подходом, плечо статической остойчивости определяют через координаты центра величины судна. Расчет координат центра величины для каждого угла крена выполняется по следующему алгоритму:

1. Деление длины судна на множество элементарных отрезков. Судно считается суммой множества элементарных призм, у которых длины равны элементарным отрезкам.
2. Определение подводного объема и координаты центра величины каждой элементарной призмы относительно основной (ОП) и диаметральной плоскостей судна.
3. Расчет объемного водоизмещения и координат центра величины судна под наклонной ватерлинией.

Для определения координат центра величины катамарана, сначала рассмотрим такую же задачу для однокорпусного судна.

На каждом шпангоуте проводятся прямые линии, которые пересекают шпангоут и образуют угол крена  $\theta$  относительно ОП. На каждой осадке по оси  $\theta z$  проводятся прямые линии, параллельные ОП (рис. 1). Определяются вспомогательные значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  по следующим формулам:

$$a = \frac{z}{\operatorname{tg}\theta} - t;$$



$$b = a + 0,5c;$$

$$c = y - a,$$

где  $y$  – половина ширины судна, измеряемая на текущей осадке на текущем шпангоуте;  
 $t$  – расстояние от точки пересечения наклонной ватерлинии и ОП до ДП судна.

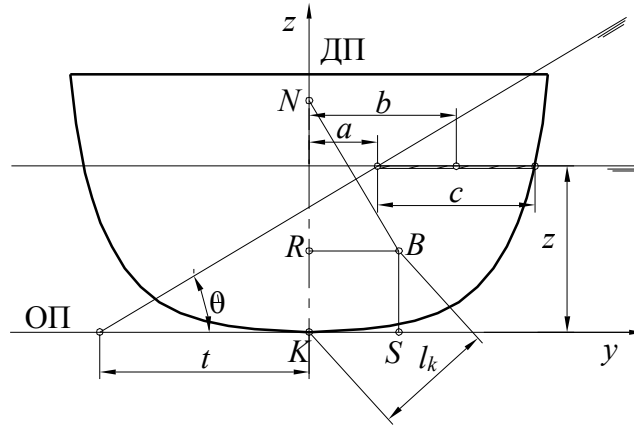


Рисунок 1 – Описание способа определения ЦВ однокорпусного судна:  $N$  – ЦТ судна;  
 $B$  – ЦВ судна

Площадь шпангоута под наклонной ватерлинией:

$$A(x) = \int_0^d c(z) dz.$$

Статический момент подводной площади шпангоута относительно ОП судна:

$$M_B(x) = \int_0^d c(z) z dz.$$

Статический момент подводной площади шпангоута относительно ДП судна:

$$M_C(x) = \int_0^d c(z) b(z) dz.$$

Объемное водоизмещение под наклонной ватерлинией:

$$V = \int_L A(x) dx.$$

Координаты центра величины под наклонной ватерлинией:

$$\overline{SB} = \frac{\int_L M_B(x) dx}{\int_L A(x) dx};$$

$$\overline{RB} = \frac{\int_L M_C(x) dx}{\int_L A(x) dx}.$$

Плечо остойчивости формы:



$$l_k = KN \sin \theta = \overline{SB} \sin \theta + \overline{RB} \cos \theta.$$

Тогда плечо статической остойчивости определяется по формуле:

$$l = l_k - z_g \sin \theta.$$

В этом алгоритме любое значение  $c$  должно быть неотрицательным. Если  $c \geq 2y$ , то  $c = 2y$  и  $b = 0$ . Если  $c \leq 0$ , то  $c = 0$  и  $b = y$  (рис. 2).

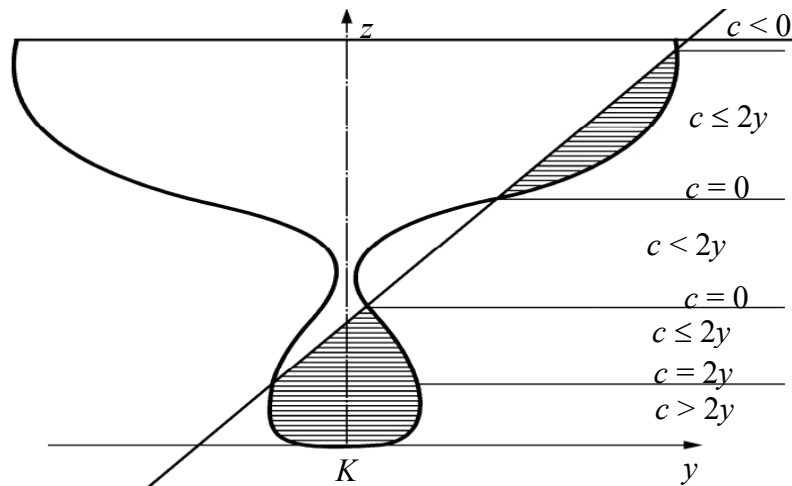


Рисунок 2 – Различные случаи при определении вспомогательного значения  $c$

При определении координат центра величины катамарана под наклонной ватерлинией, возможны два случая. Первый – когда наклонная ватерлиния одновременно пересекает два корпуса катамарана (рис. 3).

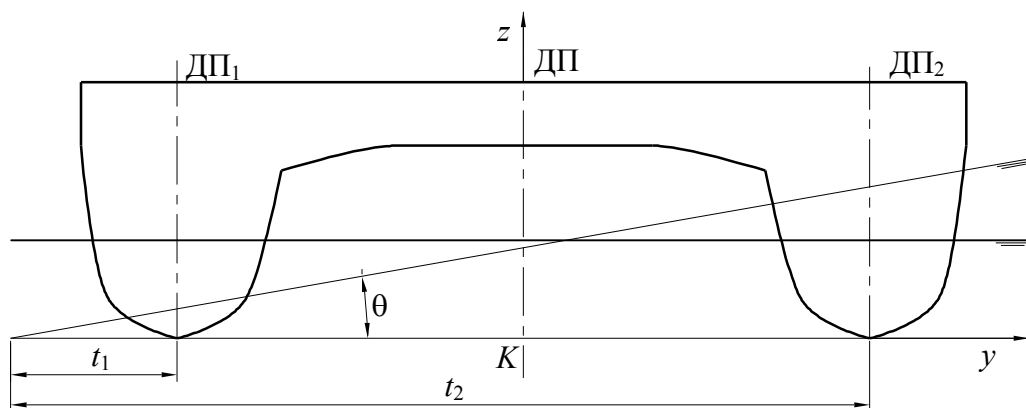


Рисунок 3 – Описание способа определения ЦВ катамарана

В этом случае,

$$t_1 = t_2 - 2c_{II},$$

где  $2c_{II}$  – расстояние между ДП корпусов катамарана.

Координаты центра величины катамарана определяется через координаты центров величины двух корпусов:

$$\overline{SB} = \frac{\overline{SB}_1 V_1 + \overline{SB}_2 V_2}{V_1 + V_2},$$



$$\overline{RB} = \frac{(\overline{RB}_1 - c_{II})V_1 + (\overline{RB}_2 + c_{II})V_2}{V_1 + V_2},$$

где  $V_1, V_2$  – соответственно объемное водоизмещение первого и второго корпуса катамарана под наклонной ватерлинией;  $\overline{SB}_1, \overline{RB}_1$  – координаты центра величины первого корпуса катамарана;  $\overline{SB}_2, \overline{RB}_2$  – координаты центра величины второго корпуса катамарана.

Для второго случая, когда ватерлиния пересекает только один корпус катамарана (рис. 4), расчет проводится по схеме однокорпусного судна.

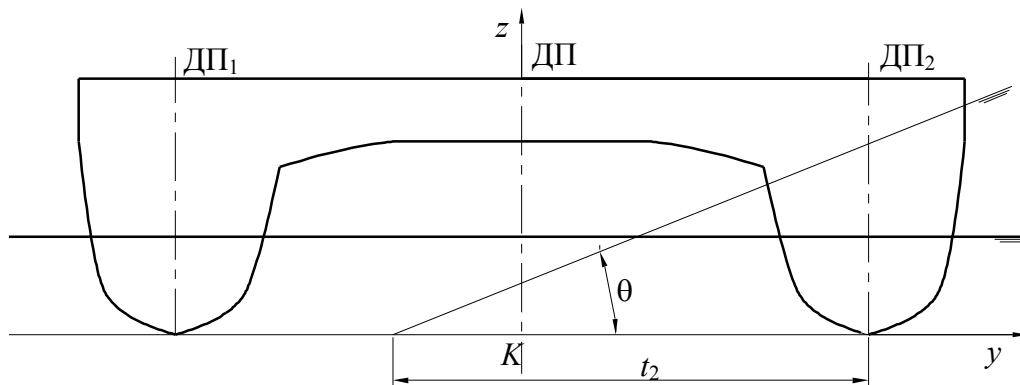


Рисунок 4 – Описание способа определения ЦВ катамарана

Данный алгоритм был реализован в среде программирования «Delphi» и затем использовался для оценки точности расчетов.

Для сравнительного анализа результатов и оценки погрешности расчетов были созданы в САД системе несколько моделей корпусов катамаранов, характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Основные характеристики корпусов катамаранов

Наименование	Обозн.	cat 1	cat 2	cat 3	cat 4	cat 5	cat 6
Длина по ватерлинии, м	$L_{wl}$	79,50	92,12	69,90	87,10	78,10	41,40
Ширина наибольшая, м	$B_0$	22,53	45,00	17,43	26,61	17,77	11,20
Ширина одного корпуса, м	$B_1$	4,80	5,00	4,23	5,30	3,87	2,40
Осадка, м	$d$	2,50	5,00	2,50	4,20	2,60	1,40
Высота борта, м	$D$	6,80	15,00	6,90	9,40	6,30	3,50
Коэффициент общей полноты	$C_B$	0,507	0,638	0,583	0,608	0,511	0,570

Для каждого из корпусов были выполнены расчеты по теоретическому и приближенному методу. Результаты сравнения двух методов с данными, полученными с помощью системы «Hydromax Pro», которые принимаются за эталонные значения, представлены в табл. 3 и на рис. 5.



Таблиця 3 – Значення плеч статической остойчивости катамарана cat 2

Угол крена, град.	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Hydromax	0,00	15,45	17,09	14,87	12,22	9,22	6,03	2,92	0,18	-2,12
Теоретический метод	0,00	15,39	17,08	14,91	12,24	9,14	6,12	2,89	0,66	-1,78
Приближенный метод	0,00	12,30	17,69	18,66	17,14	14,28	10,77	7,03	3,32	-0,18
Погрешность теоретического метода, %	–	0,39	0,04	0,25	0,20	0,92	1,54	1,06	259,89	16,04
Погрешность приближенного метода, %	–	20,40	3,53	25,46	40,28	54,81	78,53	140,46	1726,63	91,30

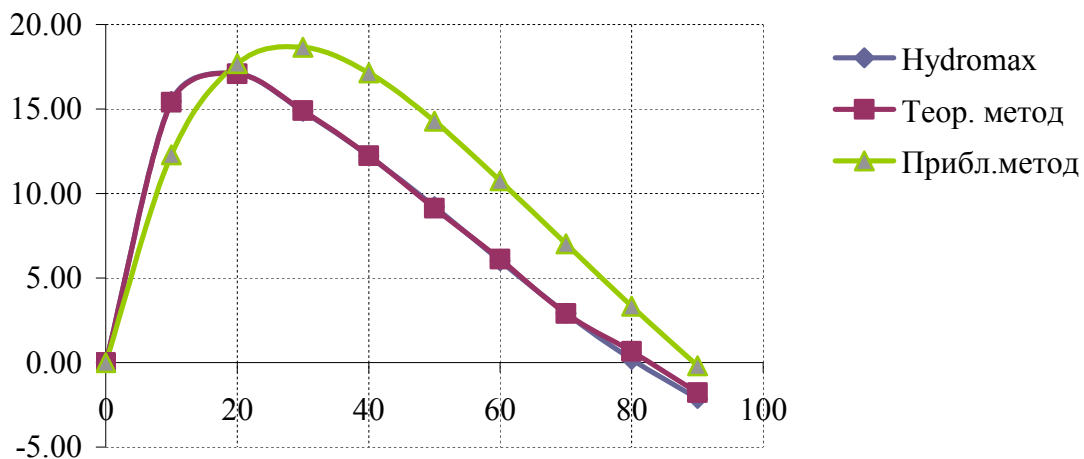


Рисунок 5 – Диаграмма сравнительного анализа плеч статической остойчивости

Диаграмма показывает, что теоретический метод дает очень близкий результат с эталонными значениями Hydromax (на рис. 5 до угла крена 80° точки практически совпадают). При этом погрешность расчетов не превышает 2%. Большие значения погрешности в диапазоне углов крена 80°...90° объясняются близостью плеча статической остойчивости к нулю и, как следствие, потерей точности. Аналогичные результаты получены и для других корпусов катамаранов. Единственным недостатком этого метода является необходимость наличия точечной модели корпуса катамарана. Данная проблема решена авторами благодаря применению параметрической модели.

Полученные значения плеч ДСО аппроксимируются сплайном и проводятся расчеты по проверке требований к остойчивости. Для скоростных автопассажирских катамаранов должны выполняться следующие значения критериев остойчивости [8]:

1. Площадь  $A_1$  ДСО до угла  $\theta$  должна быть не менее

$$A_1 = 0,055 \times 30 / \theta, \text{ м рад,}$$

где угол  $\theta$  – меньший из следующих углов: угла заливания, угла максимума ДСО и 30°;

2. Угол крена, соответствующий максимальному значению ДСО, должен быть не менее 10°;

3. Отклонение судна от горизонтальной плоскости не должно превышать 10° в любом направлении при всех допустимых случаях размещения грузов и возможных неконтролируемых перемещениях пассажиров;

4. Остаточная площадь  $A_2$ , ограниченная ДСО, т.е. за углом крена  $\theta_h$  должна составлять, по меньшей мере, 0,028 м рад до угла крена при бортовой качке  $\theta_r$ ,



где  $\theta_h$  – угол крена от действия кренящего момента с плечом  $HL_2$  или  $HTL$ ;

5. Угол крена, возникающий вследствие действия ветрового кренящего момента (плечо  $HL_2$ ), не должен превышать  $10^\circ$ .

Полученные характеристики входят в систему ограничений и используются при решении задачи синтеза, т.е. выбора оптимальных характеристик высокоскоростных судов.

**Вывод.** В статье рассмотрены два метода определения плеч статической остойчивости катамаранов на этапе концептуального проектирования. Выполненные расчеты и сравнительный анализ выходных значений с эталонными результатами позволил авторам рекомендовать наиболее подходящий метод [7] для использования в задаче оптимизации главных элементов скоростных автопассажирских катамаранов. Перспективы дальнейшего исследования авторы видят в усовершенствовании предложенного теоретического метода для расчета остойчивости других типов многокорпусных судов: тримаранов, судов с малой площадью ватерлинии и т.д.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуславский А. Н. Анализ способов расчёта диаграмм остойчивости на ранних стадиях проектирования / А. Н. Богуславский // Труды ЛИВТ. – Л. : Речной транспорт, 1962. – Вып. 40. – С. 57-70.
2. Власов В. Г. Приближённая формула для вычисления плеч остойчивости формы / В. Г. Власов / В книге Власов В. Г. Собрание трудов. – Л. : Судпромгиз, 1959. – Том I. – С. 153-171.
3. Поздюнин В. Л. Приближённые формулы для расчёта остойчивости на больших углах крена / В. Л. Поздюнин – Л. : ЛКИ, 1937. – 42 с.
4. Семёнов-Тян-Шанский В. В. Статика и динамика корабля : учебник / В. В. Семёнов-Тян-Шанский – Л. : Судостроение, 1973. – 608 с.
5. Милова И. И. Приближенное вычисление плеч статической остойчивости катамаранных судов / И. И. Милова // Труды ГИИВТа. – 1975. – Вып. 144. – С. 49-62.
6. Соломенцев О. И. Приближённые формулы для расчёта остойчивости двухкорпусных судов на больших углах крена / О. И. Соломенцев // Статья депонирована в ЦНИИ «Румб», № ДР-1363, 1981. – 36 с.
7. Чан К. Н. Автоматизированные расчеты в проектировании судов / К. Н. Чан. – Хошимин : Транспортный университет, 2009. – 172 с.
8. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. – СПб. : Российский морской регистр судоходства, 2008. – 182 с.

#### **Буй Д.Т., Бондаренко А.В. ПЕРЕВІРКА ОСТІЙНОСТІ ШВИДКІСНИХ АВТОПАСАЖИРСЬКИХ КАТАМАРАНІВ НА ЕТАПІ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

*Проведено аналіз методів розрахунку плечей статичної остійності швидкісних автопасажи́рських катамаранів на етапі концептуального проектування. Дано опис алгоритму розрахунку і виконано оцінку похибки обчислень.*

*Ключові слова: автопасажи́рський катамаран, плечі статичної остійності, концептуальне проектування, похибка, задача синтезу.*

#### **Bui D.T., Bondarenko A.V. VERIFICATION OF STABILITY OF HIGH SPEED CAR/PASSENGER CATAMARANS AT THE STAGE OF CONCEPTUAL DESIGN**

*The analysis of methods of righting levers' calculation of the GZ curve of high-speed car/passenger catamarans is conducted at the stage of conceptual design. The description of the calculation algorithm is given and the estimation of the calculations error is executed.*

*Keywords: car/passenger catamaran, righting lever (GZ), conceptual design, error, task of synthesis.*