

УДК 629.122

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЫЛЬЕВЫХ СИСТЕМ КАТАМАРАНОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Кириллов Владислав Олегович¹, магистрант

e-mail: vladisl.kirillov2010@mail.ru

Гусев Александр Сергеевич¹, аспирант

e-mail: gususev@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Общепринятая методика проектирования крыльевых систем скоростных катамаранов на подводных крыльях в настоящее время отсутствует, поскольку суда с таким способом динамического поддержания исследованы недостаточно полно. В работе выполнен анализ ряда перспективных крыльевых схем построенных катамаранов, на основе которого составлен план вычислительного эксперимента и выбраны конфигурации крыльев с различными геометрическими параметрами. Для учёта гидродинамических сил, действующих на корпус, применён метод Д. Савицкого. Расчёт подъёмной силы изолированной крыльевой системы проводился в программном комплексе AUTOWING. Для сокращения объёма вычислений применён метод планирования эксперимента, позволивший ограничиться 30 наиболее информативными конфигурациями. По итогам серии из 30 расчётов для каждой конфигурации при различных скоростях хода и углах дифферента были получены графики зависимости коэффициента разгрузки от чисел Фруда.

Ключевые слова: катамаран на подводных крыльях, крыльевая система, планирование эксперимента, гидродинамические характеристики, метод Савицкого, коэффициент разгрузки, AUTOWING.

APPLICATION OF COMPUTATIONAL EXPERIMENT DESIGN METHODS FOR STUDYING THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF HYDROFOIL-ASSISTED CATAMARAN FOIL SYSTEMS

Alexander S. Gusev¹, Doctoral Student

e-mail: gususev@yandex.ru

Vladislav O. Kirillov¹, Master's Degree student

e-mail: vladisl.kirillov2010@mail.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A generally accepted methodology for designing hydrofoil systems of high-speed hydrofoil-assisted catamarans is currently lacking, since vessels with this method of dynamic support have been insufficiently studied. The paper analyses a number of promising foil configurations of existing catamarans, on the basis of which a computational experiment plan is drawn up and foil configurations with different geometric parameters are selected. The method of D. Savitsky is applied

to account for the hydrodynamic forces acting on the hull. The lift of the isolated foil system was calculated using the AUTOWING software package. To reduce the volume of calculations, an experiment design method was used, which allowed limiting the study to the 30 most informative configurations. Based on a series of 30 calculations for each configuration at different speeds and trim angles, graphs of the unloading coefficient versus Froude numbers were obtained.

Keywords: hydrofoil-assisted catamaran, foil system, experiment design, hydrodynamic characteristics, Savitsky method, unloading coefficient, AUTOWING.

Введение

В настоящее время одной из известных проектных организаций в России по созданию скоростных катамаранов на подводных крыльях (СКПК) является КБ «Ситех». Разработанные этим коллективом проекты HSC150B и HSC200 (рис. 1) относятся к новому поколению пассажирского флота для внутренних и прибрежных линий. Проект HSC150B успешно прошёл ходовые испытания, а головное судно проекта HSC200 находится в постройке.

Несмотря на очевидный практический успех, нормативные методики проектирования таких крыльевых устройств (КУ) в открытых публикациях практически отсутствуют. Известные Правила [2, 3] ориентированы на классические однокорпусные суда на подводных крыльях и не учитывают ни особенностей тандемной компоновки крыльев в стеснённом межкорпусном зазоре, ни взаимодействия несущих поверхностей с глиссирующими днищами. Как следствие, определение рациональных параметров крыльевой системы на ранних стадиях проекта ведётся либо на основе частного опыта, либо путём многократных численных экспериментов с перебором вариантов.

Ключевой задачей начальной стадии проектирования является определение эффективного коэффициента разгрузки корпуса со стороны крыльевой системы при различных сочетаниях её геометрических параметров. Именно этот коэффициент показывает, какую долю от полного веса судна воспринимают крылья, а какую — корпуса, и тем самым напрямую влияет на ходовые и мореходные качества катамарана.

Цель настоящей работы — на основе ограниченного, но достаточного числа численных расчётов получить зависимости коэффициента разгрузки от основных геометрических характеристик крыльевой системы, которые можно будет использовать как практический инструмент на эскизной стадии проектирования.



Рисунок 1 – Проекты HSC150B и HSC200

Анализ построенных скоростных катамаранов на подводных крыльях

Проведенный анализ доступных данных по реальным проектам СКПК табл. 1 показал, что, можно выделить общие диапазоны относительных геометрических характеристик крыльевых систем, применяемых ведущими конструкторскими бюро.

Таблица 1 – Относительные параметры крыльевых систем существующих СКПК

Год постройки\Фирма Страна	Проект\ название	Крыльевая схема	Скорость, уз	Заглубление крыльев (осадка судна при ходе), м	Размах НКУ, м		Размах НКУ, м	Хорда НКУ $c_{0.5}$, м	Хорда НКУ $c_{0.7}$, м	Распределение нагрузки в процентах	Относительная толщина профиля НКУ $e = e_{max}/c$, %	Относительная толщина профиля ККУ $e = e_{max}/c$, %	Относительное удлинение НКУ l/c_H	Относительное удлинение ККУ l/c_K	Относительное погружение НКУ h/c_H	Относительное погружение ККУ h/c_K
					l	h										
2002\ "Морской завод "Алмаз" (Россия)	Linda Express (SF-40)	Два Т-образных поворотных НКУ	55	1,2	3,5	-	1,2	-	-	-	-	-	2,92	-	1,00	-
1998\ "Halter Marine (Луизиана)	"E-Cat"	НКУ и ККУ между корпусами, НКУ ниже ВЛ	45	-	6	6	1,5	1,5	-	-	-	-	4,00	4,00	1,00	1,00
2021\ Seatech (Россия)	HSC1508 "Сарма", "Селенга"	НКУ-ш-обр; ККУ - между корпусами и вынесено за транец	27	0,6	11	4,27	0,8	0,8	0,8	НКУ-40% и ККУ - 20%, корпус - 40%	6,85	7,5	13,75	5,34	0,75	0,75
2022\ Seatech (Россия)	HSC200	НКУ - стреловидное типа СПК "Комета"; ККУ - вынесено за транец и между корпусами	35	1	10,38	5,13	1,25	1,4	1,4	НКУ-60% и ККУ - 25%, корпус - 15%	8	8	8,30	3,66	0,80	0,71
2005г. \Kitsap catamarans (Гакона)	"Sunchaser"	Стреловидное (15град) НКУ и прямое ККУ между корпусами	40	0,5	6,36	6,36	0,42	0,42	0,42	НКУ и ККУ - 70%, корпус - 30%	7,5	7,5	15,14	15,14	1,19	1,19
Icarus Marine Ltd. (ЮАР)	"IDC 15"	Носовое проходит через туннель корпуса, и два кормовых дифференцирующих крыла. Главное подвешенное крыло расположено вблизи центра тяжести, чуть выше уровня киля, а дифференцирующие крылья — у транца, примерно 200мм выше киля.	36	0,6	2,2	0,6	0,4	0,4	0,4	НКУ и ККУ - 60%	-	-	5,50	1,50	1,50	1,50
Nichols Brothers Boat Builders, Inc.	Jet Cat Express (S-140)	ККУ между корпусами	37	0,6	4,95	4,95	0,95	1,3	1,3	-	-	-	5,21	3,81	0,63	0,46

В качестве объекта исследования принята тандемная крыльевая схема катамарана с неполным выходом на крыло, при котором весовую нагрузку несут как крылья, так и корпуса. Распределение нагрузки между носовым (НКУ) и кормовым (ККУ) крыльевыми устройствами в такой схеме не является симметричным и, в отличие от классического правила 50/50, требует уточнения.

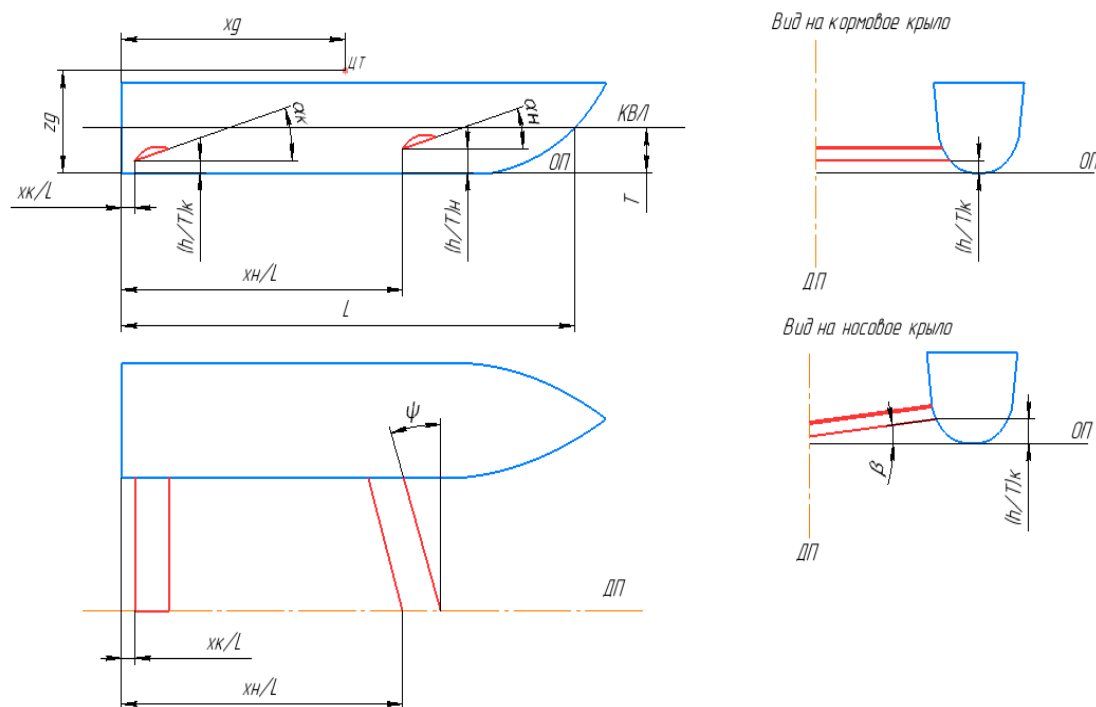


Рисунок 1 – Эскиз к определению варьируемых характеристик КУ

Таблица 2. Варьируемые характеристики КУ

x_H/L	относительное положение носового крыла (НКУ) от транца по длине
x_K/L	относительное положение кормового крыла (ККУ) от транца по длине
$(h/T)_H$	относительное положение НКУ от основной плоскости по высоте
$(h/T)_K$	относительное положение ККУ от основной плоскости по высоте
l/c	относительное удлинение крыльев
$\alpha_H, ^\circ$	угол атаки НКУ
$\alpha_K, ^\circ$	угол атаки ККУ
$\psi_H, ^\circ$	угол стреловидности НКУ
$\beta_H, ^\circ$	угол килеватости НКУ
$c'_H, \%$	относительная толщина профиля НКУ в долях от хорды
$c'_K, \%$	относительная толщина профиля ККУ в долях от хорды
c	хорда
T	осадка
L	длина судна

Планирование эксперимента

С целью минимизации числа CFD-расчетов, которые требуют большого количества времени, при сохранении статистической значимости результатов был применен аппарат центрального композиционного планирования (ЦКП) [5]. При числе независимых факторов $N = 11$ минимально необходимое число опорных точек по схеме $2^N + 2N + 1$ составляет 24.

Для повышения точности предсказания в зонах экстремумов план был дополнен «звездными» точками, что довело общее число расчетных конфигураций до 30. Таким образом, был достигнут компромисс между полнотой факторного пространства и вычислительными затратами. Варьируемые факторы и их уровни представлены в таблице 3.

Таблица 3. План эксперимента на латинском гиперкубе.

Конфигурация	№	хн/L	хк/L	(h/T) _н	(h/T) _к	l/c	α _н , °	α _к , °	ψ _н , °	β _н , °	с'н, %	с'к, %
hcat_v01	1	0,55	0	0	0,25	2	-2	4	0	0	4	10
hcat_v02	2	0,6	0,1	0,25	0,5	4	2	-2	10	10	8	4
hcat_v03	3	0,65	0,2	0,5	0	6	4	2	20	20	10	6
hcat_v04	4	0,7	0	0,25	0,25	8	0	0	5	30	6	8
hcat_v05	5	0,75	0,1	0	0,5	10	-2	-2	25	40	4	10
hcat_v06	6	0,55	0,2	0,5	0	2	4	4	15	10	8	4
hcat_v07	7	0,6	0	0	0,25	4	0	-2	20	20	10	6
hcat_v08	8	0,65	0,1	0,25	0,5	6	-2	2	0	30	6	8
hcat_v09	9	0,7	0,2	0,5	0	10	2	0	10	40	4	10
hcat_v10	10	0,75	0	0,25	0,25	8	4	4	25	0	8	4
hcat_v11	11	0,55	0,1	0	0,5	6	2	2	5	20	10	6
hcat_v12	12	0,6	0,2	0,5	0,25	2	-2	-2	15	30	6	8
hcat_v13	13	0,65	0	0,25	0	8	0	4	25	40	4	10
hcat_v14	14	0,7	0,1	0	0,5	10	4	-2	10	0	8	4
hcat_v15	15	0,75	0,2	0,5	0,25	4	-2	0	20	10	10	6
hcat_v16	16	0,55	0	0,25	0	8	4	2	0	30	6	8
hcat_v17	17	0,6	0,1	0,5	0,5	6	0	-2	25	40	4	10
hcat_v18	18	0,65	0,2	0	0,25	2	2	4	10	0	8	4
hcat_v19	19	0,7	0	0,25	0	10	-2	0	15	20	10	6
hcat_v20	20	0,75	0,1	0	0,5	4	4	-2	5	30	6	8
hcat_v21	21	0,55	0,2	0,5	0,25	8	-2	2	20	40	4	10
hcat_v22	22	0,6	0	0	0	4	2	0	0	10	8	4
hcat_v23	23	0,65	0,1	0,25	0,5	10	4	-2	25	20	10	6
hcat_v24	24	0,7	0,2	0,5	0,25	6	0	4	15	30	6	8
hcat_v25	25	0,75	0	0	0	2	-2	2	10	40	4	10
hcat_v26	26	0,55	0,1	0,25	0,5	6	4	-2	5	0	8	4
hcat_v27	27	0,6	0,2	0,5	0	8	0	0	20	10	10	6
hcat_v28	28	0,65	0	0	0,25	4	-2	4	25	20	6	8
hcat_v29	29	0,7	0,1	0,25	0,5	2	2	-2	0	30	4	10
hcat_v30	30	0,75	0,2	0,5	0	10	4	2	15	40	8	4

Метод определения равновесного положения и нагрузок

Для каждой из 30 конфигураций проведен расчет подъемной силы и сопротивления изолированной крыльевой системы. Моделирование обтекания выполнялось методом дискретных вихрей в программном комплексе AUTOWING, хорошо зарекомендовавшим себя в задачах динамики крыльев вблизи свободной поверхности [6, 7]. Расчет учитывал взаимовлияние носового и кормового крыльев и деформацию волновой поверхности.

Для учета доли веса судна, воспринимаемой глиссирующими корпусами, использован метод Д. Савицкого [8]. В рамках этой модели нормальная сила N , действующая на корпус, и вязкостная составляющая сопротивления D_f определяются через угол дифферента τ и смоченную длину, что позволяет вычислить вертикальную составляющую поддержания, создаваемую корпусом при данной скорости. С помощью уравнения моментов относительно центра тяжести судна были определены равновесные состояния системы корпус катамарана с КУ. Для равновесных положений вычислены коэффициенты гидродинамической разгрузки K_R по формуле:



$$K_R = F_{\text{кy}} / D, \quad (1)$$

где D — вес судна,

$F_{\text{кy}}$ — подъёмная сила крыльевого устройства.

Основные результаты

По итогам серии расчетов для каждой конфигурации при различных скоростях хода и углах дифферента был получен график зависимости коэффициента разгрузки от чисел Фруда (рисунок 2), на графике показаны коэффициенты разгрузки острого корпуса со стороны КУ наиболее удачных конфигураций.

Установлено, что на скоростях, соответствующих переходному режиму ($Fr=0,4...1,0$) доминирующее влияние на степень разгрузки оказывают удлинение крыла. Увеличение относительного удлинения при фиксированном погружении приводит к значительному росту K_R , что объясняется известным из теории крыла конечного размаха снижением индуктивных потерь.

В последующем результаты данного исследования будут использованы для создания регрессионной модели

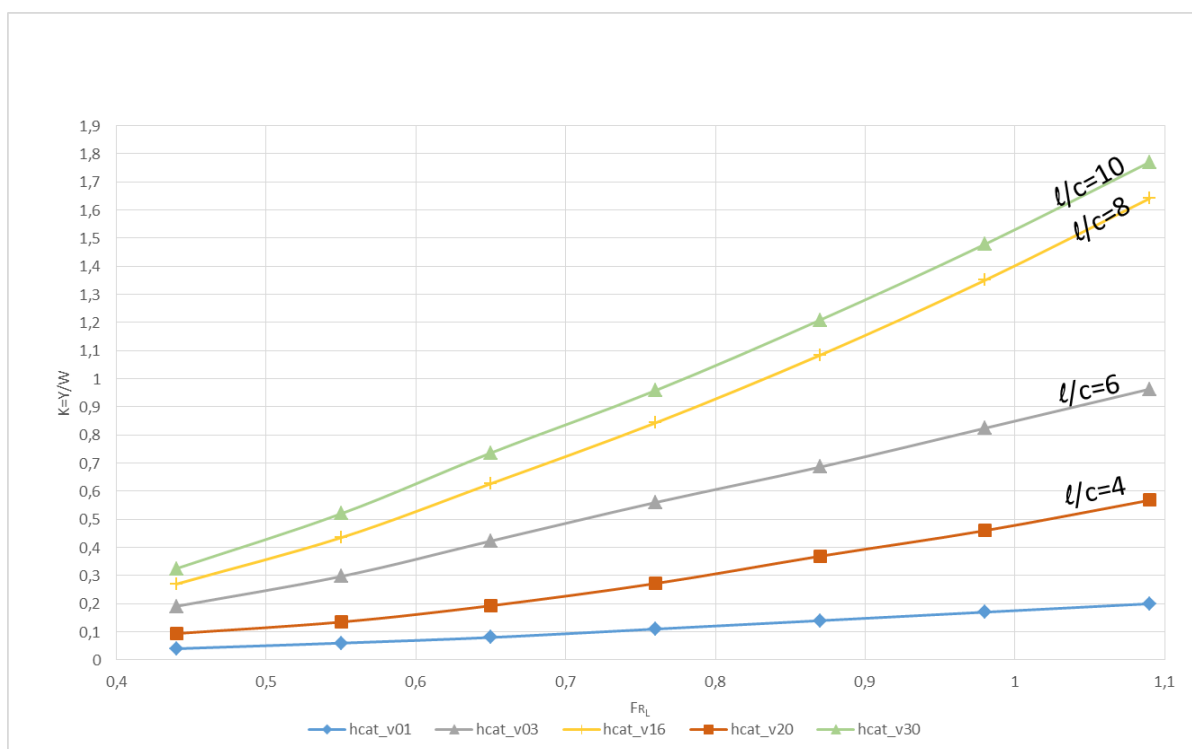


Рисунок 2 – Коэффициенты разгрузки крылевой системы катамарана в зависимости от скорости при различных удлинениях крыльев

Список литературы

Список литературы:

1. Катамараны на подводных крыльях: проекты КБ «Ситех» // Морской вестник. — 2022. — №3. — С. 45–49.
2. Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов. — М., 2022. — 1506 с.
3. Российский Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. — СПб., 2023. — 123 с.

4. Егоров И.Т., Соколов В.Т. Гидродинамика быстроходных судов. — Л.: Судостроение, 1971. — 424 с.
5. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 279 с.
6. Болотин А.А. Применение метода дискретных вихрей для исследования подводных крыльев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — 2015. — №3(110). — С. 210–213.
7. Гирин С.Н., Гусев А.С. Расчет нагрузок на крыльевые устройства комплексами AUTOWING и ANSYS // Труды ВГУВТ. — 2023. — №74. — С. 10–20.
8. Savitsky D. Hydrodynamic design of planing hulls // Marine Technology. — 1964. — Vol. 1, No. 4. — P. 71–95.

