

УДК 629.5.01

Д.Т. Буй, А.В. Бондаренко, А.П. Бойко

**РАСЧЕТ БУКСИРОВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТАМАРАНОВ  
В ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА**

*Розглянуто питання визначення буксирувального опору катамаранів різних типів. Наведено результати тестування запропонованого алгоритму на прикладі суден типу СМПВ.*

**Ключові слова:** катамаран, опір, достовірність, інтеграл Мічелла, задача синтезу.

*Рассмотрен вопрос оценки буксировочного сопротивления катамаранов различных типов. Приведены результаты тестирования предложенного алгоритма на примере судов типа СМПВ.*

**Ключевые слова:** катамаран, сопротивление, достоверность, интеграл Мичелла, задача синтеза.

*The question of estimation of total resistance of catamaran of different types is considered. The results of testing of the offered algorithm are resulted on the example of SWATH ships.*

**Keywords:** catamaran, resistance, validity, Michell integral, task of synthesis.

**Введение.** На начальных этапах проектирования катамаранов инженеру приходится решать задачу синтеза, т.е. выбора оптимальных характеристик. Как правило, эта задача предусматривает решение следующих вопросов: выбор главных размерений, расчет ходкости, остойчивости, непотопляемости, мореходности на волнении, нагрузки масс, прочности и оценка эффективности. Каждый из них является достаточно сложным и требует выбора определенного метода, применительно к поставленной задаче. В данной работе авторами рассматривается вопрос прогнозирования буксировочного сопротивления и мощности, поскольку точность оценки ходкости связана с достижимой скоростью катамарана и штрафными санкциями в случае ее отклонения от скорости, указанной в техническом задании на проектирование.

При решении задачи синтеза расчет буксировочного сопротивления может рассматриваться более упрощенно. Модельные испытания на этом этапе невозможно применить ввиду значительного количества вариантов характеристик судна.

Проведенный авторами анализ публикаций по данному направлению показывает, что в научной литературе опубликовано достаточно много работ, посвященных сопротивлению катамаранов [1-5].

Их анализ и обобщение дает возможность все рассматриваемые методы, используемые на начальных этапах проектирования, объединить в несколько групп с общими принципами расчета. В первую очередь следует назвать теоретические, параметрические методы и методы, базирующиеся на результатах модельных испытаний. В большинстве публикаций рассматриваются приближенные методы, основанные на результатах испытаний серийных моделей судов, которые малоприменимы в задаче синтеза.

Ввиду значительного удлинения корпусов катамаранов представляется целесообразным применить теоретические методы расчета буксировочного сопротивления, основанные на теории волнового сопротивления.

**Цель статьи** – проведение исследований, направленных на разработку алгоритма прогнозирования сопротивления катамаранов и проверка его достоверности.

**Изложение основного материала.** В данной статье для расчета полного сопротивления катамаранов предлагается использовать приближенный метод, в основу которого положены работы [6–8] с уточнениями для расчета волнового сопротивления. В соответствии с ним, полное сопротивление судна определяется как сумма сопротивлений трения  $R_F$ , формы  $R_{VP}$ , волнового  $R_W$ , струйного  $R_{SP}$ , выступающих частей  $R_{AP}$  и воздуха  $R_{AA}$

$$R_T = R_F + R_W + R_{SP} + R_{AP} + R_{AA}.$$

Поскольку сопротивление формы удобно искать через форм-фактор, являющийся своего рода дополнительной надбавкой к сопротивлению трения, то  $R_F$  катамарана определяется по выражению [9], кН

$$R_F = \sum_{i=1}^n R_{Fi} (1 + k_i),$$

где  $R_{Fi}$ ,  $k_i$  – соответственно сопротивление трения и форм-фактор отдельного корпуса судна;  $n$  – количество корпусов.

Данная формула применима для катамаранов различных типов. В частности, если рассматриваются суда с малой площадью ватерлинии (СМПВ), кроме корпусов необходимо учитывать и количество стоек. Таким образом, с учетом этого можно записать:

для катамаранов обыкновенного типа

$$R_F = 2(R_{FH} + R_A);$$

для катамарана типа СМПВ с одной стойкой на каждом корпусе

$$R_F = 2(R_{FS} + R_{FH} + R_A);$$

для катамарана типа СМПВ с двумя стойками на каждом корпусе

$$R_F = 2(R_{FS} + R_{FH} + R_{FSA} + R_A).$$

Сопротивление трения стойки  $R_{FS}$ , корпуса  $R_{FH}$  и шероховатостей  $R_A$  определяется по формулам

$$R_{FH} = \frac{\rho U^2}{2} F_{FH} C_{FH} A_H; \quad R_{FS} = \frac{\rho U^2}{2} F_{FS} C_{FS} A_S;$$
$$R_A = R_{COR} = \frac{\rho U^2}{2} C_A (A_H + A_S),$$

где  $U$  – скорость судна, м/с;  $F_{FH}$ ,  $F_{FS}$  – форм-фактор корпуса и стойки соответственно;  $C_{FH}$ ,  $C_{FS}$  – коэффициент трения корпуса и стойки соответственно;  $A_H$  – площадь смоченной поверхности одного корпуса;  $A_S$  – площадь смоченной поверхности одной стойки;  $C_A$  – коэффициент сопротивления шероховатостей принимается равным 0,0005 в соответствии с рекомендациями международной конференции опытовых бассейнов, а также данных работ [10, 11].

Площади смоченных поверхностей подводных корпусов  $A_H$  и стоек  $A_S$  определяются с использованием ординат теоретического чертежа, полученных по параметрической 3D модели поверхности.

Коэффициент трения стойки и подводного корпуса вычисляется по формуле

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2},$$

где  $Re$  – число Рейнольдса подводного корпуса или стойки.

Наибольшую трудность вызывает расчет волнового сопротивления. В рассматриваемом алгоритме для определения  $R_W$  применяется теория узкого судна (Mitchell, 1898) (для стоек), тонкого тела (для корпусов) [12-14]. Учет взаимодействия между корпусами и/или стойками проводится на основе теории движения тонкого тела на глубокой воде вдоль плоской вертикальной стенки [14].

В соответствии с этим волновое сопротивление катамарана определяется волновым сопротивлением каждого из корпусов, а также их взаимодействием

$$R_W = \sum_i R_{Wi} + \sum_i \sum_j \Delta R_{Wij},$$

где  $R_{Wi}$  – собственное волновое сопротивление каждого корпуса, при их изолированном движении в жидкости;

$\sum_i \sum_j \Delta R_{Wij}$  – дополнительное волновое сопротивление вследствие волнового взаимодействия между корпусами.

Тогда, для катамарана

$$R_W = 2R_{WH} + R_{Wi},$$

где  $R_{WH}$  – волновое сопротивление одного корпуса, кН;

$R_{WHS}$  – волновое сопротивление вследствие взаимодействия корпусов, кН.

Для СМПВ катамаранного типа с одной стойкой на корпусе

$$R_W = 2(R_{WH} + 2R_{WHS} + R_{WS}),$$

где  $R_{WH}$ ,  $R_{WS}$  – волновое сопротивление подводного корпуса и стойки соответственно, кН;  $R_{WHS}$  – волновое сопротивление вследствие взаимодействия корпуса и стоек, кН.

Для двухстоечного варианта СМПВ

$$R_W = 2[R_{WH} + R_{WSF} + R_{WSA} + 2(R_{WHSF} + R_{WHS A} + R_{WSFA})],$$

где  $R_{WSF}$  – волновое сопротивление носовой стойки, кН;  $R_{WSA}$  – волновое сопротивление кормовой стойки, кН;  $R_{WHSF}$ ,  $R_{WHS A}$ ,  $R_{WSFA}$  – волновое сопротивление от взаимодействия корпуса и носовой стойки, корпуса и кормовой стойки, носовой и кормовой стоек, соответственно, кН.

Полагая корпуса "тонкими" симметричными и заменяя их воздействие на поток воды слоем источников, распределенных по диаметральной плоскости с интенсивностью, определяемой по формуле

$\sigma = \frac{U}{2\pi} \cdot \frac{\partial Y}{\partial x}$ , можно получить следующее выражение для расчета составляющих волнового сопротивления [15]:

$$R_{WI} = 16\pi\rho k_0^2 \int_0^{\pi/2} (I^2 + J^2) \frac{d\theta}{\cos^3 \theta} [1 + \cos(2k_0 b \sec^2 \theta \sin \theta)],$$

где  $I$  и  $J$  вычисляются по формулам

$$I(\theta) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-T}^0 \sigma(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \cos(k_0 x \sec \theta) dx dz,$$

$$J(\theta) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-T}^0 \sigma(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \sin(k_0 x \sec \theta) dx dz,$$

где  $k_0 = \frac{g}{U^2}$  – волновое число;  $2b$  – расстояние между ДП корпусов. При

помощи интегрирования по частям интеграл преобразовывается к интегралам от самой функции, а не ее производной [12]

$$R_W = \frac{4\rho g^4}{\pi U^6} \int_0^{\pi/2} (I^2 + J^2) w^2 \sec^5 \theta d\theta,$$

где

$$J(\theta) = - \int_{-\frac{L-T}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^0 Y(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \cos(k_0 x \sec \theta) dx dz;$$

$$I(\theta) = \int_{-\frac{L-T}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^0 Y(x, z) \exp(k_0 z \sec^2 \theta) \sin(k_0 x \sec \theta) dx dz;$$

$w = 2 \cos(k_0 b \sec^2 \theta \sin \theta)$ ,  $Y(x, z)$  – ординаты теоретического чертежа.

Для преодоления трудностей, связанных с быстрым осциллированием подынтегральной функции использовался алгоритм [12], суть которого состоит в применении метода трапеций для интегрирования по  $z$ , метода Филона – для интегрирования по  $x$  и метода Симпсона для интегрирования по  $\theta$ . Вычисление интеграла проводится в следующем порядке. Интервал интегрирования по  $\theta$   $[0, \pi/2]$  делится на  $N_\theta$  равных участков. Для каждого полученного участка по правилу трапеций сначала вычисляется интеграл (для всех шпангоутов)

$$F(x, \theta) \approx \sum_{j=0}^{N_z} C_j Y(x, z_j) \exp(k_0 z_j \sec^2 \theta) \Delta z,$$

где  $\Delta z$  – расстояние между ватерлиниями, м;

$N_z$  – количество ватерлиний;

$C_j$  – веса, определяемые по формулам:

$$C_0 = (e^K - 1 - K) / K^2; C_{N_z} = (e^{-K} - 1 + K) / K^2;$$

$$C_j = (e^K - e^{-K} - 2) / K^2 \quad \text{– для всех } j \neq 0 \text{ и } N_z; K = k_0 \sec^2 \theta \Delta z.$$

Затем, используя метод Филона, вычисляются интегралы

$$J(\theta) \approx - \sum_{i=1}^{N_x-1} C_i F(x_i, \theta) \cos(k_0 x_i \sec \theta) \Delta x;$$

$$I(\theta) \approx \sum_{i=1}^{N_x-1} C_i F(x_i, \theta) \sin(k_0 x_i \sec \theta) \Delta x.$$

где  $\Delta x$  – расстояние между шпангоутами, м;  $N_x$  – количество шпангоутов;  $C_i$  – веса, определяемые по формулам

$$C_{2i} = (3K + K \cos 2K - 2 \sin 2K) / K^3 \quad \text{– для всех четных } i;$$

$$C_{2i+1} = 4(\sin K - K \cos K) / K^3 \quad \text{– для всех нечетных } i;$$

$$K = k_0 \sec \theta \Delta x.$$

После этого, используя метод Симпсона, проводится интегрирование по  $\theta$ .

Для упрощения расчетов при разработке алгоритма учитывались особенности катамаранов типа СМПВ. В частности было введено допущение о том, что стойки имеют одинаковую по высоте форму ватерлиний (что соответствует большинству построенных СМПВ). В связи с этим для описания формы стойки достаточно знать ординаты на уровне конструктивной ватерлинии. Для повышения точности расчетов, полученные ординаты аппроксимировались с помощью сплайнов. При принятых допущениях вычисление функций  $I$  и  $J$  интеграла волнового сопротивления стойки проводится по формулам

$$J(\theta) = - \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} Y(x) [1 - \exp(-k_0 h_s \sec^2 \theta)] \cos(k_0 x \sec \theta) dx;$$

$$I(\theta) = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} Y(x) [1 - \exp(-k_0 h_s \sec^2 \theta)] \sin(k_0 x \sec \theta) dx.$$

Остальные составляющие полного сопротивления рассчитывались по известным формулам теории корабля. Затем определяется величина буксировочной мощности

$$P_E = R_T U, \text{ кВт.}$$

и мощность главных двигателей

$$P = \frac{P_E}{\eta_s \eta_D} (SM + 1), \text{ кВт,}$$

где  $\eta_s$  – пропульсивный коэффициент, значение которого принимается в зависимости от типа движителя;  $\eta_D$  – КПД передачи мощности от двигателя к движителю [7]: для газотурбинной установки, высоко- и среднеоборотного дизелей  $\eta_D = 0,97$ ; для дизель-электрической и газотурбоэлектрической  $\eta_D = 0,88-0,92$ ;  $SM$  – коэффициент, учитывающий запас мощ-

ности. Для многокорпусных судов, как правило, принимается равным 10-15 %.

Данный алгоритм расчета полного сопротивления был реализован в виде компьютерной программы, с помощью которой выполнены некоторые тестовые расчеты, позволяющие судить о достоверности результатов.

Для этого была проведена серия испытаний модели СМПВ (рис. 1) в опытовом бассейне НУК.



*a*



*б*

*Рис. 1. Фотографии моделей СМПВ:  
а – двухстоечный вариант (тип А);  
б – четырехстоечный вариант (тип В)*

Испытуемая модель СМПВ была выполнена в масштабе 1:40 (рис. 2) и состояла из двух подводных торпедообразных корпусов, соединенных с надводной платформой, расположенными на каждом подводном корпусе одной (тип А) и двумя (тип В) вертикальными стойками. Носовая оконечность подводных корпусов имеет эллиптическую форму, кормовая оконечность – параболическую. Модель выполнена разборной, в процессе испытаний можно изменять горизонтальный клиренс, осадку, а также проводить буксировку одиночного корпуса. Основные геометрические характеристики модели приводятся в табл. 1.

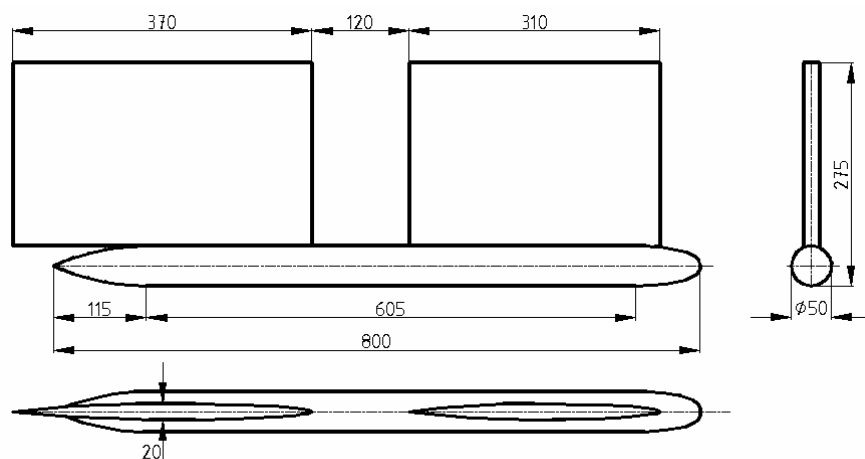


Рис. 2. Геометрические параметры модели СМПВ

Таблица 1

Основные характеристики моделей СМПВ

Характеристика	Значение	
	тип А	тип В
Длина подводного корпуса, м	0,80	
Диаметр подводного корпуса, м	0,05	
Осадка, м	0,075; 0,10	
Горизонтальный клиренс, м	0,25; 0,30; 0,35; 0,40	
Длина носовой стойки, м	0,80	0,31
Длина кормовой стойки, м	–	0,37
Расстояние между стойками, м	–	0,12

Буксировочные испытания модели проводились в диапазоне скоростей от 0,5 до 3,0 м/с, что соответствует числам Фруда по длине от 0,17 до 1,07. Замеры показаний, запись и обработка результатов осуществлялись на компьютере с помощью программного обеспечения, созданного



на кафедре теории и проектирования судов НУК для проведения буксировочных испытаний в опытовом бассейне. Эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе испытывалась модель с двумя стойками на каждом подводном корпусе. После завершения первого этапа пространство между стойками было зашито и были проведены испытания варианта СМПВ с одной стойкой на каждом подводном корпусе. Также в процессе модельных испытаний варьировались значения осадки и горизонтального клиренса.

Обработка результатов испытаний проводилась традиционным способом с учетом особенностей двух- и четырехстоечных СМПВ, путем пересчета на натурное судно длиной 32 м. Схема пересчета следующая.

Сначала определяется остаточное сопротивление модели как разность полного сопротивления, полученного в результате эксперимента и сопротивления трения модели

$$R_{RM} = R_{T\_M} - 2 \left( R_{FH\_M} + \sum_{i=1}^n R_{FSi\_M} \right),$$

где  $R_{RM}$  – остаточное сопротивление всей модели;  $R_{T\_M}$  – полное сопротивление, полученное в результате эксперимента;  $n$  – количество стоек на каждом корпусе.

Учитывая сложную конструкцию СМПВ катамаранного типа, в данной работе расчет сопротивления трения производился отдельно для подводных корпусов и стоек.

Сопротивление трения подводного корпуса модели находится по формуле

$$R_{FH\_M} = C_{FH\_M} \frac{\rho_M U_M^2}{2} A_{H\_M},$$

где  $C_{FH\_M} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re}_{H\_M})^{2,58}}$  – коэффициент сопротивления трения под-

водного корпуса модели;  $U_M$  – скорость модели, м/с;  $\rho_M$  – плотность воды в бассейне;  $A_{H\_M}$  – площадь смоченной поверхности подвод-

ных корпусов модели, м<sup>2</sup>;  $\text{Re}_{H\_M} = \frac{U_M L_{H\_M}}{\nu_M}$  – число Рейнольдса

подводного корпуса модели;  $L_{H\_M}$  – длина подводного корпуса модели;  $\nu_M$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости в бассейне.

Сопrotивление трения  $i$ -й стойки модели рассчитывается по формуле

$$R_{FSi\_M} = C_{FSi\_M} \frac{\rho_M U_M^2}{2} A_{Si\_M},$$

где  $C_{Fi\_M} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re}_{Si\_M})^{2,58}}$  – коэффициент сопротивления трения  $i$ -й

стойки модели;  $A_{Si}$  – площадь смоченной поверхности  $i$ -й стойки моде-

ли, м<sup>2</sup>;  $\text{Re}_{Si\_M} = \frac{U_M L_{Si}}{\nu_M}$  – число Рейнольдса  $i$ -й стойки модели;  $L_{Si}$  –

длина  $i$ -й стойки модели.

Полученная величина остаточного сопротивления преобразуется в безразмерный коэффициент остаточного сопротивления по формуле

$$C_{R\_M} = \frac{R_{R\_M}}{\frac{\rho_M U_M^2}{2} A_M},$$

где  $A_M$  – площадь смоченной поверхности всей модели.

Заметим, что экспериментальная зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда полагается одинаково справедливой для модели и натуре.

Для получения зависимости полного сопротивления натурального судна от его скорости необходимо выполнить пересчет с учетом сопротивления трения, вычисленного в соответствии с числами Рейнольдса, характеризующими режим течения в пограничном слое судна по следующей методике.

Рассчитывается коэффициент сопротивления трения подводного корпуса натурального судна по известной формуле Прандля-Шлихтинга

$$C_{FH\_Ship} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re}_{H\_Ship})^{2,58}},$$

где  $\text{Re}_{H\_Ship} = \frac{U_{Ship} L_{H\_Ship}}{\nu_{Ship}}$  – число Рейнольдса подводного корпуса

натурного судна;

$U_{Ship}$  – скорость натурального судна, м/с;

$L_{H\_Ship}$  – длина подводного корпуса натурального судна, м;

$\nu_{Ship}$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Определяется коэффициент сопротивления трения стоек натурального судна

$$C_{FSi\_Ship} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re}_{Si\_Ship})^{2,58}},$$

где  $\text{Re}_{Si\_Ship} = \frac{U_{Ship} L_{Si\_Ship}}{\nu_{Ship}}$  – число Рейнольдса  $i$ -й стойки натурального судна;

$V_H$  – скорость натурального судна, м/с;

$L_{Si\_Ship}$  – длина  $i$ -й стойки натурального судна, м.

Коэффициент сопротивления трения всего натурального судна

$$C_{F\_Ship} = C_{FH\_Ship} + C_{FSi\_Ship}.$$

Коэффициент полного сопротивления натурального судна

$$C_{T\_Ship} = C_{F\_Ship} + C_{R\_M} + C_A,$$

где  $C_A = 0,0005$  – корреляционная надбавка на шероховатость.

Затем рассчитывается значение полного сопротивления натурального судна

$$R_{T\_Ship} = C_{T\_Ship} \frac{\rho_{Ship} U_{Ship}^2}{2} A_{Ship},$$

где  $A_{Ship}$  – площадь смоченной поверхности натурального судна.

По описанной методике был выполнен пересчет буксировочного сопротивления с модели на натурное судно двухстоечного (табл. 2) и четырехстоечного вариантов СМПВ.

Также по результатам испытаний и данным теоретического расчета построены графики зависимости буксировочного сопротивления от числа Фруда для двухстоечного (рис. 3, а) и четырехстоечного (рис. 3, б) СМПВ.

Сравнительный анализ данных теоретического расчета и результатов модельных испытаний подтвердили адекватность и достоверность разработанного алгоритма. Средняя квадратическая погрешность не превышает 7,0 % для двухстоечного варианта и 6,5 % для тандемных стоек.

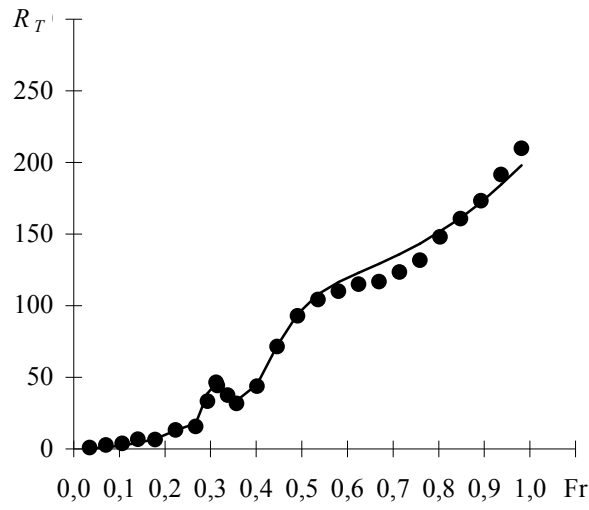
Таблиця 2

Результати пересчета с модели на натурное судно

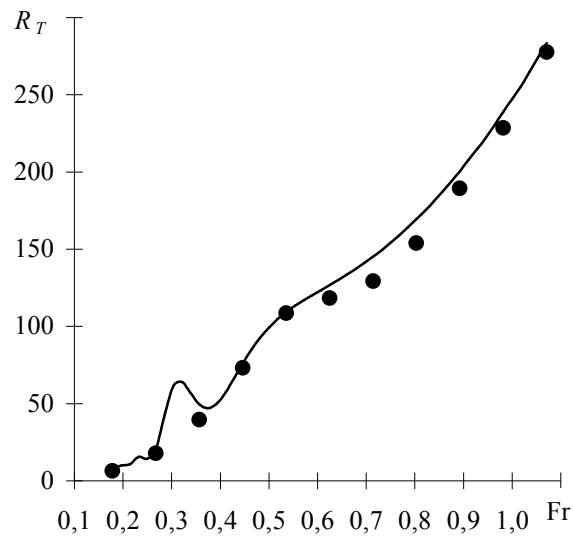
$U_M, \text{ м/с}$	$F_{TM}$	$R_{TM, H}$	$Re_{H, M} 10^{-6}$	$Res, M 10^{-6}$	$C_{FH, M} 10^3$	$C_{FS, M} 10^3$	$R_{FH, M, H}$	$R_{SH, M, H}$	$R_{AA, M, H}$	$R_{RR, M, H}$	$CR, M 10^3$
0,088	0,088	7,363	0,004	0,004	0,002	0,000	0,009				13,110
0,177	0,177	6,319	0,012	0,012	0,005	0,001	0,023				8,099
0,266	0,266	5,799	0,026	0,026	0,011	0,001	0,023				3,598
0,352	0,352	5,475	0,042	0,042	0,019	0,003	0,042				3,747
0,446	0,446	5,222	0,065	0,065	0,029	0,004	0,005				0,285
0,558	0,558	4,998	0,097	0,097	0,043	0,006	0,057				2,048
0,669	0,669	4,825	0,135	0,135	0,060	0,009	0,034				0,836
0,732	0,732	4,742	0,159	0,159	0,070	0,011	0,267				5,530
0,780	0,780	4,685	0,178	0,178	0,079	0,013	0,435				7,936
0,787	0,787	4,677	0,181	0,181	0,080	0,013	0,398				7,145
0,844	0,844	4,616	0,205	0,205	0,091	0,015	0,257				4,009
0,892	0,892	4,568	0,227	0,227	0,100	0,017	0,134				1,868
1,003	1,003	4,468	0,281	0,281	0,124	0,021	0,229				2,524
1,115	1,115	4,381	0,340	0,340	0,150	0,026	0,553				4,948
1,226	1,226	4,305	0,404	0,404	0,179	0,031	0,775				5,725
1,338	1,338	4,237	0,473	0,473	0,209	0,037	0,834				5,179
1,449	1,449	4,175	0,547	0,547	0,242	0,044	0,800				4,234
1,561	1,561	4,119	0,626	0,626	0,277	0,051	0,742				3,385
1,672	1,672	4,068	0,710	0,710	0,314	0,058	0,630				2,505
1,784	1,784	4,022	0,798	0,798	0,353	0,066	0,583				2,035
1,895	1,895	3,978	0,891	0,891	0,394	0,075	0,551				1,703
2,007	2,007	3,938	0,989	0,989	0,438	0,084	0,632				1,744
2,118	2,118	3,900	1,092	1,092	0,483	0,093	0,650				1,611
2,230	2,230	3,865	1,199	1,199	0,530	0,103	0,655				1,465
2,341	2,341	3,832	1,310	1,310	0,580	0,114	0,745				1,510
2,750	0,982	5,060	2,453	2,453	3,801	3,801	1,426	0,631	0,125	0,820	1,515
2,875	1,026	5,551	2,564	2,564	3,771	3,771	1,547	0,684	0,136	0,951	1,608
3,000	1,071	6,080	2,676	2,676	3,743	3,743	1,672	0,740	0,149	1,108	1,720

Продолжение табл. 2

$U_M, \text{ м/с}$	$U_S, \text{ м/с}$	$Re_H, s \cdot 10^{-8}$	$Re_S, s \cdot 10^{-8}$	$C_{FH}, s \cdot 10^5$	$C_{FS}, s \cdot 10^5$	$R_{FH}, s, \text{ кН}$	$R_{FS}, s, \text{ кН}$	$R_4, s, \text{ кН}$	$R_R, s, \text{ кН}$	$R_T, s, \text{ кН}$
0,099	0,625	0,168	0,168	2,746	2,746	0,088	0,039	0,023	0,603	0,902
0,198	1,252	0,337	0,337	2,454	2,454	0,314	0,139	0,092	1,496	2,588
0,298	1,885	0,508	0,508	2,304	2,304	0,668	0,296	0,209	1,506	3,853
0,395	2,498	0,673	0,673	2,208	2,208	1,126	0,498	0,368	2,755	6,738
0,500	3,162	0,852	0,852	2,133	2,133	1,742	0,771	0,589	0,335	6,538
0,625	3,953	1,064	1,064	2,065	2,065	2,635	1,166	0,920	3,770	13,212
0,750	4,743	1,277	1,277	2,011	2,011	3,696	1,635	1,325	2,217	15,531
0,821	5,192	1,398	1,398	1,986	1,986	4,373	1,935	1,588	17,564	33,356
0,875	5,534	1,490	1,490	1,968	1,968	4,923	2,178	1,804	28,633	46,443
0,882	5,578	1,502	1,502	1,966	1,966	4,996	2,210	1,833	26,192	44,272
0,946	5,983	1,611	1,611	1,947	1,947	5,691	2,518	2,109	16,909	37,545
1,000	6,325	1,703	1,703	1,932	1,932	6,311	2,792	2,356	8,803	31,720
1,125	7,115	1,916	1,916	1,900	1,900	7,857	3,476	2,982	15,055	43,686
1,250	7,906	2,129	2,129	1,873	1,873	9,561	4,230	3,682	36,433	71,377
1,375	8,696	2,342	2,342	1,849	1,849	11,418	5,052	4,455	51,005	92,855
1,500	9,487	2,555	2,555	1,827	1,827	13,429	5,941	5,302	54,911	104,255
1,625	10,277	2,768	2,768	1,807	1,807	15,591	6,898	6,222	52,683	110,104
1,750	11,068	2,980	2,980	1,789	1,789	17,902	7,921	7,216	48,853	114,931
1,875	11,859	3,193	3,193	1,773	1,773	20,362	9,009	8,284	41,496	116,805
2,000	12,649	3,406	3,406	1,758	1,758	22,969	10,162	9,425	38,367	123,480
2,125	13,440	3,619	3,619	1,744	1,744	25,722	11,380	10,640	36,249	131,734
2,250	14,230	3,832	3,832	1,730	1,730	28,620	12,663	11,929	41,606	148,029
2,375	15,021	4,045	4,045	1,718	1,718	31,663	14,009	13,291	42,824	160,748
2,500	15,811	4,258	4,258	1,707	1,707	34,848	15,418	14,727	43,141	173,125
2,625	16,602	4,471	4,471	1,696	1,696	38,175	16,890	16,236	49,017	191,620
2,750	17,393	4,684	4,684	1,686	1,686	41,644	18,425	17,819	54,005	209,781
2,875	18,183	4,897	4,897	1,676	1,676	45,254	20,022	19,476	62,629	232,132
3,000	18,974	5,109	5,109	1,667	1,667	49,003	21,681	21,206	72,958	256,739



a)



б)

Рис. 3. График буксировочного сопротивления:  
а) одностоечного СМПВ; б) двухстоечного СМПВ  
• – эксперимент; — – расчет по разработанной программе

**Вывод.** Разработанный алгоритм расчета полного сопротивления катамаранов и созданная на его основе компьютерная программа могут использоваться при концептуальном проектировании для решения задач определения ходкости, а также оптимизации формы корпуса и выбора оптимальных проектных характеристик.

Результаты, полученные с помощью теоретического расчета по разработанной авторами программе, достаточно точно совпадают с данными испытаний моделей малого размера.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Subramanian, V.A. Resistance optimization of hard chine high speed catamarans / V.A. Subramanian, G. Dhinesh, J.M. Deepti // *The Journal of Ocean Technology*. – 2006. – Vol.1.– № 1. – P. 69-83.
2. Sahoo, P.K. A Practical evaluation of resistance of high-speed catamaran hull forms – Part I / P.K. Sahoo, M. Salas // *Ships and Offshore Structures*. – 2007. – Vol. 2. – № 4. – P. 307-324.
3. Michell, J.H. The Wave-Resistance of a Ship / J.H. Michell // *Philosophical Magazine*. – 1898. – Ser. 5. – Vol. 45. – P. 106-123.
4. Tuck E.O. Wave Resistance of Thin Ships and Catamarans: Report T8701 / E.O. Tuck // *Department of Applied Mathematics. The University of Adelaide*. – Adelaide, Australia, 1987. – 21 p.
5. Molland A.F. Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draft Ratio / A.F. Molland, J.F. Wellicome, P.R. Couser // *Ship Science Report*. – № 71. University of Southampton, UK. – 1994. – 84 p.
6. Yoon J.D. Development of a Computational Tool to Estimate the Resistance of SWATH ships / J.-D. Yoon, D.-D. Ha, H.-H. Chun // *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*. – 1988. – Vol. 12. – № 3. – P. 39-52.
7. Bertram V. SWATH Ship Design Formulae Based on Artificial Neural Nets / V. Bertram, E. Mesbahi // *Journal of Ship Technology*. – 2007. – Vol. 3. – № 1. – P. 1-9.
8. Salvesen N. Hydro-Numeric Design of SWATH Ships / N. Salvesen, C.H. Kerczek, C. Scragg // *Trans. SNAME*. – Vol. 93. – 1985. – P. 325-346.
9. Справочник по теории корабля: В 3-х т. Т.1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
10. Numata E. Predicting Hydrodynamic Behavior of Small-Waterplane-Area Twin-Hull Ships / E. Numata // *Marine Technology*. – 1981. – Vol. 18. – № 1. – P. 69-75.

11. Mulligan R. D. *Asset-Swath – A Computer based model for SWATH ships* / R.D. Mulligan, J.N. Edkins // *RINA Int. Conf. on SWATH Ships and Advanced Multi Hulled Vessels, 17–19 April 1985.* – London, 1985.
12. *Wave Resistance of Thin Ships and Catamarans: Report T8701* / Department of Applied Mathematics, The University of Adelaide; E.O. Tuck. – Adelaide, Australia, 1987. – 21 p.
13. Tuck E.O. *Some Methods for Flows Past Blunt Slender Bodies* / E.O. Tuck // *Journal of Fluid Mechanics.* – 1964. – № 18. – P. 619-635.
14. Lunde J.K. *On the Linearized Theory of Wave Resistance for Displacement Ships in Steady and Accelerated Motion* / J.K. Lunde // *SNAME Transactions.* – 1951. – Vol. 59. – P. 25-85.
15. Lin W.C. *The Still-Water Resistance and Powering Characteristics of Small Waterplane-Area Twin-Hulled (SWATH) Ships* / W.C. Lin, W.G.Jr. Day // *AIAA/SNAME: Advanced Marine Vehicles Conf., 25-27 February 1974.* – San Diego, 1974. – 15 p.

*Стаття надійшла до редакції 21 вересня 2012 р.*