

УДК 656.61.08

DOI: 10.37890/jwt.vi81.548

## **Идентификация углов атаки гидродинамического якоря в сопоставлении численного и физического экспериментов**

**В.И. Сичкарев**

*ORCID: 0000-0002-6618-2404*

**О.В. Рослякова**

*ORCID: 0000-0003-2265-7815*

**А.Н. Хохряков**

*Сибирский государственный университет водного транспорта, г. Новосибирск, Россия*

**Аннотация:** Статья посвящена актуальной задаче повышения эффективности спасательных операций по охране человеческой жизни на море с помощью максимального снижения дрейфа спасательных средств при помощи гидродинамического якоря. В работе дано определение гидродинамических характеристик гидродинамического якоря двумя разными методами: численного гидродинамического моделирования и физического эксперимента в прямом опытовом бассейне путём протяжки полномасштабного гидродинамического якоря с фиксированными скоростями. Проведена идентификация углов атаки гидродинамического якоря в сопоставлении численного и физического экспериментов и показаны результаты расчетов углов рабочего хода, углы установки гидродинамического якоря для углов атаки крыла, а также определены углы атаки для холостого хода.

**Ключевые слова:** численное моделирование, гидродинамический якорь, угол атаки, физическая модель, холостой ход.

## **Identification of the angles of attack of a hydrodynamic anchor in comparison of numerical and physical experiments**

**Viktor I. Sichkarev**

*ORCID: 0000-0002-6618-2404*

**Oksana V. Roslyakova**

*ORCID: 0000-0003-2265-7815*

**Aleksandr N. Khokhryakov**

*Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia*

**Abstract:** The article is devoted to the urgent task of increasing the effectiveness of rescue operations for human life protection at sea by maximizing the drift decrease of rescue facilities by means of a hydrodynamic anchor. The paper presents hydrodynamic characteristics definition of a hydrodynamic anchor by two different methods: numerical hydrodynamic modeling and physical experiment in a direct experimental pool by pulling a full-scale hydrodynamic anchor at fixed speeds. Identification of hydrodynamic anchor attack angles in numerical and physical experiments comparison has been carried out, and the results of calculations of the working stroke angles have been shown. The hydrodynamic anchor installation angles for wing attack angles, as well as idling attack angles have been determined.

**Keywords:** numerical modeling, hydrodynamic anchor, angle of attack, physical model, idling.

### **Введение**

Разработка гидродинамического якоря (ГДЯ) ведется не один год и материалы исследований представлены в опубликованных работах авторов [1-9]. В них представлены характеристики различных конструктивных особенностей, в том числе и результаты по проведению натурного сопоставительного эксперимента по дрейфу спасательных плотов с различными ГДЯ на Новосибирском водохранилище. Для целей проектирования ГДЯ [1 – 3] с заданными эксплуатационными свойствами важно знать его гидродинамические характеристики. Определение гидродинамических характеристик ГДЯ было проведено в 2020 – 2022 годах двумя разными методами: численного гидродинамического моделирования и физического эксперимента в прямом опытовом бассейне путём протяжки полномасштабного ГДЯ с фиксированными скоростями и с предустановленными углами атаки.

### **Материалы и методы**

Численное моделирование внешней гидродинамики ГДЯ и подводной части плота, а также внешней аэродинамики надводной части плота выполнялось на математических моделях, созданных при помощи основных уравнений вычислительной гидродинамики, подхода к описанию турбулентности в жидкости и воздухе, а также конечно-разностных схем и итерационного метода решения замкнутой системы уравнений [10-15]

В численном моделировании геометрическим аналогом ГДЯ взят выгнутый в виде профиля крыловидной формы тонкий лист с плановыми размерами, соответствующими размерам крыльев физической модели ГДЯ. Физическая модель содержала три пластинчатых кия, поставленных на ребро параллельно друг другу, между которыми на перпендикулярных киям штангах установлены выгнутые из плоского листа профили крыльев, рис. 1.



Рис.1. Физический полноразмерный образец ГДЯ

Численный эксперимент проведён с углами атаки крыла от  $0^\circ$  до  $337,5^\circ$  с шагом  $22,5^\circ$ , исчисляемыми относительно хорды крыла, рис. 2. Физический эксперимент проведён для режимов холостого и рабочего хода ГДЯ с углами атаки крыльев от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  (рабочий ход) и от  $225^\circ$  до  $270^\circ$  (холостой ход). В этом эксперименте углы атаки исчисляются относительно основной плоскости ГДЯ, на которую опирается лежащий ГДЯ. При этом положение крыльев на рабочем ходу опущено до основной

плоскости и соответствует рис. 1 и 3, а на холостом ходу крылья разворачиваются потоком воды вокруг своих штанг в носике крыла на угол  $\alpha_v$ , рис. 3, 4, хотя исчисление угла атаки ГДЯ продолжается относительно основной плоскости.

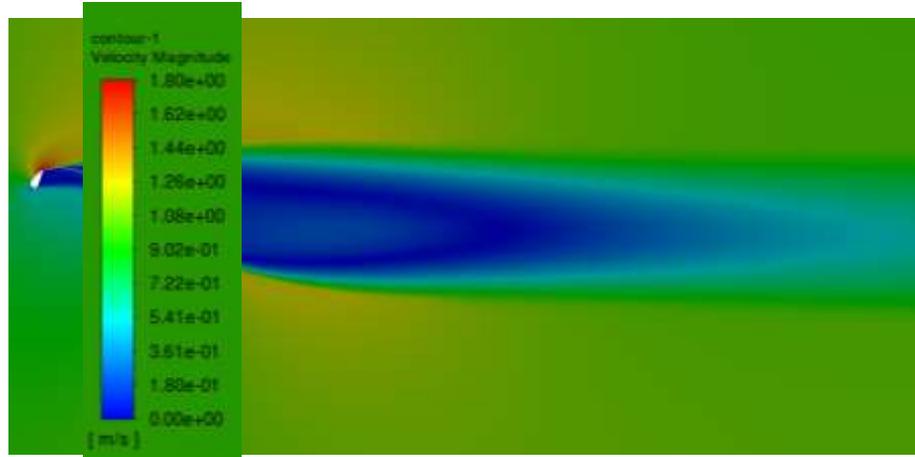


Рис.2. Визуализация скоростей потока в численном эксперименте



Рис.3. Протяжка ГДЯ в бассейне на рабочем ходу: видно рабочее расположение крыльев с опорой на основную плоскость



Рис.4. Протяжка ГДЯ в бассейне на холостом ходу: крылья развёрнуты от основной плоскости

Таким образом, обнаруживается несоответствие порядка исчисления значений углов атаки крыльев в двух экспериментах в режиме холостого хода, что приводит к различию результатов.

Для идентификации и сравнения результатов экспериментов необходимо определиться с тем, что же нужно задавать в проектировочном расчёте ГДЯ.

В основе математической модели плот-трос-ГДЯ лежит угловое положение троса относительно плота, определяемое гидродинамическими силами ГДЯ, а положение ГДЯ относительно троса задаётся постоянным установочным углом  $\gamma_0$ . Следовательно, определение пространственного положения ГДЯ определяет и воздействие системы ГДЯ-трос на плот как объект управления. Таким образом, с позиций объекта управления важно знать положение ГДЯ, а расположение крыльев является внутренним свойством ГДЯ, хотя и важным для понимания и определения его гидродинамических характеристик.

### Результаты

Для определения связи положения ГДЯ с фактическими углами атаки крыльев рассмотрим схему углов в ГДЯ относительно троса (вертикальная линия, вдоль которой направлена скорость потока  $V_{ж}$ : на рабочем ходу сверху вниз; на холостом ходу снизу вверх), рис. 5.

На рабочем ходу угол атаки крыла

$$\alpha_{р.х.} = \varepsilon - \kappa; \varepsilon = 90^\circ . \quad (1)$$

На холостом ходу отклонение крыла на угол  $\alpha_в$  увеличивает угол атаки крыла

$$\alpha_{х.х.} = \varepsilon - \kappa + \alpha_в; \varepsilon = 270^\circ . \quad (2)$$

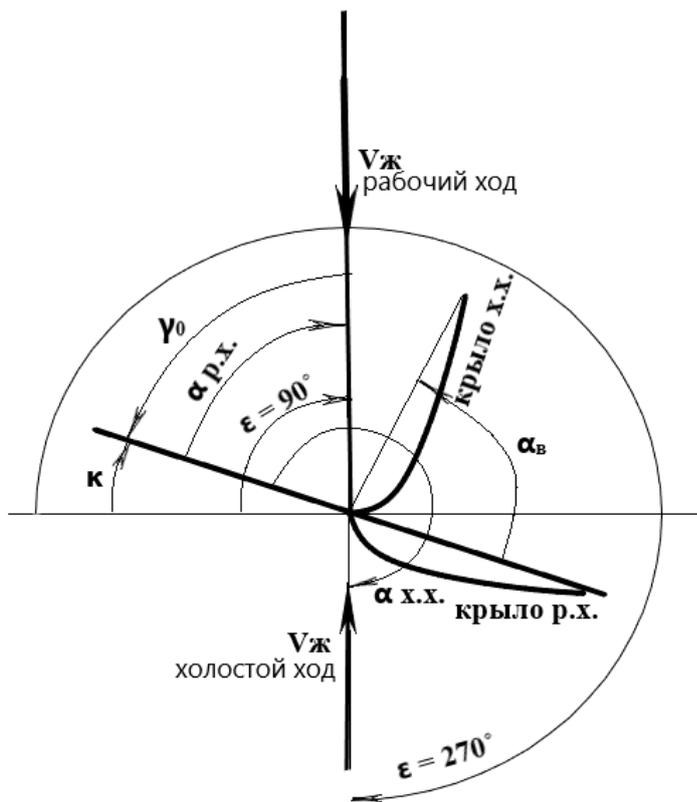


Рис.5. Схема углов ГДЯ на рабочем и холостом ходу относительно вертикальной линии троса и нормальной к ней горизонтальной линии

Поэтому для рабочего хода углы установки ГДЯ соответствуют углам атаки крыла, а для холостого хода углы атаки надо пересчитывать по (2). Полагая для физической модели  $\alpha_{в} = 70^\circ$ ;  $\epsilon = 270^\circ$ , а угол установки ГДЯ к направлению протяжки  $\kappa = 0 - 45^\circ$ , углы атаки ГДЯ и крыла представим в таблице 1. Иные углы атаки в рабочем режиме ГДЯ маловероятны, и, по-видимому, существуют только в переходном режиме.

Таблица 1

Значения углов атаки для ГДЯ и для крыла на холостом ходу при  $\epsilon = 270^\circ$

$\kappa^\circ$	Рабочий ход: $\alpha^\circ \text{ ГДЯ} = \alpha^\circ \text{ крыла}$	Холостой ход	
		$\alpha^\circ \text{ ГДЯ}$ физического эксперимента	$\alpha^\circ \text{ крыла}$ численного эксперимента
45	45	225	295
40	50	230	300
30	60	240	310
20	70	250	320
10	80	260	330
0	90	270	340

Имеющиеся в [2] данные в области нужных углов атаки просчитаны с шагом  $\alpha = 22,5^\circ$  и пересчитаны в коэффициенты гидродинамических сил по принятым в расчёте размерам крыла и внешним условиям, табл.2.

Таблица 2

Условия, принятые при компьютерном моделировании гидродинамики ГДЯ

The screenshot shows a software window titled "Reference Values" with a help icon (question mark) in the top right corner. Below the title is a "Compute from" dropdown menu. The main area contains a list of input fields for reference values:

Property	Value
Area [m <sup>2</sup> ]	0.4925357
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	998.2
Depth [m]	1
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	1
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	1
Viscosity [kg/(m s)]	0.001003
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

At the bottom of the window is a "Reference Zone" dropdown menu.

Коэффициенты гидродинамических сил рассчитаны по (3)

$$k_x = \frac{2 F_x}{\rho S V^2}; k_y = \frac{2 F_y}{\rho S V^2} \quad (3)$$

и представлены в таблицах 3, 4.

В силу слабой зависимости значений коэффициентов гидродинамических сил от скорости потока  $V$  представляется возможным осреднить значения коэффициентов по всем скоростям; средние по каждому углу атаки значения коэффициентов представлены в колонках «ср.  $k_x$ »; «ср.  $k_y$ ».

В диапазоне углов атаки рабочего и холостого хода графики зависимости коэффициентов гидродинамических сил от углов атаки ГДЯ и крыла представлены на рис. 6, 7. Коэффициент  $k_x$  и  $k_y$  аппроксимируются квадратичным полиномом с углами атаки  $\alpha$ , исчисляемыми по положению ГДЯ. Данные о коэффициентах аппроксимации представлены в табл. 5, 6.

Таблица 3

Коэффициенты  $k_x$  продольной гидродинамической силы  $F_x$  в зависимости от угла атаки  $\alpha^\circ$  крыла и скорости потока  $V$

угол $\alpha$	1	0,75	0,5	0,25	0,1	ср. $k_x$
0	0,019685	0,020339	0,021475	0,024737	0,036811	0,024609
22,5	0,175646	0,169615	0,20112	0,205024	0,206852	0,191651
45	0,543596	0,544234	0,545987	0,546441	0,544722	0,544996
67,5	0,981681	0,981258	0,981373	0,98225	0,979278	0,981168
90	1,221022	1,221184	1,221546	1,221743	1,218952	1,220889
112,5	0,992328	0,992513	0,992531	0,991794	0,989672	0,991768
135	0,632413	0,63241	0,632227	0,631018	0,629802	0,631574
157,5	0,263389	0,262562	0,262257	0,260717	0,257722	0,261329
180	0,035167	0,036609	0,038319	0,041401	0,045232	0,039346
202,5	0,125933	0,127457	0,126146	0,126665	0,131667	0,127574
225	0,149625	0,150987	0,149932	0,149955	0,150698	0,150239
247,5	0,404709	0,405265	0,405544	0,406179	0,413514	0,407042
250	0,65027	0,655161	0,683135	0,67655	0,683073	0,669638
260	0,659219	0,666168	0,676236	0,698834	0,740749	0,688241
270	0,739725	0,741352	0,744863	0,753085	0,721787	0,740163
280	0,706164	0,706031	0,707776	0,716683	0,754479	0,718227
290	0,637252	0,636604	0,635929	0,63596	0,640049	0,637159
292,5	0,709487	0,711114	0,713905	0,721549	0,729596	0,71713
315	0,411224	0,411476	0,411378	0,410853	0,417771	0,41254
337,5	0,12998	0,130353	0,130622	0,131825	0,134612	0,131478
360	0,019685	0,020339	0,021475	0,024737	0,036811	0,024609

Таблица 4

Коэффициенты  $k_y$  поперечной гидродинамической силы  $F_y$  в зависимости от угла атаки  $\alpha^\circ$  крыла и скорости потока  $V$

угол $\alpha$	1	0,75	0,5	0,25	0,1	ср. $k_y$
0	0,233019	0,227748	0,214555	0,175245	0,0187	0,212642
22,5	0,572513	0,593881	0,525206	0,513228	0,510096	0,542985
45	0,627839	0,628195	0,6286	0,625909	0,625096	0,627128
67,5	0,44665	0,446299	0,446292	0,446695	0,444561	0,446099
90	0,010333	0,010359	0,010439	0,010562	0,010223	0,010383
112,5	-0,41679	-0,4167	-0,41656	-0,4161	-0,41507	-0,41624
135	-0,6423	-0,64213	-0,64177	-0,64039	-0,63901	-0,64112
157,5	-0,64193	-0,63812	-0,6374	-0,61011	-0,62679	-0,63087
180	-0,11681	-0,09943	-0,04955	0,01821	0,108306	-0,02786
202,5	-0,13627	-0,13922	-0,13377	-0,12872	-0,1292	-0,13344
225	-0,17185	-0,17439	-0,17066	-0,16738	-0,16615	-0,17009
247,5	-0,40161	-0,40175	-0,40129	-0,39743	-0,38749	-0,39791
250	0,037034	0,040616	0,065414	0,057737	0,058687	0,051898
260	-0,12773	-0,12304	-0,11513	-0,09753	-0,06797	-0,10628
270	-0,19554	-0,19435	-0,19174	-0,18446	-0,197	-0,19262
280	-0,3156	-0,31547	-0,31446	-0,30746	-0,27696	-0,30599
290	-0,40122	-0,40169	-0,40199	-0,40059	-0,39526	-0,40015
292,5	-0,40407	-0,40332	-0,40204	-0,39849	-0,39757	-0,4011
315	-0,3811	-0,38096	-0,38026	-0,37815	-0,38229	-0,38055
337,5	-0,13075	-0,13061	-0,12932	-0,12853	-0,12842	-0,12953
360	0,233019	0,227748	0,214555	0,175245	0,0187	0,213853

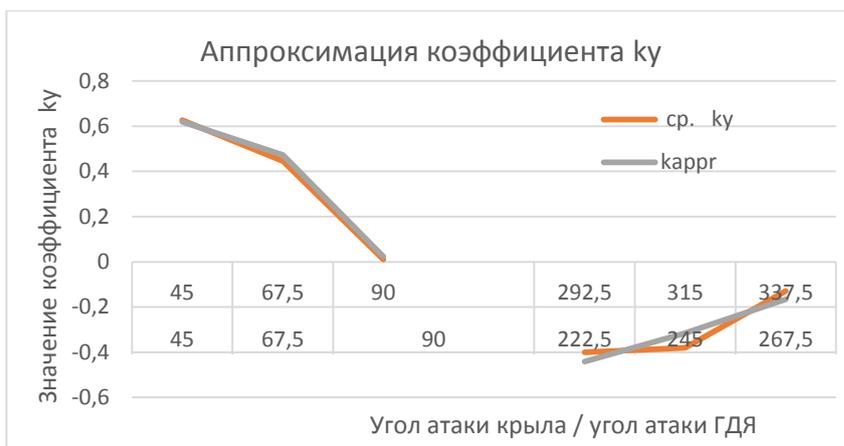


Рис.6. Значение коэффициента k\_x в режиме рабочего и холостого хода

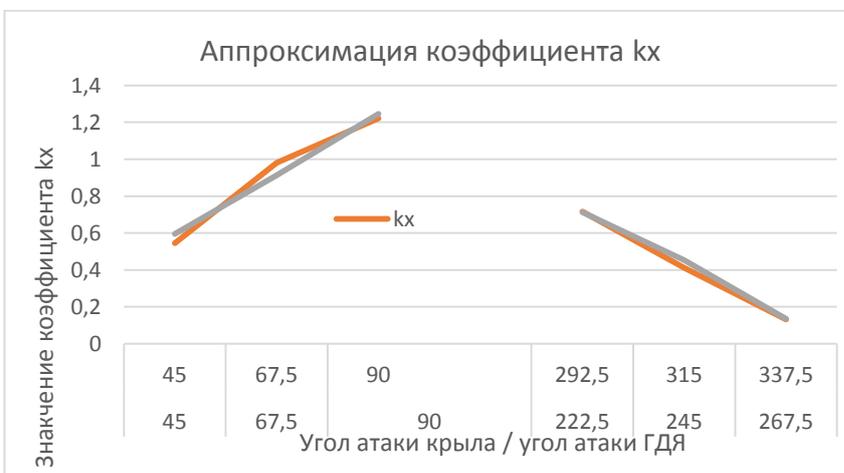


Рис.7. Значение коэффициента k\_y в режиме рабочего и холостого хода

Таблица 5

Коэффициенты аппроксимации коэффициента k\_x гидродинамических сил ГДЯ по результатам численного эксперимента

$$k_x = a \cdot \alpha^2 + b \cdot \alpha + c$$

$\alpha$ крыла	$\alpha$ ГДЯ	$k_x$	$k_{appr}$	a	b	c
45	45	0,544996	0,595278			
67,5	67,5	0,981168	0,914299	1,27E-05	0,01275	-0,00419
90	90	1,220889	1,24618			
292,5	222,5	0,71713	0,685233			
315	245	0,41254	0,41071	-6E-05	0,016553	0,000119
337,5	267,5	0,131478	0,089613			

Таблица 6

**Коэффициенты аппроксимации коэффициента  $k_y$  гидродинамических сил ГДЯ по результатам численного эксперимента**  
 $k_y = a \cdot \alpha^2 + b \cdot \alpha + c$

	$\alpha$	$k_y$	$k_{app}$	a	b	c
	45	45	0,627128	0,619463		
	67,5	67,5	0,446099	0,473056	-0,0003	0,027243
	90	90	0,010383	0,022898		
	292,5	222,5	-0,4011	-0,44135		
	315	245	-0,38055	-0,31514	3,04E-05	-0,00874
	337,5	267,5	-0,12953	-0,16604		

Знак коэффициентов гидродинамических сил определяется положительным направлением координатных осей, принятом при гидродинамическом расчёте. Положительное направление оси X совпадает с направлением потока воды. Положительное направление оси Y – в сторону выпуклости крыла, рис. 10. Согласно данным табл. 3, при больших углах атаки крыла сила  $F_y$  становится отрицательной, т.е. направлена в сторону вогнутости крылового профиля. Знаки продольной  $F_x$  и поперечной  $F_y$  гидродинамических сил также могут быть учтены соответствующим направлением их векторов при составлении уравнений равновесия системы плот – трос – гидродинамический якорь раздельно для холостого и рабочего хода.

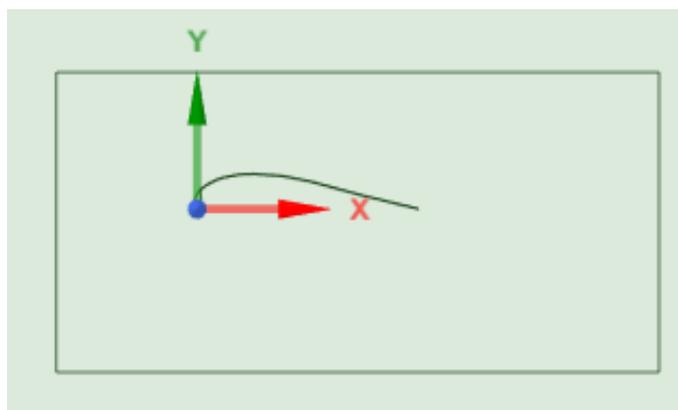


Рис.8. Положительное направление сил  $F_x$  и  $F_y$ , принятое в расчётах по гидродинамике крыла

Таким образом, представленный вариант аппроксимации коэффициентов гидродинамических сил в соответствующих диапазонах углов атаки ГДЯ позволяет разрабатывать проекторочный расчёт ГДЯ с опорой на численный эксперимент определения его гидродинамических сил.

В то же время необходимо представлять, что гидродинамика ГДЯ в действительности полностью нестационарна в течение всего периода колебания с частотой  $\omega$  и описание её с помощью коэффициентов гидродинамических сил, полученных в предположении постоянства скорости потока и его угла атаки - всего лишь некоторое начальное приближение к искомому результату.

**Список литературы**

1. Гидродинамический якорь. Патент на изобретение № 2751044 от 29 сентября 2020 г. /В.И. Сичкарев, А.С. Черенович, В.В. Кузьмин. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46317307>
2. Сичкарев В.И. Компьютерное моделирование работы крыла гидродинамического якоря / В.И. Сичкарев, А.Н. Хохряков, Ю.С. Покалюхин, А.В. Бабенко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, № 1, 2022, с. 20 – 28.
3. Гидродинамика крыльцевого гидродинамического якоря в физическом эксперименте в прямом опытовом бассейне / В.И. Сичкарев, С.В. Титов, В.В. Коновалов, Б.З. Кузнецов, И.В. Розов, Д.Ю. Рыбников, А.Н. Хохряков // Транспортное дело России, № 6, 2023. – С. 282 – 286.
4. Sichkarev V preliminary studies of the life-saving vehicle positioning stabilizer / Sichkarev V., Kuzmin V., Cherenovich A., Leschenko A. / В сборнике: International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Switzerland, 2022. С. 1168-1175. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48421527>
5. Сичкарев В.И. Аппроксимация экспериментальных коэффициентов гидродинамических сил крыльцевого гидродинамического якоря /В.И. Сичкарев, С.В. Титов, В.В. Коновалов, Б.З. Кузнецов, И.В. Розов, Д.Ю. Рыбников, А.Н. Хохряков.//Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 2. С. 17-24. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67314955>
6. Сичкарев В.И. Гидродинамические характеристики крыльцевого гидродинамического якоря в численном и физическом экспериментах и их аппроксимация /В.И. Сичкарев, А.Н. Хохряков //Транспортное дело России. 2024. № 1. С. 170-174. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63434650>
7. Сичкарев В.И. Разработка стабилизатора положения гидродинамического якоря //В.И. Сичкарев, А.С. Черенович//В сборнике: Транспорт. Горизонты развития. Труды 2-го Международного научно-промышленного форума. Нижний Новгород, 2022. С. 92. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50305543>
8. Сичкарев В.И. Проведение натурного сопоставительного эксперимента с гидродинамическими якорями спасательных плотов на новосибирском водохранилище  
В.И. Сичкарев, С.В. Титов, В.В. Коновалов, А.С. Черенович, И.А. Иванов, А.В. Пласкеев, А.С. Дмитриев, И.В. Шевцов, Д.Ю. Сахнов //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2022. № 3. С. 28-39. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49938275>
9. Сичкарев В.И. Гидродинамический якорь /В.И. Сичкарев В.И., А.С. Черенович, В.В. Кузьмин В.В. //Патент на изобретение RU 2751044 С1, 07.07.2021. Заявка № 2020132380 от 29.09.2020. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46317307>
10. Матвеев Н.М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений: учебник/ Н.М. Матвеев – Мнска, изд-во «Вышэйш. Школа», изд.4-е, испр. И доп, 1974 - 768 с. с ил.
11. Прудников А.П. Интегралы и ряды/ А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, Ю.А. Маричев. – М. Наука Главная редакция физико-математической литературы, 1981 – 800 с.
12. Черняк В.Г. Механика сплошных сред: учебник для вузов/ В.Г. Черняк, П.Е. Суетин – Екатеринбург, издательство - Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург), 2021 – 600 с., ISBN: 978-5-7996-3226-7
13. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD/ David C. Wilcox – DCW Industries Inc., 3 Edition, 2006.- 536 p. ISBN 978-1-928729-08-2 (1-928729-08-8)
14. Menter F. Zonal two-equation k-w turbulence models for aerodynamic flows/ F. Menter - AIAA Meeting Paper, Published Online:22 Aug 2012. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>
15. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С.Патанкар ; пер. с англ. Виленский В. Д. - М. : Энергоатомиздат, 1984. - 149 с. : ил.

### References

1. Hydrodynamic anchor. Patent for invention No. 2751044 dated September 29, 2020 /V.I. Sichkarev, A.S. Cherenovich, V.V. Kuzmin. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46317307>
2. Sichkarev V.I. Computer modeling of the hydrodynamic anchor wing / V.I. Sichkarev, A.N. Khokhryakov, Yu.S. Pokalyukhin, A.V. Babenko // Scientific problems of transport in Siberia and the Far East, No. 1, 2022, pp. 20-28.
3. Hydrodynamics of a wing hydrodynamic anchor in a physical experiment in a direct experimental pool / V.I. Sichkarev, S.V. Titov, V.V. Konovalov, B.Z. Kuznetsov, I.V. Rozov, D.Yu. Rybnikov, A.N. Khokhryakov // Transport business of Russia, No. 6, 2023. – pp. 282-286.
4. Sichkarev V. preliminary studies of the life-saving vehicle positioning stabilizer / Sichkarev V., Kuzmin V., Cherenovich A., Leschenko A./ In the collection: International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia - 2021. Switzerland, 2022. pp. 1168-1175. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48421527>
5. Sichkarev V.I. Approximation of experimental coefficients of hydrodynamic forces of a wing hydrodynamic anchor /V.I. Sichkarev, S.V. Titov, V.V. Konovalov, B.Z. Kuznetsov, I.V. Rozov, D.Y. Rybnikov, A.N. Khokhryakov.//Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. 2024. No. 2. pp. 17-24. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67314955>
6. Sichkarev V.I. Hydrodynamic characteristics of a wing hydrodynamic armature in numerical and physical experiments and their approximation / V.I. Sichkarev, A.N. Khokhryakov //The transport business of Russia. 2024. No. 1. pp. 170-174. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63434650>
7. Sichkarev V.I. Development of a stabilizer for the position of a hydrodynamic anchor //V.I. Sichkarev, A.S. Cherenovich//In the collection: Transport. Horizons of development. Proceedings of the 2nd International Scientific and Industrial Forum. Nizhny Novgorod, 2022. p. 92. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50305543>
8. Sichkarev V.I. Conducting a full-scale comparative experiment with hydrodynamic anchors of life rafts at the Novosibirsk reservoir
1. V.I. Sichkarev, S.V. Titov, V.V. Konovalov, A.S. Cherenovich, I.A. Ivanov, A.V. Plaskeev, A.S. Dmitriev, I.V. Shevtsov, D.Yu. Sakhnov //Scientific problems of transport in Siberia and the Far East. 2022. No. 3. pp. 28-39. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49938275>
9. Sichkarev V.I. Hydrodynamic anchor / V.I. Sichkarev V.I., A.S. Cherenovich, V.V. Kuzmin V.V. //Patent for the invention RU 2751044 C1, 07.07.2021. Application No. 2020132380 dated 09/29/2020. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46317307>
10. Matveev N.M. Methods of integration of ordinary differential equations: textbook/ N.M. Matveev – Mnska, publishing house "Higher. School", ed.4th, ispr. And dop, 1974 - 768 p. with il.
11. Prudnikov A.P. Integrals and series/ A.P. Prudnikov, Yu.A. Brychkov, Yu.A. Marichev. – M. Nauka Main edition of physical and mathematical literature, 1981 - 800 p.
12. Chernyak V.G. Mechanics of continuous media: textbook for universities/ V.G. Chernyak, P.E. Suetin – Yekaterinburg, publishing house - Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Yekaterinburg), 2021 – 600 p., ISBN: 978-5-7996-3226-7
13. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for CFD/ David C. Wilcox – DCW Industries Inc., 3 Edition, 2006.- 536 p. ISBN 978-1-928729-08-2 (1-928729-08-8)
14. Menter F. Zonal two-equation k-w turbulence models for aerodynamic flows/ F. Menter - AIAA Meeting Paper, Published Online:22 Aug 2012. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>
15. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics / C.Patankar ; translated from English. Vilensky V. D. - M. : Energoatomizdat, 1984. - 149 p. : ill.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сичкарев Виктор Иванович, д.т.н., профессор**, Сибирский государственный университет водного транспорта, 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: svny89@mail.ru

**Viktor I. Sichkarev**, Ph.D of Technical Sciences., Professor, Siberian State University of Water Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina str., 33, e-mail: svny89@mail.ru

**Рослякова Оксана Вячеславовна, к.т.н.**  
доцент, Сибирский государственный  
университет водного транспорта, 630099, г.  
Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail:  
o.v.roslyakova@nsawt.ru

**Oksana V. Roslyakova**, Ph.D., Associate  
Professor, Siberian State University of Water  
Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina  
str., 33, e-mail: o.v.roslyakova@nsawt.ru

**Хохряков Александр Николаевич,**  
аспирант, Сибирский государственный  
университет водного транспорта, 630099, г.  
Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: x-  
jul@mail.ru

**Aleksandr N. Khokhryakov**, graduate  
student, Siberian State University of Water  
Transport, 630099, Novosibirsk, Shchetinkina  
str., 33, e-mail: x-jul@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.10.2024; опубликована онлайн 20.12.2024.  
Received 09.10.2024; published online 20.12.2024.