

Научная статья
УДК 656.61.08
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-17-24>
EDN RWTQQL

Аппроксимация экспериментальных коэффициентов гидродинамических сил крыльевого гидродинамического якоря

*В. И. Сичкарёв[✉], С. В. Титов, В. В. Коновалов, Б. З. Кузнецов,
И. В. Розов, Д. Ю. Рыбников, А. Н. Хохряков*

*Сибирский государственный университет водного транспорта,
Новосибирск, Россия, svny89@mail.ru[✉]*

Аннотация. Рассматривается проведенный в 2020 г. на акватории Новосибирского водохранилища натурный сопоставительный эксперимент по одновременному дрейфу шести морских спасательных плотов вместимостью по 6 человек. Каждый плот снабжался одним из разработанных гидродинамических якорей (ГДЯ); один плот имел штатный парашютный плавучий якорь; один плот не имел никаких средств предотвращения дрейфа. Один из лучших результатов по снижению скорости дрейфа показал крыльевой гидродинамический якорь. Для разработки методов проектирования такого рода ГДЯ проведено определение гидродинамических сил в прямом опытовом бассейне Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ) методом буксировки с разными скоростями и углами атаки. По проведенным в прямом опытовом бассейне СГУВТ испытаниям ГДЯ получены коэффициенты гидродинамических сил. Отмечено, что ГДЯ изготовлен в натуральную величину, что не требует пересчета по критериям подобия; значения коэффициентов показывают нестабильную зависимость от скорости буксировки, что объяснено влиянием погрешностей экспериментального метода и потребовало осреднения результатов. Для обоснования возможности применения метода осреднения привлечены результаты численного моделирования работы ГДЯ, проведенные в программе Ansys Fluent, которые выявили весьма слабую зависимость коэффициентов от скорости потока. На этом основании принято решение о возможности осреднения коэффициентов, относящихся к скоростям потока $v \geq 0,2$ м/с, при которых разброс значений коэффициентов сравнительно небольшой. Осредненные значения коэффициентов, полученных в физическом эксперименте, аппроксимированы в своих диапазонах углов атаки квадратичными полиномами для сглаживания результатов и облегчения их использования в математических моделях работы устройства.

Ключевые слова: гидродинамический якорь, физический эксперимент, коэффициенты гидродинамических сил, аппроксимация эмпирических коэффициентов, дрейф плота

Для цитирования: Сичкарёв В. И., Титов С. В., Коновалов В. В., Кузнецов Б. З., Розов И. В., Рыбников Д. Ю., Хохряков А. Н. Аппроксимация экспериментальных коэффициентов гидродинамических сил крыльевого гидродинамического якоря // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2024. № 2. С. 17–24. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-17-24>. EDN RWTQQL.

Original article

Approximation of experimental coefficients of hydrodynamic forces of the wing hydrodynamic armature

*V. I. Sichkarev[✉], S. V. Titov, V. V. Konovalov, B. Z. Kuznetsov,
I. V. Rozov, D. Yu. Rybnikov, A. N. Khokhryakov*

*Siberian State University of Water Transport,
Novosibirsk, Russia, svny89@mail.ru[✉]*

Abstract. The article considers a full-scale comparative experiment conducted in 2020 in the water area of the Novosibirsk reservoir on the simultaneous drift of six marine life rafts with a capacity of 6 people each. Each raft was equipped with one of the developed hydrodynamic anchors (HDA); one raft had a standard parachute floating anchor; one raft had no means of preventing drift. The wing hydrodynamic armature showed good results in reducing the drift velocity. To develop design methods of this kind, hydrodynamic forces were determined in the direct experimental ba-

sin of the Siberian State University of Water Transport (SSUWT) by towing with different speeds and angles of attack. According to the tests conducted in the direct experimental pool of the police Department, HDA the coefficients of hydrodynamic forces were obtained. It is noted that the HDA is made in full size, which does not require recalculation according to similarity criteria; the values of the coefficients show an unstable dependence on the towing speed, which is explained by the influence of errors of the experimental method and required averaging of the results. To substantiate the possibility of using the averaging method, the results of numerical modeling of the work of HDA carried out in the *Ansys Fluent* program are used, which revealed a very weak dependence of the coefficients on the flow rate. On this basis, a decision was made on the possibility of averaging coefficients related to flow velocities $v \geq 0.2$ m/s, at which the spread of coefficient values is relatively small. The averaged values of the coefficients obtained in the physical experiment are approximated in their ranges of angles of attack by quadratic polynomials to smooth out the results and facilitate their use in mathematical models of the device operation.

Keywords: hydrodynamic anchor, physical experiment, coefficients of hydrodynamic forces, approximation of empirical coefficients, the drift of the raft

For citation: Sichkarev V. I., Titov S. V., Kononov V. V., Kuznetsov B. Z., Rozov I. V., Rybnikov D. Yu., Khokhryakov A. N. Approximation of experimental coefficients of hydrodynamic forces of the wing hydrodynamic armature. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 2024;2:17-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-2-17-24>. EDN RWTQQL.

Введение

В рамках проблемы совершенствования средств предотвращения опрокидывания и уменьшения дрейфа спасательных плотов с целью снижения риска гибели спасающихся и ускорения их обнаружения при проведении поисково-спасательных операций в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта» (СГУВТ) в 2019–2022 гг. выполнялась работа, поддержанная государственным заказом № 110-00018-21-00 на 2021 г. В этой работе в качестве основного рабочего органа для предотвращения опрокидывания плота на крутых волнах с опрокидывающимся гребнем предложено использовать якоря присоединенной массы (ЯПМ), а для предотвращения дрейфа – гидродинамические якоря (ГДЯ). Разработано, изготовлено и испытано несколько разновидностей таких якорей; часть из них защищена патентами на изобретения Российской Федерации [1–4]. Для обеспечения возможности всплывшему

спасательному плоту оставаться вблизи места гибели судна разработана конструкция контейнера для размещения плота и его ГДЯ, предваряющая развертывание и начало работы ГДЯ еще до окончания процесса газонаполнения плота [5]. Разработана также конструкция для стабилизации диаметральной плоскости ГДЯ относительно направления дрейфа плота [6]. Таким образом, разработан необходимый минимум технических средств, обеспечивающих работоспособность системы снижения дрейфа плота.

Натурный сопоставительный эксперимент по дрейфу плотов

Многие нюансы реальной работы системы «плот – трос – якорь» удалось обнаружить и осознать в процессе проведенного на Новосибирском водохранилище натурного сопоставительного эксперимента 2020 г. по одновременному дрейфу шести спасательных плотов [7] (рис. 1).



Рис. 1. Дрейф плотов во время сопоставительного эксперимента на Новосибирском водохранилище

Fig. 1. Drift of rafts during a comparative experiment at the Novosibirsk reservoir

В ходе натурального сопоставительного эксперимента на Новосибирском водохранилище по дрейфу плотов, оснащенных разными устройствами снижения дрейфа, включая штатное в виде подводного парашютного купола, для дальнейших исследований выбор пал на ГДЯ, содержащий

твердотельные крылья из гнутого листа с ограничителями углов поворота крыльев [1]. Общий вид экспериментального образца крыльцевого ГДЯ, состоящего из трех килей, между которыми установлены две пары гнутых листовых крыльцевых профилей, приведен на рис. 2.

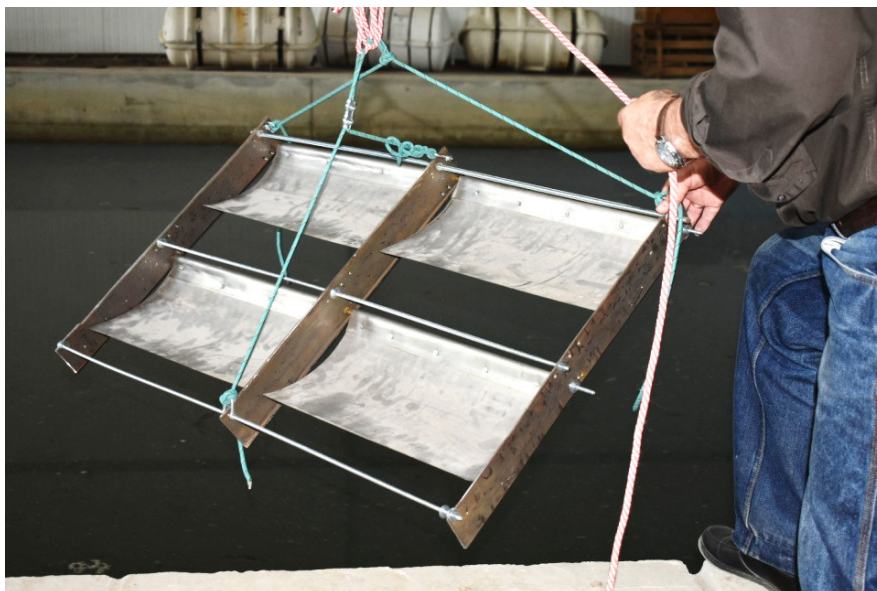


Рис. 2. Общий вид экспериментального образца крыльцевого ГДЯ

Fig. 2. General view of the experimental wing sample HDA

Обоснование экспериментальных исследований гидродинамического якоря

Помимо продолжения технического совершенствования ГДЯ, дальнейшие работы необходимо вести в направлении создания методологии проектирования ГДЯ с заданными параметрами конечного результата по снижению дрейфа плота с ГДЯ. В этом направлении возникает задача разработки математической модели, описывающей взаимодействие качающегося на волнении и дрейфующего под действием ветра и ветро-волнового течения плота и взаимодействующего с ним через якорный трос ГДЯ. В этом взаимодействии определяющая роль принадлежит гидродинамическим силам, возникающим на ГДЯ при его перемещении якорным тросом.

Теоретическое определение гидродинамических сил вследствие полной нестационарности движения можно отнести к задачам неблизкой перспективы, а инженерные методы проектирования нужны уже в настоящее время. Для определения гидродинамических сил понадобилось проведение специально поставленных экспериментов в прямом опытовом бассейне СГУВТ с различными образцами ГДЯ, выполненными в натурную величину с эффективной площадью около $0,4 \text{ м}^2$ (рис. 3).

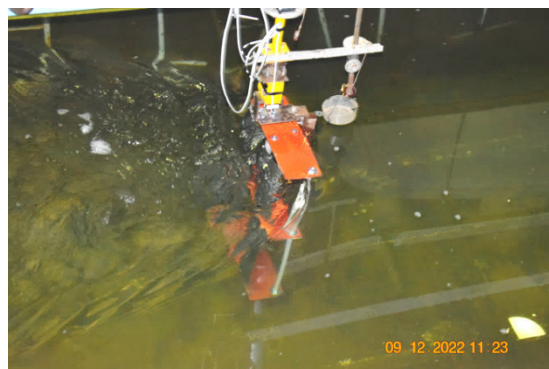


Рис. 3. Испытания опытного образца крыльцевого ГДЯ в опытовом бассейне СГУВТ: момент протяжки крыльцевого ГДЯ на рабочем ходу

Fig. 3. Tests of the prototype of the wing housing HDA in the experimental pool of the SSUWT: the moment of pulling the wing housing HDA on the working stroke

По этой причине не требуется пересчета скоростей буксировки, и они назначались в соответствии со скоростями орбитального движения плота на волнении в разных фазах его периода.

Обработка результатов экспериментов

Обработка экспериментов, проведенных в опытном бассейне для определения гидродинамических сил и моментов на крыльцевом ГДЯ, свидетельствует о зависимости коэффициентов гидродинамических сил (КГС) не только от угла атаки α ГДЯ,

но и от скорости v потока (скорости буксировки).

Особенность зависимости проявилась в том, что наиболее нестабильными оказались значения КГС при малых скоростях потока v , тогда как при средних и высоких скоростях значения КГС достаточно близки (рис. 4).

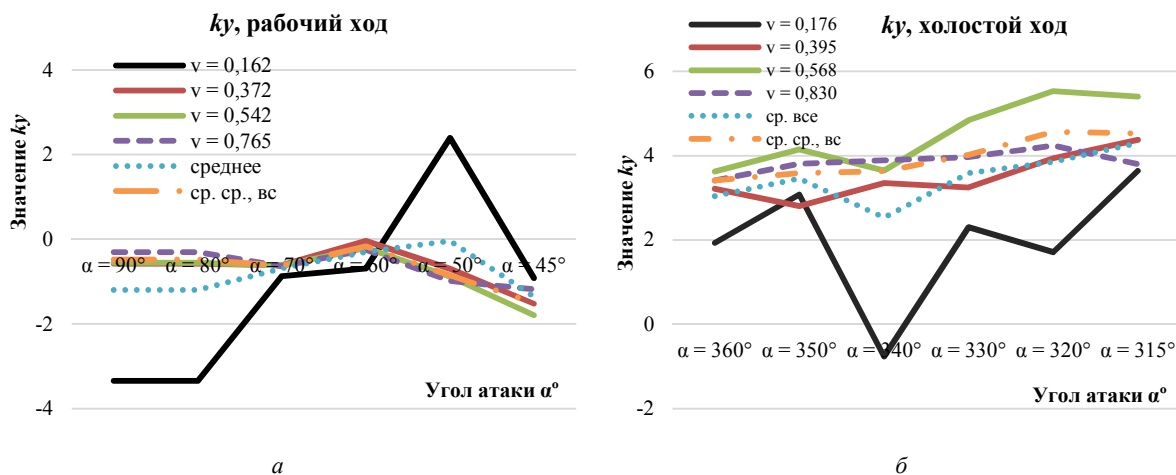


Рис. 4. Коэффициент поперечной силы $k_y(\alpha, v)$ в физическом эксперименте:
 а – в диапазоне углов атаки рабочего хода ГДЯ; б – в диапазоне углов атаки холостого хода ГДЯ

Fig. 4. The coefficient of transverse force $k_y(\alpha, v)$ in a physical experiment:
 а – in the range of angles of attack of the working stroke of the HDA;
 б – in the range of angles of attack of the idling stroke of the HDA

Сравнение с аналогичной зависимостью, полученной в численном эксперименте [8], проведенном путем решения замкнутой системы уравнений Навье – Стокса, уравнения неразрывности, уравнения состояния среды и уравнения баланса полной энергии в пакете Ansys Fluent [2], определило, что зависимость значений КГС от скорости потока незначительна (рис. 5), что позволяет осреднять значения КГС по аргументу скорости потока v .

Поскольку численный эксперимент тоже имеет ограниченную достоверность из-за ограничений программ пакета Ansys Fluent по допустимому числу ячеек разбиения сплошной среды, из-за преобразования уравнений Навье – Стокса в уравнения Рейнольдса и использования гипотезы Буссинеска для моделирования явлений турбулентности, его результаты также необходимо проверять физическим экспериментом.

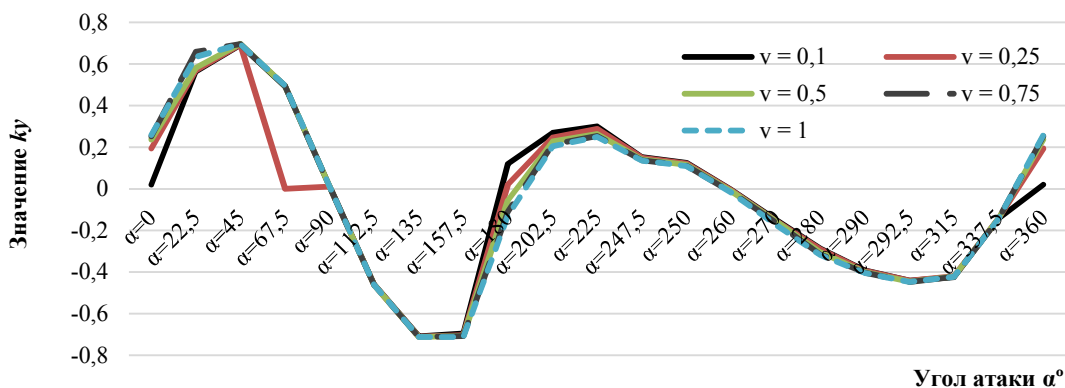


Рис. 5. Коэффициент поперечной силы $k_y(\alpha, v)$ в численном эксперименте

Fig. 5. The coefficient of transverse force $k_y(\alpha, v)$ in a numerical experiment

В то же время результат численного эксперимента о практической независимости КГС от скорости потока может быть использован в физическом эксперименте (имеющем свои пределы достоверности) как необходимость освободить результаты КГС от влияния скорости v , например путем осреднения значений КГС по скорости. И возникает вопрос о том, для каких скоростей допустимо осреднение, поскольку это связано с погрешностью получаемых средних величин.

В результате анализа всего пакета величин КГС k_x , k_y , k_m к осреднению приняты КГС, полученные на скоростях $v > 0,2$ м/с.

Аппроксимация коэффициентов гидродинамических сил

Осредненные значения КГС желательно иметь в аналитическом виде хотя бы в практически актуальном диапазоне углов атаки α . Этот диапазон для рабочего хода ГДЯ определен в пределах $\alpha = 45 \div 90^\circ$, а для холостого хода в пределах $\alpha = 315 \div 360^\circ$. Аппроксимация проведена квадратичным полиномом вида

$$k = a\alpha^2 + b\alpha + c,$$

где a , b , c – коэффициенты аппроксимации, полученные способом наименьших квадратов по осредненным значениям КГС (таблица).

Коэффициенты аппроксимации коэффициентов гидродинамических сил, осредненных по средним и высоким скоростям буксировки

Coefficients of approximation of the coefficients of hydrodynamic forces averaged over medium and high towing speeds

Коэффициент сил	Вид движения	Диапазон α	Коэффициенты аппроксимации		
			a	b	c
k_x	Рабочий ход	$45 \div 90^\circ$	-0,000295	0,049853	-0,790234
	Холостой ход	$315 \div 360^\circ$	-0,000110	0,075549	-13,466018
k_y	Рабочий ход	$45 \div 90^\circ$	-0,001167	0,172871	-6,709887
	Холостой ход	$315 \div 360^\circ$	0,000460	-0,337709	65,331868
k_m	Рабочий ход	$45 \div 90^\circ$	-0,055082	6,694316	-157,043826
	Холостой ход	$315 \div 360^\circ$	-0,005884	4,068123	-702,020606

Графическое сравнение экспериментальных осредненных значений КГС и их аппроксимиро-

ванных значений представлено на рис. 6.

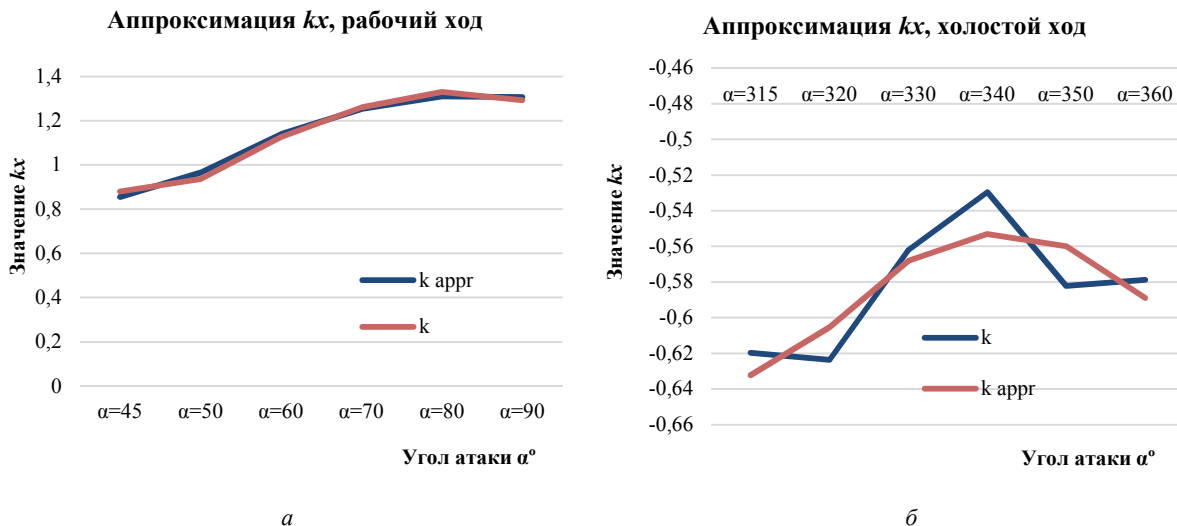


Рис. 6. Аппроксимация коэффициентов гидродинамических сил k_x , k_y , k_m в диапазоне углов атаки ГДЯ: a – аппроксимация коэффициента k_x , рабочий ход; b – аппроксимация коэффициента k_x , холостой ход

Fig. 6. Approximation of the coefficients of hydrodynamic forces k_x , k_y , k_m in the range of angles of the HDA attack: a – approximation of the coefficient k_x , working stroke; b – approximation of the coefficient k_x , idling;

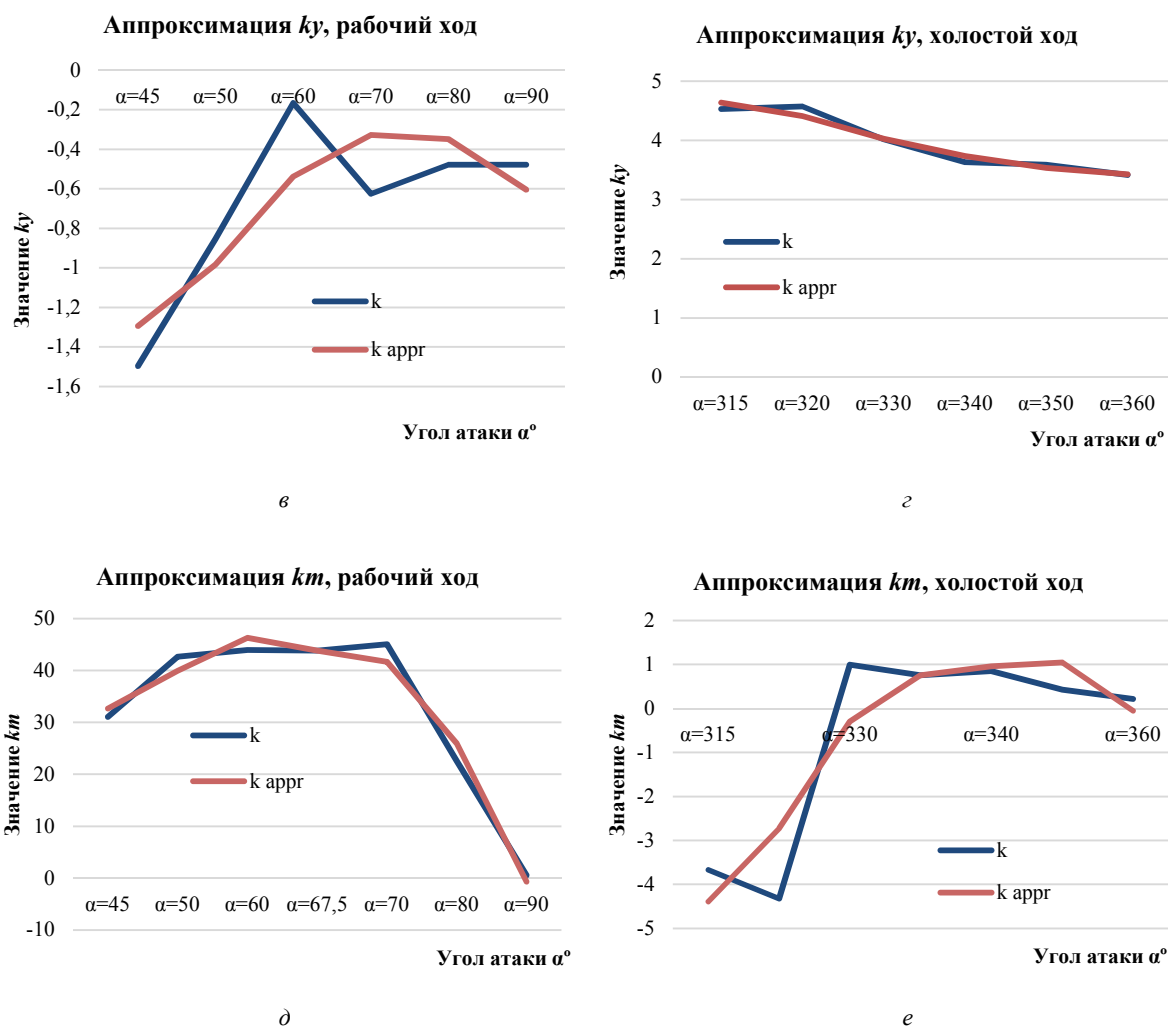


Рис. 6 (окончание). Аппроксимация коэффициентов гидродинамических сил k_x , k_y , k_m в диапазоне углов атаки ГДЯ: ϵ – аппроксимация коэффициента k_y , рабочий ход; z – аппроксимация коэффициента k_y , холостой ход; δ – аппроксимация коэффициента k_m , рабочий ход; e – аппроксимация коэффициента k_m , холостой ход

Fig. 6 (Ending). Approximation of the coefficients of hydrodynamic forces k_x , k_y , k_m in the range of angles of the HDA attack: ϵ – approximation of the coefficient k_y , working stroke; z – approximation k_y coefficient, idle stroke; δ – approximation of the k_m coefficient, working stroke; e – approximation of the k_m coefficient, idle stroke

Заключение

Таким образом, результат аппроксимации КГС позволяет сгладить не имеющий физического обоснования (кроме погрешностей экспериментального метода) разброс экспериментальных значений КГС. Аналитическая форма представления

нелинейных по своей физической природе коэффициентов гидродинамических сил упрощает применение результатов эксперимента при математическом моделировании работы ГДЯ в составе системы «плот – трос – ГДЯ».

Список источников

1. Пат. RU2743456C1. Стабилизатор позиционирования плавающего объекта / Сичкарёв В. И., Кузьмин В. В. № 2743456; заявл. 01.06.2020; опубл. 18.02.2021.
2. Пат. RU2751044C1. Гидродинамический якорь / Сичкарёв В. И., Черенович А. С., Кузьмин В. В. № 2751044; заявл. 29.09.2020; опубл. 07.07.2021.
3. Пат. RU2785310C1. Гидродинамический якорь / Сичкарёв В. И., Черенович А. С.; № 2785310; заявл. 25.01.2022; опубл. 06.12.2022.
4. Пат. RU2792851C1. Гидродинамический якорь / Сичкарёв В. И., Черенович А. С., Титов С. В., Коновалов В. В., Розов И. В.; № 2792851; заявл. 19.12.2022;

опубл. 27.03.2023.

5. Пат. RU2779886С1. Контейнер спасательного плота (варианты) / Сичкарёв В. И., Черенович А. С. № 2779886; заявл. 15.10.2021; опубл. 14.09.2022.

6. Пат. RU2785309С1. Стабилизатор положения неуправляемого объекта / Сичкарёв В. И., Черенович А. С. № 2785309; заявл. 25.02.2022; опубл. 06.12.2022.

7. Сичкарёв В. И., Титов С. В., Коновалов В. В., Черенович А. С., Иванов И. А., Плассеев А. В., Дмитри-

ев А. С., Шевцов И. В., Сахнов Д. Ю. Проведение натурного сопоставительного эксперимента с гидродинамическими якорями спасательных плотов на Новосибирском водохранилище // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2022. № 3. С. 28–39.

8. Сичкарёв В. И., Хохлаков А. Н., Покалюхин Ю. С., Бабенко А. В. Компьютерное моделирование работы крыла гидродинамического якоря // Науч. проблемы трансп. Сибири и Дальнего Востока. 2022. № 1. С. 20–28.

References

1. Sichkarev V. I., Kuz'min V. V. *Stabilizator pozitsionirovaniia plavaiushchego ob"ekta* [Stabilizer for positioning a floating object]. Patent RF, no. 2743456, 18.02.2021.

2. Sichkarev V. I., Cherenovich A. S., Kuz'min V. V. *Gidrodinamicheskii iakor'* [Hydrodynamic anchor]. Patent RF, no. 2751044, 07.07.2021.

3. Sichkarev V. I., Cherenovich A. S. *Gidrodinamicheskii iakor'* [Hydrodynamic anchor]. Patent RF, no. 2785310, 06.12.2022.

4. Sichkarev V. I., Cherenovich A. S., Titov S. V., Kononov V. V., Rozov I. V. *Gidrodinamicheskii iakor'* [Hydrodynamic anchor]. Patent RF, no. 2792851, 27.03.2023.

5. Sichkarev V. I., Cherenovich A. S. *Konteiner spasatel'nogo plota (varianty)* [Life Raft container (options)]. Patent RF, no. 2779886, 14.09.2022.

6. Sichkarev V. I., Cherenovich A. S. *Stabilizator*

polozheniia neupravliaemogo ob"ekta [Stabilizer for the position of an uncontrolled object]. Patent RF, no. 2785309, 06.12.2022.

7. Sichkarev V. I., Titov S. V., Kononov V. V., Cherenovich A. S., Ivanov I. A., Plaskeev A. V., Dmitriev A. S., Shevtsov I. V., Sakhnov D. Yu. Provedenie naturnogo sopostavitel'nogo eksperimenta s gidrodinamicheskimi iakoriami spasatel'nykh plotov na Novosibirskom vodokhranilishche [Conducting a full-scale comparative experiment with hydrodynamic anchors of life rafts at the Novosibirsk reservoir]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2022, no. 3, pp. 28-39.

8. Sichkarev V. I., Khokhriakov A. N., Pokaliukhin Yu. S., Babenko A. V. Komp'yuternoe modelirovanie raboty kryla gidrodinamicheskogo iakoria [Computer simulation of the hydrodynamic armature wing operation]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2022, no. 1, pp. 20-28.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023; одобрена после рецензирования 16.04.2024; принята к публикации 19.04.2024
The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 16.04.2024; accepted for publication 19.04.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Иванович Сичкарёв — доктор технических наук, профессор; профессор кафедры судовождения; Сибирский государственный университет водного транспорта; svny89@mail.ru

Сергей Владиленивич Титов — доктор технических наук, доцент; начальник научно-исследовательской службы; Сибирский государственный университет водного транспорта; svtcom@bk.ru

Валерий Владимирович Коновалов — кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания; Сибирский государственный университет водного транспорта; kononov@nsawt.ru

Борис Зосимович Кузнецов — инженер кафедры физики; Сибирский государственный университет водного транспорта; borisk700@gmail.com

Viktor I. Sichkarev — Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Navigation; Siberian State University of Water Transport; svny89@mail.ru

Sergey V. Titov — Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Research Service; Siberian State University of Water Transport; svtcom@bk.ru

Valery V. Kononov — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Marine Internal Combustion Engines; Siberian State University of Water Transport; kononov@nsawt.ru

Boris Z. Kuznetsov — Engineer of the Department of Physics; Siberian State University of Water Transport; borisk700@gmail.com

Илья Владимирович Розов – специалист научно-исследовательской службы; Сибирский государственный университет водного транспорта; unir@nsawt.edu.ru

Дмитрий Юрьевич Рыбников – аспирант кафедры теории корабля; Сибирский государственный университет водного транспорта; ktuk@nsawt.ru

Андрей Николаевич Хохряков – аспирант кафедры судовождения; Сибирский государственный университет водного транспорта; ks@nsawt.ru

Ilya V. Rozov – Specialist of the Scientific Research Service; Siberian State University of Water Transport; unir@nsawt.edu.ru

Dmitry Yu. Rybnikov – Postgraduate Student of the Department of Ship Theory; Siberian State University of Water Transport; ktuk@nsawt.ru

Andrey N. Khokhryakov – Postgraduate Student of the Department of Navigation; Siberian State University of Water Transport; ks@nsawt.ru

