

Научная статья
УДК 532.5:629.12

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ГРЕБНОЙ ВИНТ-КОРПУС СУДНА

Г.С. Горянский^{1,*}, А.А. Мушенков¹, Н.Л. Великанов¹

¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

* E-mail: gennadij.goryanskij@klgtu.ru

Аннотация. Считается, что увеличение расстояния от винта до корпуса приводит к росту коэффициента влияния корпуса и пропульсивного коэффициента в целом. Это справедливо применительно к тонким корпусам больших удлинений. Для судов с полными кормовыми образованиями, обтекание которых зачастую сопровождается отрывом пограничного слоя, требуются дополнительные исследования. Работа гребного винта в указанных условиях может привести к заметному смещению зоны отрыва в корму и, следовательно, к существенному уменьшению сопротивления формы. Для транспортных и, частично, буксирных судов, на характерных режимах работы гребного винта высокий пропульсивный коэффициент наблюдается в случае минимально допустимого расстояния между винтом и корпусом.

Ключевые слова: зона отрыва; коэффициент засасывания; гребной винт; число Рейнольдса.

Для цитирования: Горянский Г.С., Мушенков А.А., Великанов Н.Л. Гидродинамические характеристики системы гребной винт- корпус судна // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т.10. №1. С. 29–37.

Original article

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SCREW -HULL SYSTEM

G.S. Goryanskij^{1,*}, A.A. Mushenkov¹, N.L. Velikanov¹

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: gennadij.goryanskij@klgtu.ru

Abstract. It is believed that an increase in the distance from the screw to the housing leads to an increase in the coefficient of influence of the housing and the propulsive coefficient as a whole. This is true for thin housings with large elongations. For vessels with complete stern formations, the flow around of which is often accompanied by the separation of the boundary layer, additional research is required. The operation of the propeller under these conditions can lead to a noticeable displacement of the separation zone aft and, consequently, to a significant decrease in shape resistance. For transport and, partially, towing vessels, in typical propeller operating modes, a high propulsive coefficient is observed in the case of the minimum allowable distance between the propeller and the hull.

Key words: separation zone; suction coefficient; propeller; Reynolds number.

For citation: Goryanskij G.S., Mushenkov A.A., Velikanov N.L. Hydrodynamic characteristics of screw -hull system. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. V.10. No.1. pp. 29–37.

Введение

Силы сопротивления воды движению лопастей существенно зависят от расположения гребного винта за корпусом. Отыскание наиболее рационального размещения гребного винта относительно корпуса судна является одним из эффективных средств повышения пропульсивных качеств судна [1-6].

Широко распространено мнение, что осевое удаление винта от корпуса приводит к увеличению коэффициента влияния корпуса η_k и пропульсивного коэффициента η в целом [7-10].

В этих работах указывается на целесообразность увеличения осевого зазора между движителем и корпусом судна e до $0,3 \div 0,4$ диаметра винта D . В монографии [8] приводятся результаты экспериментального исследования взаимодействия движителя и корпуса транспортного судна, из которых следует, что увеличение параметра e с $0,2$ до $0,6$ может привести к повышению пропульсивного коэффициента η на $(6 \div 8)\%$. Аналогичные сведения содержатся и в других источниках. Например, в работах [9,10].

Исходные предпосылки и допущения

Авторы приведённых работ объясняют полученные результаты, полагая, что с удалением движителя от корпуса коэффициент засасывания t уменьшается быстрее, чем коэффициент попутного потока $\bar{\psi}$. Снижение величин t и $\bar{\psi}$ сопровождается падением коэффициента нагрузки винта σ_p

$$\sigma_p = 8P/\pi \cdot \rho v_0^2 (1 - \bar{\psi})^2 D^2,$$

где P — упор винта; v_0 — скорость судна; ρ — массовая плотность жидкости.

Увеличение осевого зазора e должно в этом случае привести к возрастанию не только величин η_k , но и к увеличению пропульсивного коэффициента η в целом.

Однако изложенные выше аргументы, бесспорно справедливые применительно к тонким корпусам больших удлинений, теряют свою очевидность, когда рассматриваются суда с полными кормовыми образованиями, обтекание которых зачастую сопровождается отрывом пограничного слоя.

Действительно, работа гребного винта в указанных условиях может привести к заметному смещению зоны отрыва в корму и, следовательно, к существенному уменьшению сопротивления формы. Можно также ожидать, что образующаяся в результате отрицательная вязкостная сила засасывания будет увеличиваться по абсолютной величине с приближением винта к корпусу. В этом случае быстрое нарастание потенциальной силы засасывания, обусловленное уменьшением осевого зазора, должно в какой-то степени компенсироваться снижением сопротивления формы.

Отмеченная особенность взаимодействия системы гребной винт — полный корпус может существенно повлиять на характер зависимостей $\eta_k = f_1(e/D)$ и $\eta = f_2(e/D)$, а следовательно, и на рекомендации по выбору оптимального зазора между винтом и корпусом.

Экспериментальные исследования

Для проверки указанного предположения была выполнена серия экспериментов для определения коэффициентов засасывания t и попутного потока $\bar{\psi}$, а в итоге и коэффициента

влияния корпуса η_k для двух глубокопогруженных тел вращения различной формы: эллипсоида (полная корма) и тела вращения дуги параболы (острая корма). Коэффициенты продольной полноты корпусов равнялись соответственно $\varphi_1 = 0,667$ и $\varphi_2 = 0,533$.

Оба корпуса имели одинаковое удлинение $L/B = 5$. Отношение диаметра гребного винта к ширине корпуса равнялось $0,425$. На рис. 1 показаны кормовые ветви образующих обоих корпусов и схема расположения винта за корпусом.

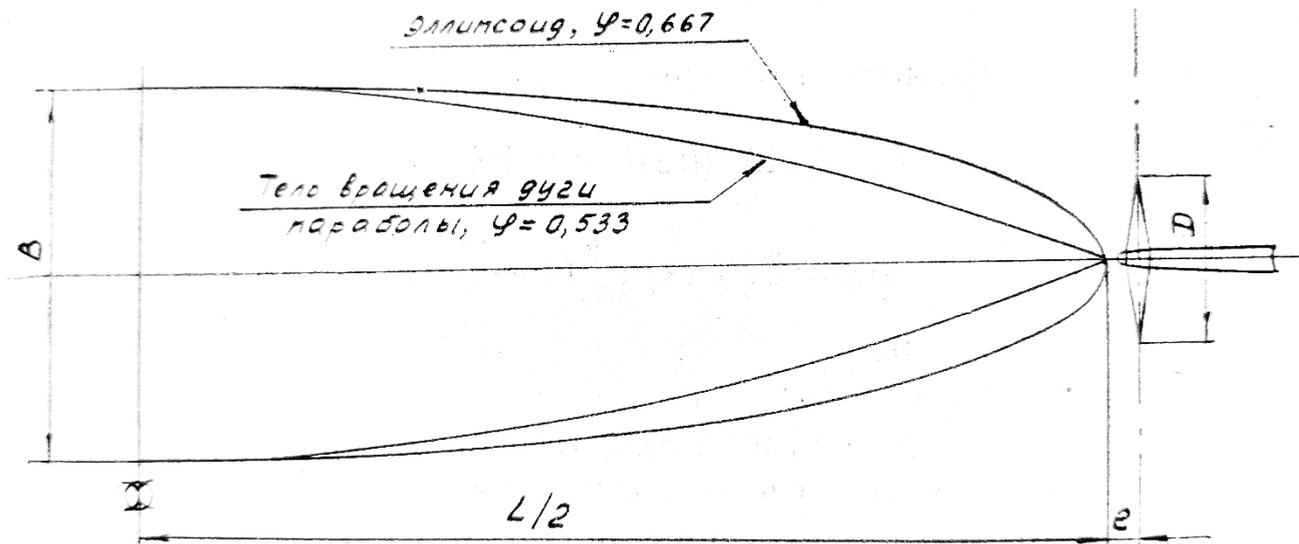


Рисунок 1 – Схема кормовой части комплекса корпус – гребной винт

Эксперименты выполнялись в Отраслевой лаборатории мореходных качеств Калининградского государственного технического университета. При этом числа Рейнольдса для модели гребного винта лежали в диапазоне

$$Re = \frac{nD^2}{\nu} \cdot \bar{b}_{cp} = (1 \div 3) \cdot 10^4,$$

а для модели корпуса составляли $Re = \frac{v_0^2 \cdot h}{\nu} = (5 \div 7) \cdot 10^5$.

В качестве параметра, характеризующего режим работы движительного комплекса, принимался коэффициент нагрузки в форме $\sigma_0 = 8P/\pi \cdot \rho \cdot v_0^2 \cdot D^2$. Эксперименты с полным корпусом велись в широком диапазоне коэффициентов нагрузки $\sigma_0 = 1 \div 20$ и отстояний винта от корпуса $\bar{e} = e/D = 0,2 \div 0,7$. Опыты с острым корпусом носили контрольный характер и выполнены только на $\sigma_0 = 6,0$.

Результаты исследований

Результаты экспериментов в виде зависимостей $\eta_k = f(\bar{e})$ приведены на рис. 2—3, откуда следует, что с утяжелением режима работы гребного винта коэффициент влияния корпуса возрастает. Это легко объяснить. Действительно, коэффициент номинального попутного потока $\bar{\psi}$ от σ_0 не зависит. Коэффициент же засасывания уменьшается с возрастанием σ_0 , что приводит к соответствующему увеличению η_k .

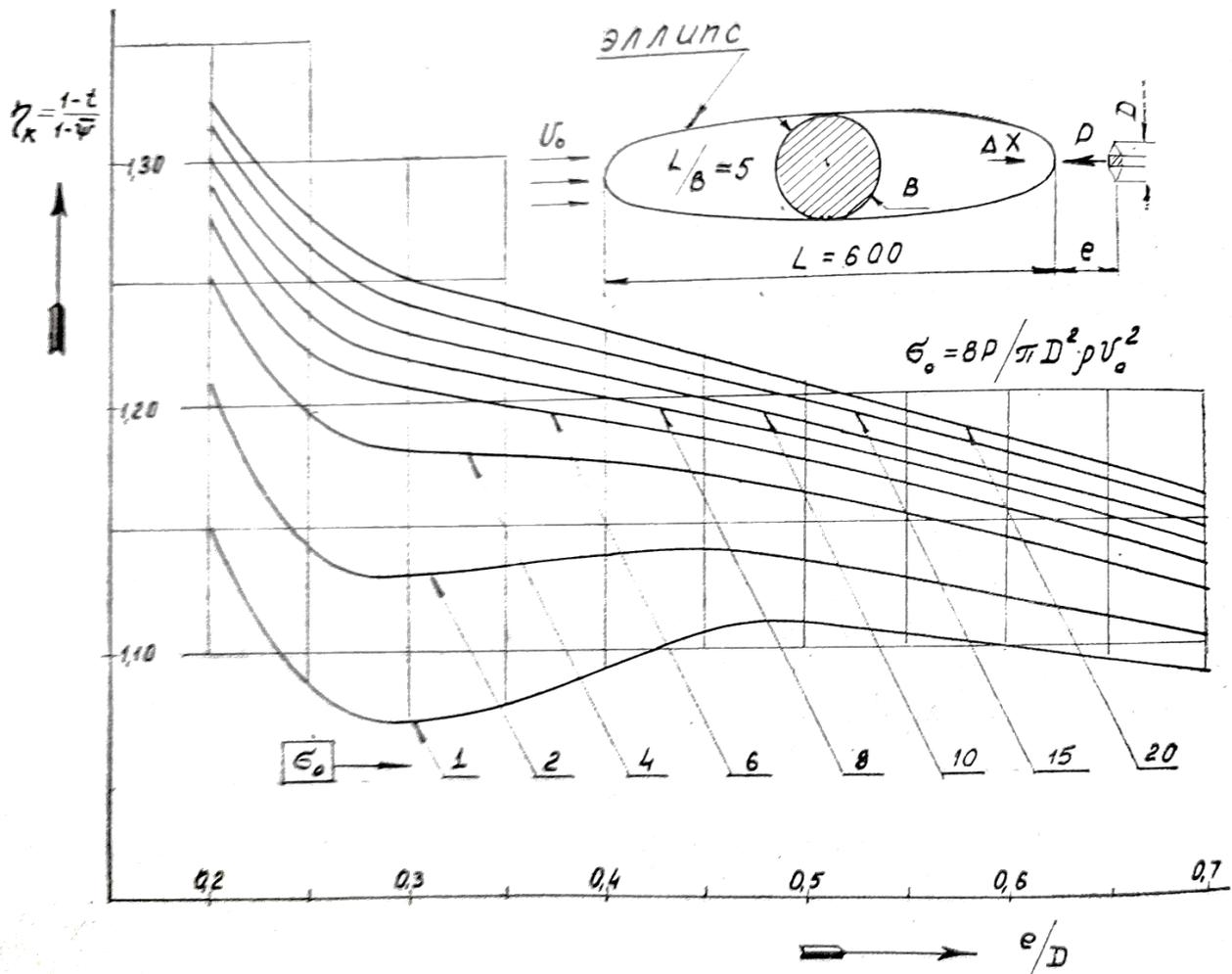


Рисунок 2 – Зависимости коэффициента влияния корпуса от осевого зазора для различных коэффициентов нагрузки

Установлено также, что во всех обследованных случаях наибольшая величина коэффициента влияния корпуса достигается при максимальном сближении винта с корпусом.

Обнаруженные при малых \bar{e} экстремумы зависимостей $\eta_k = f(\bar{e})$ могут быть объяснены следующим образом. При больших отстояниях винта от корпуса ($\bar{e} > 0,5$) величина η_k определяется в основном коэффициентом попутного потока ввиду относительной малости t при этих значениях \bar{e} . По мере приближения гребного винта к корпусу коэффициент засасывания стремительно нарастает (существенно быстрее, чем величина $\bar{\psi}$), что приводит к замедлению роста коэффициента влияния корпуса, а затем и ко все более интенсивному его снижению.

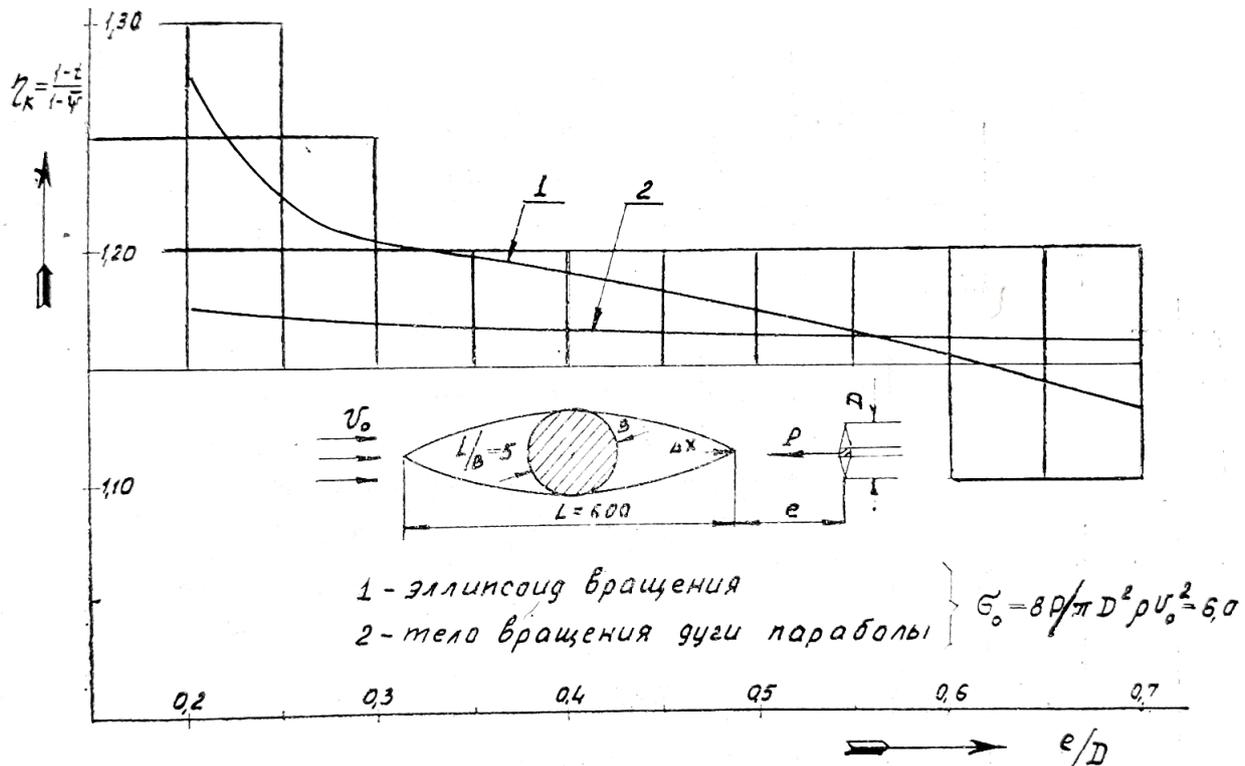


Рисунок 3 – Зависимости коэффициента влияния корпуса от осевого зазора для полного и острого корпусов

Однако по мере уменьшения зазора усиливается влияние работающего винта на сопротивление формы корпуса. В результате темпы роста t начинают все заметнее снижаться, а в диапазоне $\bar{e} = 0,2 \div 0,3$ коэффициент засасывания вообще оказывается не зависящим от \bar{e} (рис. 4). Это приводит к тому, что падение коэффициента влияния корпуса в целом вначале замедляется, а в зоне $\bar{e} = 0,2 \div 0,3$ наблюдается все усиливающийся его рост.

С увеличением коэффициента нагрузки коэффициент засасывания уменьшается, влияние t на величину η_k ослабевает, а экстремумы функций $\eta_k = f(\bar{e})$ постепенно сглаживаются и затем исчезают.

Полученные материалы в целом указывают на то, что в некоторых случаях значительное увеличение коэффициента влияния корпуса может быть получено за счет предельного уменьшения осевого зазора \bar{e} . Эффект от приближения винта к корме оказался более заметным для полного корпуса (см. рис. 4).

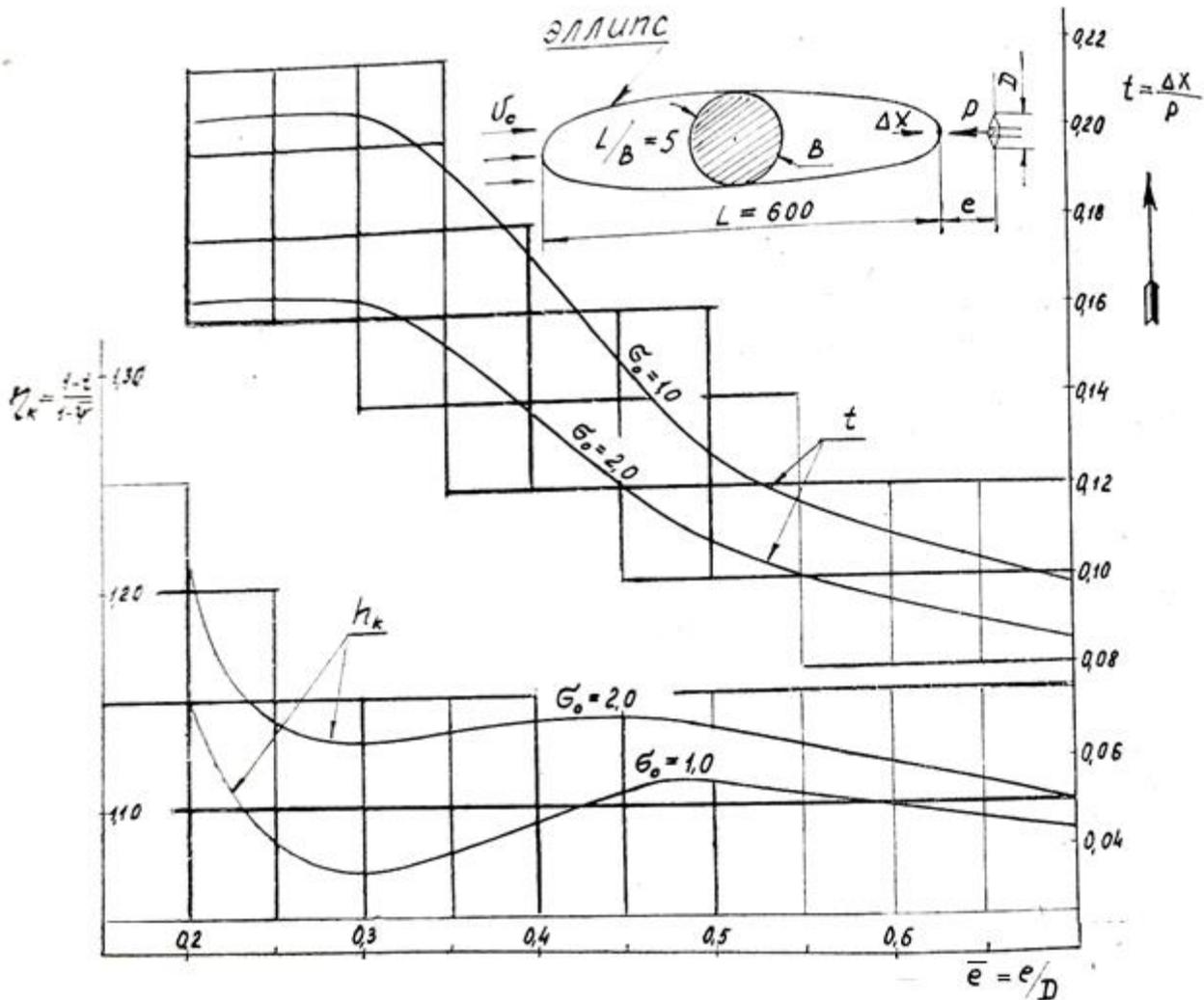


Рисунок 4 – Коэффициенты влияния корпуса и засасывания для полного корпуса на малых коэффициентах нагрузки

Обсуждения и анализ результатов

Приведенные результаты экспериментов не могут, однако, рассматриваться как основа для бесспорного вывода о целесообразности максимального сближения винта и корпуса даже применительно к обследованным телам, поскольку такое сближение наряду с увеличением k должно сопровождаться некоторым снижением КПД гребного винта η_p из-за возрастания t и $\bar{\psi}$.

В описанных опытах крутящий момент на винте не регистрировался, и величина η_p не могла быть определена непосредственно по результатам эксперимента. Однако отношение КПД, соответствующих работе гребного винта на одном и том же коэффициенте нагрузки σ_0 , но при двух различных осевых зазорах \bar{e}_1 , и \bar{e}_2 (η_{p1}/η_{p2}) можно вычислить приближенно в допущении, что коэффициент качества движителя $\zeta_p = \eta_p/\eta_i$ (η_i — КПД идеального движителя) при заданном σ_0 от величины \bar{e} не зависит.

На рис. 5 приведены результаты расчетов, выполненных с использованием сформулированного допущения. Здесь величина $\eta_{0,2}$ соответствует пропульсивному коэффициенту при $\bar{e} = 0,2$, а отношение $\bar{\eta} = \eta/\eta_{0,2}$ характеризует изменение η при смещении винта вдоль оси относительно исходного положения $\bar{e} = 0,2$. Необходимые для определения параметра $\bar{\eta}$ величины t , $\bar{\psi}$ и η_k брались из эксперимента, а отношение $\eta/\eta_{0,2}$ находилось расчетным путем.

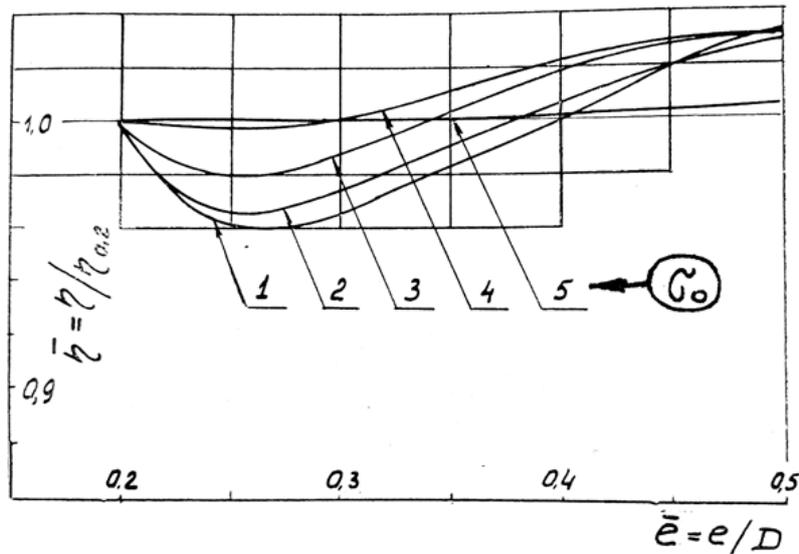


Рисунок 5 – Влияние осевого зазора на пропульсивный коэффициент

Полученные данные показывают, что для полного корпуса зависимости $\eta = f(\bar{e})$ на малых коэффициентах нагрузки имеют сложный характер с минимумом при $\bar{e} = 0,25 \div 0,30$ и с возможным максимумом в зоне $\bar{e} > 0,5$.

В целом на режимах работы гребного винта, характерных для транспортных и, частично, буксирных судов ($\sigma_0 = 1 \div 3$, $\sigma_p = 1,7 \div 7,0$) в реальном диапазоне $\bar{e} \leq 0,35$, наиболее высокий пропульсивный коэффициент обеспечивался при максимальном сближении винта с корпусом. С увеличением коэффициента нагрузки зависимости $\eta = f(\bar{e})$ сглаживаются и при $\sigma_0 > 6$ становятся монотонно возрастающими.

Для острого корпуса удаление винта от корпуса сопровождалось возрастанием пропульсивного коэффициента. Однако на обследованном режиме $\sigma_0 = 6,0$ это увеличение η оказалось весьма малым.

Заключение

Таким образом, установлено, что зависимости $\eta = f_1(\bar{e})$ и $\eta = f_2(\bar{e})$ могут иметь различный характер. Их вид определяется, в частности, формой кормовой оконечности судна и режимом работы гребного винта. Из приведенных материалов следует также, что существующие рекомендации о целесообразности предельного удаления винта от корпуса для достижения максимального пропульсивного коэффициента применительно к корпусам с большими коэффициентами, полноты нуждаются в детальной проверке и, возможно, корректировке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bugalski T., Streckwall H., Szantyr J. A. Critical review of propeller performance scaling methods, based on model experiments and numerical calculations. Polish maritime research. 2013. No. 4(80). pp. 71-79.
2. Sawale A., Archana D., Seshank C. Design and Analysis of Propeller. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 455. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012018>.
3. Yu J., Zhou B., Liu H., Han X., Hu G., Zhang T. Study of Propeller Vortex Characteristics under Loading Conditions. Symmetry 2023. Vol. 15. 445. <https://doi.org/10.3390/sym15020445>.
4. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Гидродинамическое сопротивление систем из стержней и нитей. Калининград, Издательство: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2015. 192 с.

5. Соловьева Я.Ю. Создание судовых движителей с пониженной виброактивностью. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Спец. выпуск № 2. С. 40–43.
6. Лебедева М.П., Вишнеvский Л.И. Силы на гребном винте маневрирующего судна. - Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11. № 3. С. 554–564.
7. Пустошный А.В., Таранов А.Е., Шевцов С.П., Рудниченко А.А. Физические аспекты работы гребного винта на швартовном режиме. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 3(393). С. 13–24.
8. Турбал В. К., Шпаков В. С., Штумпф В. М. Проектирование морских транспортных судов. Ленинград: Судостроение, 1983. 304 с.
9. Анфимов В. Н., Ваганов Г.И., Павленко В.Г. Судовые тяговые расчёты. Москва: Транспорт, 1988. 223 с.
10. Котлович В.М., Мухин А.Б. Некоторые особенности характеристик взаимодействия гребных винтов с корпусом корабля. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 3(393). С. 25–36.

REFERENCES

1. Bugalski T., Streckwall H., Szantyr J. A. Critical review of propeller performance scaling methods, based on model experiments and numerical calculations. Polish maritime research. 2013. No. 4(80). pp. 71-79.
2. Sawale A., Archana D., Seshank C. Design and Analysis of Propeller. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 455. 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/455/1/012018>.
3. Yu J., Zhou B., Liu H., Han X., Hu G., Zhang T. Study of Propeller Vortex Characteristics under Loading Conditions. Symmetry 2023. Vol. 15. 445. <https://doi.org/10.3390/sym15020445>.
4. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Gidrodinamicheskoe soprotivlenie sistem iz sterzhnej i nitej* [Hydrodynamic resistance of systems made of rods and threads]. Kaliningrad, Izdatel'stvo: FGBOU VPO «KGTU», 2015. 192 p.
5. Solovyeva Ya. *Sozdanie sudovyh dvizhitelej s ponizhennoj vibroaktivnost'yu* [Development of low-vibration marine propellers]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021. Special Issue 2, pp. 40–43.
6. Lebedeva, Marina P., Leonid I. Vishnevskii *Sily na grebnom vinte manevriruyushchego sudna* [Forces on the manoeuvring ship propeller]. - Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova. 2019. Vol. 11, No.3, pp. 554-564.
7. Pustoshny A., Taranov A., Shevtsov S., Rudnichenko A. *Fizicheskie aspekty raboty grebnogo vinta na shvartovnom rezhime* [Physical aspects of propeller operation at bollard pull]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. No. 3(393), pp. 13–24.
8. Turbal V. K., SHpakov V. S., SHtumpf V. M. *Proektirovanie morskikh transportnyh sudov* [Design of marine transport vessels]. Leningrad: Shipbuilding, 1983. 304 p.
9. Anfimov V. N., Vaganov G.I., Pavlenko V.G. *Sudovye tyagovye raschyoty* [Ship traction calculations]. Moscow: Transport, 1988. 223 p.
10. Kotlovich V.M., Mulin A.B. *Nekotorye osobennosti harakteristik vzaimodejstviya grebnyh vintov s korpusom korablya* [Some features of the characteristics of the interaction of propellers with the hull of the ship]. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. No. 3(393), pp. 25–36.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горянский Геннадий Степанович – кандидат технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет (236000, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: gennadij.goryanskij@klgtu.ru)

Мушенков Андрей Андреевич – студент, Калининградский государственный технический университет (236000, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: andrej.mushenkov@klgtu.ru)

Великанов Николай Леонидович – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236000, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Goryanskij Gennadij Stepanovich – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Kaliningrad State Technical University (236000, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: gennadij.goryanskij@klgtu.ru)

Mushenkov Andrej Andreevich – Student, Kaliningrad State Technical University (236000, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: andrej.mushenkov@klgtu.ru).

Velikanov Nikolaj Leonidovich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236000, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 10.02.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024, принята к публикации 25.02.2024.

The article was submitted 10.02.2024; approved after reviewing 19.02.2024; accepted for publication 25.02.2024.