

УДК 629.5.035.5
EDN: DTXAQZ

Д.С. Рябченко^{1, 2, 3}, К.Е. Сазонов^{2, 3} 

¹ СПб ГБПОУ «Петровский колледж», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

³ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПОРА ГРЕБНОГО ВИНТА ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОТДЕЛЬНОЙ ЛЬДИНОЙ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является ударное взаимодействие гребного винта с отдельной льдиной в тертых льдах. Основные цели – анализ научных работ, выполненных в данном направлении, и разработка подхода к определению дополнительного ледового упора винта, возникающего при ударе льдины о лопасть.

Материалы и методы. Анализ данных литературных источников и материалов научно-исследовательских работ.

Основные результаты. Разработана методика расчета импульса удара, средней силы и ее проекции на ось винта. Для рассмотренного режима получены распределения кинематических параметров, импульса и дополнительного упора по радиусу лопасти. Показано, что вклад в упор возрастает от ступицы к периферии лопасти.

Закключение. Приведен анализ процесса ударного взаимодействия лопасти гребного винта с относительно небольшим обломком льда. Показано, что при таком взаимодействии возникает ударный импульс, который в большинстве случаев приводит к появлению дополнительного ледового упора, способствующего движению судна в ледовых условиях. Учет этого упора важен для определения параметров ледовой ходкости судна в тертых льдах.

Ключевые слова: гребной винт, ледовый упор, ударное взаимодействие, тертый лед, импульс, ледовая ходкость.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.035.5
EDN: DTXAQZ

D.S. Ryabchenko^{1, 2, 3}, K.E. Sazonov^{2, 3} 

¹ Petrovsky College, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

³ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DETERMINATION OF PROPELLER THRUST AT IMPACT WITH A SINGLE ICE FLOE

Object and purpose of research. The object of research is impact of the ship propeller against a single ice floe in brash ice. The purpose is to analyze the background research and develop an approach for determination of an extra propeller thrust arising due to impact on the ice floe.

Materials and methods. Analysis and review of source literature and research studies in this field.

Main results. A method is developed to calculate the impact pulse, average force and force projection on the propeller axis. Distribution of kinematic parameters, pulse and additional propeller thrust over the blade radius is determined for these operating conditions. It is shown that the thrust is increased from the hub to blade periphery.

Conclusion. Analysis of the propeller blade impact on a relatively small ice fragment is presented. It is shown that this interaction causes an impact pulse, which in most cases induces an extra thrust contributing to the ship advance in brash ice. It is important to include this thrust in ship propulsion estimations for operations in brash ice environment.

Keywords: propeller, ice-induced thrust, impact, brash ice, pulse, propulsion in ice.

The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Рябченко Д.С., Сазонов К.Е. Определение упора гребного винта при ударном взаимодействии с отдельной льдиной. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 3(417): 21–26.

For citations: Ryabchenko D.S., Sazonov K.E. Determination of propeller thrust at impact with a single ice floe. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 3(417): 21–26 (in Russian).

Введение

Introduction

Исследования взаимодействия гребного винта судна с плавающими предметами, в т.ч. льдом, проводятся довольно давно [1–6 и др.]. Основной целью этих работ является изучение ледового момента [7], действующего на движитель при его взаимодействии со льдом, что обусловлено необходимостью обеспечения безопасной эксплуатации энергетической установки судна и прочностных характеристик валопровода.

Проводились также исследования силового воздействия льда на лопасти гребных винтов с целью расчета их прочности – например, работы [8, 9]. Изучению же ледового упора гребного винта с точки зрения его влияния на ходовые качества судна практически не уделялось внимания.

Известно, что при взаимодействии гребного винта со льдом могут протекать два различных физических процесса: 1) удар и отбрасывание относительно небольшой по размерам льдины; 2) фрезерование, которое реализуется при внедрении лопасти винта в лед [10].

Для определенности будем считать, что процесс фрезерования наступает, когда гребной винт взаимодействует со льдом более чем четырьмя лопастями. Последний из упомянутых процессов приводит к наибольшим значениям нагрузки на движитель, поэтому его изучению уделено наибольшее внимание. Именно процессы фрезерования льда обычно анализируются при проведении натурных испытаний судов и при модельных испытаниях в ледовых бассейнах [11].

В небольшом количестве работ, в которых рассматривался ледовый упор гребного винта, изучался процесс фрезерования [6, 12, 13]. В [6] ледовый

упор определялся методами численного моделирования. Приведенные там значения упоров, по мнению авторов, являются сильно завышенными, что, скорее всего, объясняется использованной моделью разрушения льда. Наибольший интерес представляют работы [12, 13], где приведены данные модельных экспериментов в ледовом бассейне, из которых следует, что при фрезеровании льда гребным винтом наблюдается некоторое увеличение упора.

Ударное воздействие относительно небольших кусков льда, характерный размер которых сравним с радиусом лопасти, практически никогда (за исключением [3]) не рассматривается. Тем не менее такой сценарий взаимодействия движителя со льдом реализуется довольно часто, например, при движении судна в тертых льдах.

В данной работе предпринята попытка, которая во многом базируется на [3], рассмотреть, как влияет ударная нагрузка на лопасть движителя с точки зрения возникновения ледового упора винта.

Кинематические условия ударного воздействия

Kinematic conditions of impact

Введем в рассмотрение традиционную цилиндрическую систему координат $Ox\theta r$, у которой ось Ox направлена в направлении движения судна. Рассмотрим скорости профиля лопасти, расположенного на некотором радиусе r , который получен развертыванием на плоскость сечения лопасти соосным с ней цилиндром. При построении плана скоростей вызванные работой гребного винта скорости не учитываются, т.к. предполагается, что они не могут заметно повлиять на движение обломка льда, взаимодействующего с лопастью.

На рис. 1 представлен план скоростей, нарисованный в обратном движении. Здесь: v_p – скорость судна; $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения профиля; r – радиус, на котором расположен профиль; n – частота вращения гребного винта, об/с; v_l – результирующая скорость, натекающая на профиль.

На рисунке также показаны два основных угла, характеризующие кинематику процесса: шаговый угол φ и угол поступи β .

Шаговый угол задается выражением:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{P/D}{\pi \bar{r}} \right], \quad (1)$$

где P/D – шаговое отношение гребного винта; $\bar{r} = r/R$ – относительный радиус профиля; R – радиус винта.

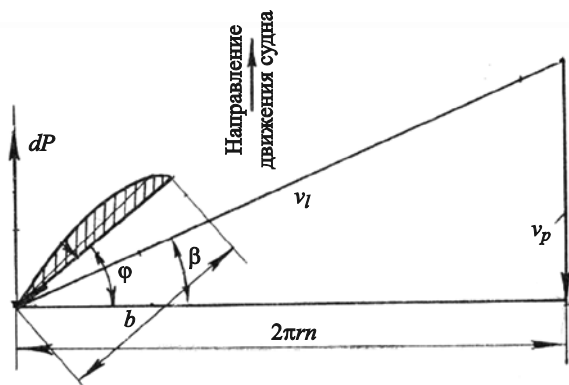


Рис. 1. План скоростей, действующих на профиль лопасти

Fig. 1. Velocities acting on the blade shape

Угол поступи определяется как

$$\beta = \arctg \left[\frac{v_p}{2\pi r n} \right] = \arctg(J / \pi), \quad (2)$$

где $J = \frac{v_p}{nD}$ – относительная поступь.

Если бы профиль лопасти был плоской пластиной, то условием возникновения положительного импульса (направленного в сторону движения судна) при ударе льдины о профиль стало $\beta < \varphi$, что дает

$$J < P / D. \quad (3)$$

Условие (3) является ориентировочным. Реальный профиль сечения лопасти имеет некоторую конечную толщину, поэтому возникновение отрицательных импульсов может происходить в зависимости от геометрических характеристик профиля при значениях относительной поступи меньших, чем это следует из соотношения (3).

Определение импульса удара льдины о лопасть

Determination of pulse due to ice impact

Для оценки влияния ударного взаимодействия отдельной льдины с гребным винтом на его упор введем импульсный подход к расчету сил, действующих на лопасть в точке удара A (рис. 2).

Относительная нормальная составляющая скорости натекания льдины на профиль:

$$V_n = V_R \sin(\varphi - \beta), \quad (4)$$

где V_n – нормальная составляющая скорости льдины относительно профиля; V_R – результирующая скорость натекания на профиль.

Знак $(\varphi - \beta)$ определяет сторону удара (при $\beta < \varphi$ – положительный импульс, увеличивающий упор).

Уравнение изменения количества движения (импульса) льдины массы m_l в направлении удара:

$$I_n = \int_0^t F_n dt = m_l (v'_n - v_n), \quad (5)$$

где v_n , v'_n – компоненты скорости льдины до и после удара; t – длительность контакта, I_n – нормальный импульс, передаваемый льдине; F_n – средняя сила реакции на лопасть во время удара.

Принимая массу лопасти и валопинии значительно больше массы льдины (лопасть практически не меняет скорость), а удар близким к неупругому (коэффициент восстановления $e \approx 0,1-0,3$ для льда – сталь), нормальная относительная скорость после

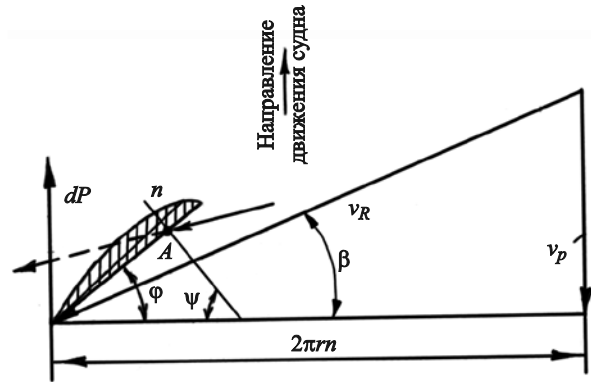


Рис. 2. Модель удара льдины о лопасть
Fig. 2. Model of blade impact on ice

удара близка к нулю. Тогда величина импульса на льдину:

$$I_n = m_l \cdot V_n \cdot (1 + e). \quad (6)$$

Импульс, передаваемый лопастью льдине, равен I по нормали. Реактивный импульс на лопасть $I_{\text{лоп}} = -I$.

Средняя сила реакции на лопасть во время удара:

$$F = \frac{I_{\text{лоп}}}{t} = -\frac{I_n}{t}. \quad (7)$$

Проекция этой силы на ось OX (осевое направление движения судна, дающее вклад в упор):

$$\Delta T_1 = F_x = F \cdot \cos \psi, \quad (8)$$

где ψ – угол между нормалью к профилю и осью OX .

Для геометрии профиля (хорда под углом φ к плоскости вращения) нормаль имеет компоненту $\cos \varphi$ по оси OX и $-\sin \varphi$ по окружному направлению. Таким образом,

$$F_x = \frac{I}{t} \cdot \cos \varphi. \quad (9)$$

Для получения суммарного ледового упора на винт разбиваем лопасть на относительные радиусы $\bar{r}$ с шагом $\Delta \bar{r} \geq h_n$ (толщина/размер льдины). На каждом сечении рассчитываем импульс I и F_x для одного профиля. Умножаем на число лопастей, поскольку при одинаковом размере льдинок воздействие симметрично на все лопасти. Суммируем/интегрируем вклады по радиусу лопасти. Учитываем частоту ударов (зависит от концентрации тертого льда и скорости судна).

Таблица 1. Определение параметров импульса удара льдины о лопасть (льдина 0,5 м)

Table 1. Determination of blade impact pulse on ice floe of 0.5 m

Радиус (м)	r/R	φ (°)	β (°)	V_n (м/с)	I (Н·с)	F (Н)	ΔT_1 (Н)
1,050	0,525	23,0	6,9	3,31	455,8	45 583	41 960
1,350	0,675	18,3	5,4	3,42	470,2	47 022	44 652
1,650	0,825	15,1	4,4	3,48	478,1	47 805	46 152
1,950	0,975	12,9	3,7	3,51	482,7	48 273	47 060

Суммарный дополнительный ледовый упор $\Delta T_{\text{лед}} = 719,3$ кН

Таблица 2. Определение параметров импульса удара льдины о лопасть (льдина 1,0 м)

Table 2. Determination of blade impact pulse on ice floe of 1.0 m

Радиус (м)	r/R	φ (°)	β (°)	V_n (м/с)	I (Н·с)	F (Н)	ΔT_1 (Н)
1,200	0,600	20,4	6,1	3,37	3713,6	371 364	348 133
1,900	0,900	13,9	4,0	3,49	3845,3	384 535	373 265

Суммарный дополнительный ледовый упор $\Delta T_{\text{лед}} = 2885,6$ кН

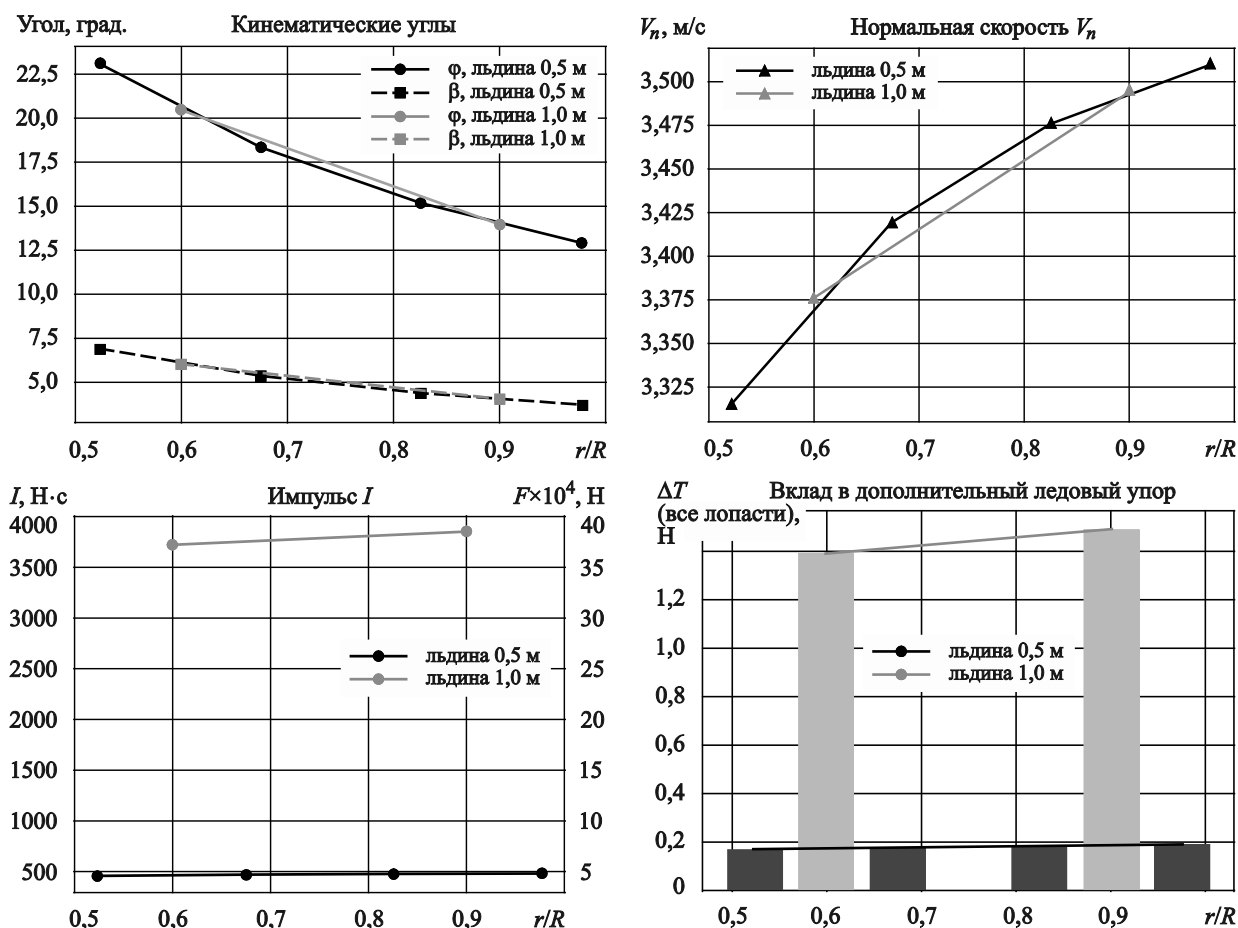


Рис 3. Распределение параметров удара льдины по радиусу лопасти

Fig. 3. Distribution of ice floe impact parameters over blade radius

Дополнительный ледовый упор от ударных взаимодействий:

$$\Delta T_{\text{лед}} = z \sum \Delta T_1 \cdot k, \quad (10)$$

где k – коэффициент, учитывающий вероятность/число одновременных ударов (для тертого льда – по плотности льдин, одинаковый размер льдинок 1–3 взаимодействия на лопасть); z – число лопастей винта.

Полный упор винта в ледовых условиях $T = T_0 + \Delta T_{\text{лед}}$, где T_0 – гидродинамический упор в чистой воде. Как правило, при ударном взаимодействии происходит уменьшение частоты вращения движителя, поэтому T_0 необходимо вычислять с учетом изменения частоты вращения. Соответствующий коэффициент упора:

$$K_T^{\text{лед}} = \frac{T}{\rho n^2 D^4}. \quad (11)$$

Результаты расчетов

Results of calculations

Для количественной оценки проведем расчеты для винта серии Wageningen B4.70 (табл. 1, 2). На рис. 3 показаны графики распределения параметров удара льдины 0,5 м и 1 м.

Для получения суммарного ледового упора на винт лопасть разбивается на относительные радиусы, зона ступицы исключается. Расчет выполнен для гипотетического случая, когда все льдины одновременно идут торцом. В реальных условиях количество и характер одновременных контактов носит вероятностный характер. Представленный подход может быть использован для гребных винтов, геометрия которых отличается от винтов рассмотренной серии.

Параметры расчета:

- винт: $D = 4,0$ м, $z = 4$, $P/D = 0,7$;
- режим: $n = 1,8$ об/с, $v_p = 1,44$ м/с, $J = 0,2$;
- льдина 1: размер 0,5 м, $e = 0,2$, толщина льда 0,3 м, $m = 115$ кг;
- льдина 2: размер 1,0 м, $e = 0,2$, толщина льда 0,6 м, $m = 915$ кг;
- длительность контакта: $\tau = 0,01$ с.

Выводы

Conclusions

Приведенные расчеты показали, что ударное взаимодействие гребного винта с отдельными льдинами способно формировать заметный импульс, который приводит к увеличению суммарного упора движителя. Наблюдается выраженный рост вклада в дополнительный упор от ступицы к периферии лопасти. Это обусловлено увеличением окружной

скорости при возрастании радиуса, что приводит к увеличению импульса взаимодействия.

Таким образом, основная доля дополнительного ледового упора формируется на периферии лопасти. Результаты работы показывают, что ударное взаимодействие с отдельными льдинами не является пренебрежимо малым фактором и должно учитываться при анализе работы гребного винта в тертых льдах.

Дальнейшие исследования следует направить на развитие модели для более реальных условий работы винта в тертом льду. Необходимо учитывать многократные и случайные удары льдин о лопасти, поскольку в реальной эксплуатации взаимодействие носит непрерывный и вероятностный характер.

Список использованной литературы

1. Беляев В.А. Об ударе твердого предмета о лопасть гребного винта // Труды Горьковского политехнического ин-та им. А.А. Жданова. 1958. Т. 14, вып. 1. С. 17–22.
2. Ягодкин В.Я. Аналитическое определение момента сопротивления вращению гребного винта при его взаимодействии со льдом // Проблемы Арктики и Антарктики. 1963. Вып. 13. С. 79–88.
3. Яконовский С.В. Внешние силы, действующие на лопасть гребного винта при ударе о лед // Материалы по обмену опытом / НТО им. акад. А.Н. Крылова. Ленинград : Судостроение, 1964. Вып. 62 : Судовые движители. С. 117–131.
4. Belyashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades // Proceeding of 12th International conference on port and ocean engineering under Arctic conditions (POAC'93). Hamburg : Hamburg Ship Model Basin, 1993. Vol. 1. P. 359–368.
5. Koskinen P., Soininen H., Jussila M. New propeller ice load models // Integrated numerical and experimental methods in ship design. Espoo : VTT Technical research centre of Finland, 1996. P. 21–34 (VTT Symposium ; No. 168).
6. Propeller-ice contact modeling with peridynamics / Ye L.Y., Wang C., Chang X., Zhang H.Y. // Ocean Engineering. 2017. Vol. 139. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.037.
7. Сазонов К.Е. Проблема определения ледового момента на движителе // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 2(404). С. 68–78. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-68-78.
8. Игнатьев М.А. Гребные винты судов ледового плавания : (Особенности проектирования). Ленинград : Судостроение, 1966. 114 с.
9. Андрияшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов : дис. ... д-ра

- техн. наук : 05.08.01 / Андрияшин А.В. ; С.-Петерб. гос. мор. техн. ун-т. Санкт-Петербург, 2006. 254 с.
10. Сазонов К.Е. К выбору сценариев взаимодействия гребных винтов со льдом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2013. Вып. 74(358). С. 147–158.
 11. Сазонов К.Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2021. 306 с.
 12. Ice loads acting on a model podded propeller blade / Wang J., Akinturk A., Jones S.J. [et al.] // Journal of off-shore mechanics and Arctic engineering. 2007. Vol. 129, No. 3. P. 236–244. DOI: 10.1115/1.2426993.
 13. Experimental study on a model azimuthing podded propulsor in ice / Wang J., Akinturk A., Bose N. [et al.] // Journal of marine science and technology. 2008. Vol. 13. P. 244–255. DOI: 10.1007/s00773-008-0024-3.
 14. Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. Ленинград : Судостроение, 1988. 294, [1] с.
 9. Andryushin A.V. Theory of propeller/ice interaction. Service strength of propulsion system elements in ice-going ships and icebreakers : Dr. Sci. (Eng.) Dissertation : 05.08.01 / Andryushin A.V. ; St. Petersburg State Marine Technical University. St. Petersburg, 2006. 254 p. (in Russian).
 10. Sazonov K.E. On the choice of propeller/ice interaction scenarios // Transactions of the Krylov State Research Center. 2013. Vol. 74(358). P. 147–158 (in Russian).
 11. Sazonov K.E. Model and full-scale experiments in marine ice engineering. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2021. 306 p. (in Russian).
 12. Ice loads acting on a model podded propeller blade / Wang J., Akinturk A., Jones S.J. [et al.] // Journal of off-shore mechanics and Arctic engineering. 2007. Vol. 129, No. 3. P. 236–244. DOI: 10.1115/1.2426993.
 13. Experimental study on a model azimuthing podded propulsor in ice / Wang J., Akinturk A., Bose N. [et al.] // Journal of marine science and technology. 2008. Vol. 13. P. 244–255. DOI: 10.1007/s00773-008-0024-3.
 14. Artyushkov L.S., Achkinadze A.Sh., Rusetsky A.A. Ship propulsors. Leningrad : Sudostroenie, 1988. 294, [1] p. (in Russian).
- ## References
1. Belyaev V.A. On impact of a solid body on the propeller blade // Transactions of Gorky Polytechnic Institute named after A.A. Zhdanov. 1958. Vol. 14, No. 1. P. 17–22 (in Russian).
 2. Yagodkin V.Ya. Analytical estimation of anti-torque moment in propeller/ice interaction // Problems of Arctic and Antarctic Research. 1963. Vol. 13. P. 79–88 (in Russian).
 3. Yakonovsky S.V. External forces on the propeller blade at impact on ice // Experience exchange materials / Scientific & Technical Society named by acad. A.N. Krylov. Leningrad : Sudostroenie. 1964. Vol. 62 : Ship propulsors. P. 117–131 (in Russian).
 4. Belyashov V.A. Method for calculating ice loads encountered by propeller blades // Proceeding of 12th International conference on port and ocean engineering under Arctic conditions (POAC'93). Hamburg : Hamburg Ship Model Basin, 1993. Vol. 1. P. 359–368.
 5. Koskinen P., Soininen H., Jussila M. New propeller ice load models // Integrated numerical and experimental methods in ship design. Espoo : VTT Technical research centre of Finland, 1996. P. 21–34 (VTT Symposium ; No. 168).
 6. Propeller-ice contact modeling with peridynamics / Ye L.Y., Wang C., Chang X., Zhang H.Y. // Ocean Engineering. 2017. Vol. 139. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.037.
 7. Sazonov K.E. Determination of ice-induced anti-torque of propeller // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023. Vol. 2(404). P. 68–78. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-2-404-68-78 (in Russian).
 8. Ignatiev M.A. Propellers of ice-going ships. (Design specifics). Leningrad : Sudostroenie, 1966. 114 p. (in Russian).
- ## Сведения об авторах
- Рябченко Данил Сергеевич, преподаватель СПб ГБПОУ «Петровский колледж»; аспирант кафедры океанотехники и морских технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 194363, Россия, Санкт-Петербург, Ольгинская дорога, д. 3/20. E-mail: d.rjabchenko@gmail.com.
- Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; профессор кафедры океанотехники и морских технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.
- ## About the authors
- Danil S. Ryabchenko, Lecturer of Petrovsky College, Postgraduate student, Ocean Engineering and Marine Technology Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3/20, Olginskaya doroga, St. Petersburg, Russia, post code 194363. E-mail: d.rjabchenko@gmail.com.
- Kirill E. Sazonov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Ocean Engineering and Marine Technology Department, St. Petersburg State Marine Technical University; Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kirsaz@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3364-1309>.

Поступила / Received: 25.03.26
Принята в печать / Accepted: 27.07.26
© Рябченко Д.С., Сазонов К.Е., 2026