

ИЗМЕНЕНИЕ УПОРА ГРЕБНОГО ВИНТА ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ОТДЕЛЬНОЙ ЛЬДИНОЙ

Д.С. Рябченко, К.Е. Сазонов (Санкт–Петербург)

Введение

Эксплуатация судов в ледовых условиях сопровождается интенсивным силовым взаимодействием гребных винтов с плавающими ледяными образованиями. Традиционно фокус исследований в данной области был сосредоточен на оценке ледового момента и циклических нагрузок, действующих на валолинию, с целью обеспечения прочности пропульсивного комплекса и предотвращения аварийных остановок главного двигателя [1–3]. Значительное внимание уделялось пиковым значениям контактных усилий при фрезеровании льда, когда лопасть внедряется в массив ледяного поля и разрушает его резанием [4].

Однако вопрос о влиянии взаимодействия со льдом на ледовый упор движителя изучен гораздо слабее. Имеющиеся немногочисленные работы, посвящённые этой теме, как правило, описывают именно режим фрезерования [5, 6, 7]. При этом анализ ударного контакта с отдельными, относительно небольшими обломками льда, соизмеримыми по размерам с лопастью, практически не рассматривался, за исключением единичных публикаций. Между тем именно такой характер нагружения типичен при плавании в тертых льдах, где винт подвергается не непрерывному резанию, а серии ударных импульсов. Актуальность задачи обусловлена необходимостью уточнения ходовых качеств судна в подобных условиях, так как дополнительные импульсы способны существенно изменить результирующий упор, влияющий на ледовое сопротивление корпуса.

В данной работе предпринята попытка на основе импульсного подхода количественно оценить вклад ударных нагрузок в формирование дополнительного «ледового» упора гребного винта при его работе в среде, заполненной отдельными небольшими льдинами.

Метод расчета дополнительного ледового упора при ударе

Рассматривается локальное ударное взаимодействие профиля лопасти, расположенного на радиусе, с отдельной льдиной в обращенном движении (рис. 1). Полагается, что вызванные работой винта индуктивные скорости пренебрежимо малы в сравнении со скоростью движения обломка и не успевают повлиять на кинематику удара.

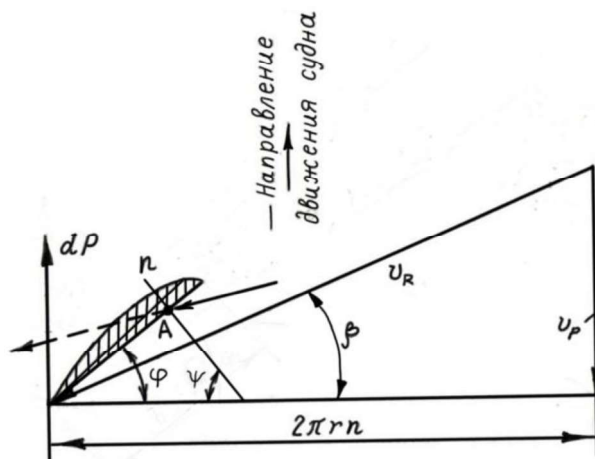


Рис. 1. Модель удара льдины о лопасть

Для оценки влияния ударного взаимодействия отдельной льдины с гребным винтом на его упор введём импульсный подход к расчёту сил, действующих на лопасть в точке удара А (рис. 1).

Рис. 1 иллюстрирует модель ударного взаимодействия отдельной льдины с профилем лопасти гребного винта в обращённой системе координат. На схеме показана лопасть в виде заострённого профиля, расположенного под шаговым углом φ к плоскости вращения. V_n – нормальная составляющая скорости льдины относительно профиля, V_R – результирующая скорость натекания на профиль. Льдина движется относительно лопасти и ударяется в точку А на входной кромке профиля. В момент удара возникает нормальная сила реакции n (перпендикулярно поверхности профиля в точке контакта), которая проецируется на ось OX (продольную ось винта). Положительная осевая составляющая F_x этой силы и создаёт дополнительный ледовый упор, направленный вперёд, в сторону движения судна.

Относительная нормальная составляющая скорости натекания льдины на профиль:

$$V_n = V_R \sin(\varphi - \beta), \quad (1)$$

где V_n – нормальная составляющая скорости льдины относительно профиля;

V_R – результирующая скорость натекания на профиль;

φ – шаговый угол;

β – угол поступи.

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

$$I_n = \int_0^t F_n dt = m_l (v_n' - v_n), \quad (2)$$

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 валовинии 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 удара близка к нулю. Тогда величина импульса на льдину:

$$I_n = m_l \cdot V_n \cdot (1 + e). \quad (3)$$

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

Средняя сила реакции на лопасть во время удара:

$$F = \frac{I_{лон}}{t} = -\frac{I_n}{t} \quad (4)$$

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

$$\Delta T_1 = F_x = F \cdot \cos \psi, \quad (5)$$

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:

$$F_x = \frac{I}{t} \cdot \cos \varphi \quad (6)$$

Для получения суммарного ледового упора на винт разбиваем лопасть на части с относительными радиусами $\bar{r}$ с шагом $\Delta r \geq h_l$ (толщина/размер льдины). На каждом сечении рассчитываем импульс I и F_x для одного профиля. При симметричном

воздействию на все лопасти и частоте ударов, определяемой концентрацией льдин, полный дополнительный упор найдется как:

$$\Delta T_{лед} = z \sum \Delta T_1 \cdot k, \quad (7)$$

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 $T = T_0 + \Delta T_{лед}$, 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:

$$K_T^{лед} = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (8)$$

Для количественной оценки проведем расчеты для винта серии *Wageningen B4.70* (табл. 1, 2).

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 расчёта:

винт: $D = 4.0$ м, $z = 4$, $P/D = 0.7$,

режим: $n = 1.8$ об/с, $v_p = 1.44$ м/с, $J = 0.200$,

льдина 1: размер 0.25 м, $e = 0.2$, толщина льда 0.15 м, $m = 14$ кг,

льдина 2: размер 0.75 м, $e = 0.2$, толщина льда 0.45 м, $m = 400$ кг,

длительность контакта: $\tau = 0.01$ с.

Таблица 1

Параметры импульса удара льдины о лопасть (льдина 0,25 м)

Радиус (м)	r/R	$\varphi(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	V_n (м/с)	I (Н·с)	F (Н)	ΔT_1 (Н)
0,975	0,487	24,60	7,40	3,27	56,30	5630	5120
1,125	0,562	21,60	6,50	3,35	57,50	5755	5350
1,275	0,637	19,30	5,70	3,40	58,40	5843	5516
1,425	0,713	17,40	5,10	3,44	59,10	5908	5638
1,575	0,788	18,80	4,60	3,46	59,60	5956	5731
1,725	0,863	14,50	4,20	3,49	59,90	5993	5802
1,875	0,938	13,40	3,90	3,50	60,20	6022	5859

Таблица 2

Параметры импульса удара льдины о лопасть (льдина 0,75 м)

Радиус (м)	r/R	$\varphi(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	V_n (м/с)	I (Н·с)	F (Н)	ΔT_1 (Н)
1,125	0,562	21,60	6,50	3,35	1553,80	155377	144457
1,575	0,787	15,80	4,60	3,46	1608,00	160810	154736

На рис. 2, 3 показаны графики распределения вклада в упор от удара льдины 0,25 м и 0,75 м.

Суммарный дополнительный ледовый упор $\Delta T_{\text{лед}} = 156 \text{ кН}$ для льдины 0,25 м и $\Delta T_{\text{лед}} = 1197 \text{ кН}$ для льдины 0,75 м.

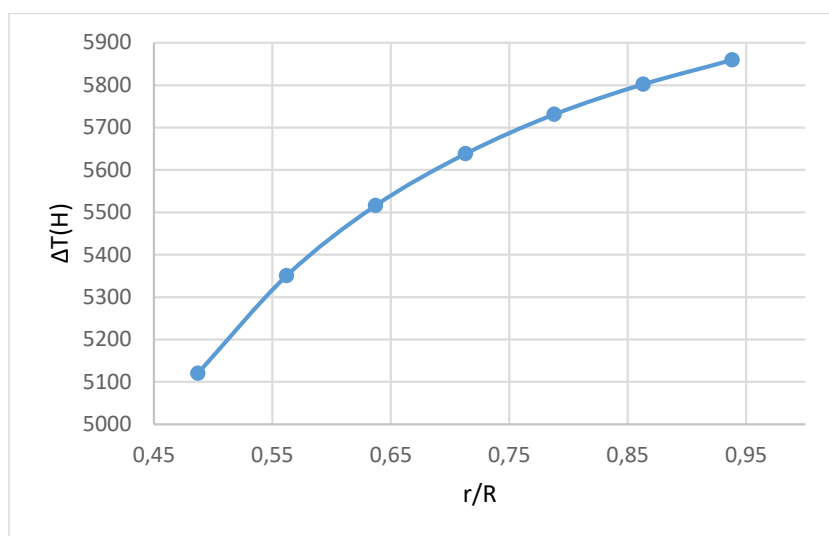


Рис. 2. Вклад в дополнительный ледовый упор по радиусу лопасти (льдина 0,25 м)

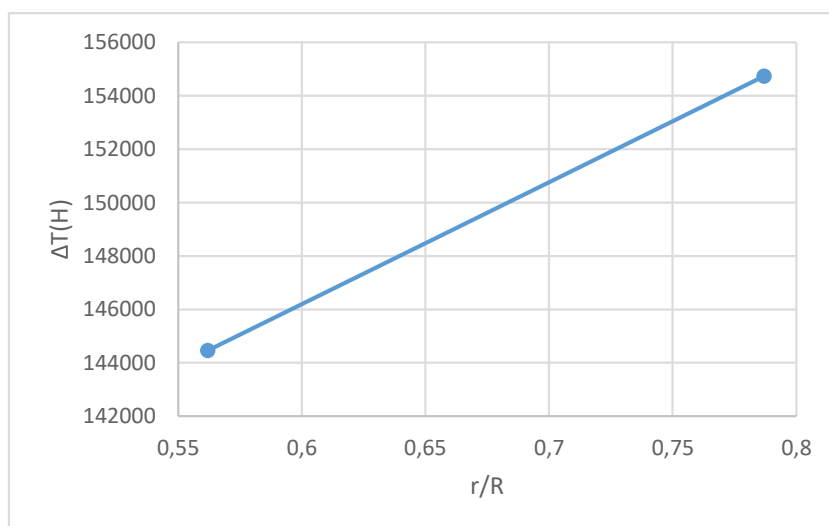


Рис. 3. Вклад в дополнительный ледовый упор по радиусу лопасти (льдина 0,75 м)

Результаты и кинематические условия расчета

Приведенные расчеты показали, что ударное взаимодействие гребного винта с отдельными льдинами способно формировать заметный импульс, который приводит к увеличению суммарного упора движителя. Даже относительно небольшие обломки, благодаря высокой скорости соударения, создают импульс, проекция которого на ось винта положительна на всех рассмотренных радиусах. 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.

Применимость предложенной модели напрямую связана с кинематическими условиями натекания, детальный вывод которых уместно дать именно при обсуждении результатов. План скоростей в обращенном движении (рис. 4) связывает поступательную скорость судна и окружную скорость.

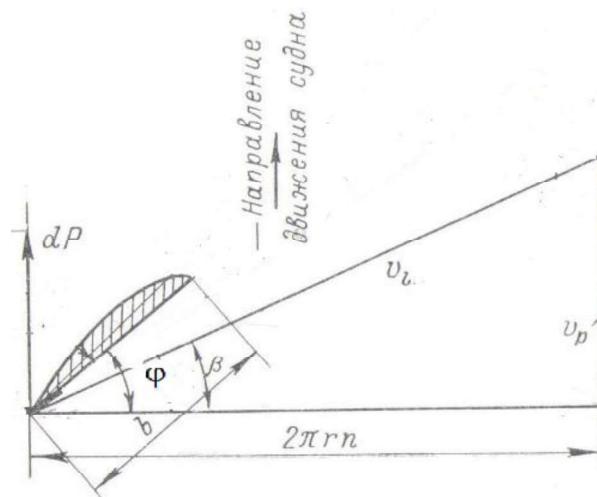


Рис. 4. План скоростей, действующих на профиль лопасти

На рис. 4 представлен план скоростей, нарисованный в обращенном движении, который поясняет кинематические условия взаимодействия льдины с профилем лопасти. В отличие от рис. 1, где показана динамика самого ударного контакта, рис. 4 представляет треугольник скоростей, связывающий основные векторы в системе, связанной с лопастью. Здесь v_p – поступательная скорость судна, $2\pi rn$ – окружная скорость профиля на радиусе r , v_l – результирующая скорость натекания льдины на профиль. Угол φ соответствует шаговому углу лопасти, а угол β – углу поступи, определяемому режимом работы винта.

Данный план скоростей позволяет наглядно продемонстрировать, что при характерных ледовых режимах ($\beta < \varphi$) нормаль к профилю имеет положительную проекцию на ось винта. Благодаря этому импульс ударного воздействия льдины создаёт дополнительную силу, направленную вперёд и увеличивающую суммарный упор гребного винта. Именно анализ соотношения углов φ и β объясняет, почему на большей части лопасти ударное взаимодействие способствует росту тяги.

Шаговый угол φ задается геометрией винта, а угол поступи β – режимом работы:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{P/D}{\pi \bar{r}} \right], \quad (9)$$

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

Угол поступи определяется как

$$\beta = \arctg \left[\frac{v_p}{2\pi rn} \right] = \arctg(J/\pi), \quad (10)$$

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

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

$$J < \frac{P}{D}. \quad (11)$$

Из этой формулы следует, что, если точка удара смещается к ступице, то при ударе может возникнуть импульс, снижающий тягу движителя.

Условие (11) 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 (11). Расчеты для различных размеров льдин показывают нелинейную, близкую к кубической, зависимость дополнительного упора от линейного размера обломка, что вытекает из увеличения массы льдины и площади контакта. При этом даже многократные удары мелких льдин вносят вклад, сопоставимый с единичным ударом крупной льдины, что характерно для плавания в тертых льдах высокой сплоченности.

Выводы

Ударное взаимодействие гребного винта с отдельными льдинами является значимым фактором, способным формировать существенный дополнительный упор в условиях тертых льдов. Анализ кинематических условий показал, что на основном эксплуатационном режиме для ледового плавания вектор импульса удара направлен в сторону движения судна, увеличивая тягу. Основной вклад в дополнительный ледовый упор обеспечивают периферийные сечения лопасти из-за высоких окружных скоростей. Увеличение размеров льдин приводит к резкому росту генерируемого импульса пропорционально массе обломка. Результаты работы подчеркивают необходимость учета данного эффекта при расчетах ходкости судов 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.

Литература

1. **Андрюшин А.В.** Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов. Дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. – Спб., 2006, 254 с.
2. **Ye L.Y., Wang C., Chang X., Zhang H.Y.** Propeller-ice contact modeling with peridynamics // *Ocean Engineering* 139 (2017) 54–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.037>.
3. **Сазонов К.Е.** К выбору сценариев взаимодействия гребных винтов со льдом. // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2013. № 74 (358). С. 147-158.
4. **Wang J., Akinturk A., Bose N., Jones S.J., Song Y.Y., Chun H.H., Kim M.C.** Experimental study on a model azimuthing podded propulsor in ice. // *J Mar Sci Technol* (2008) 13:244–255. DOI 10.1007/s00773-008-0024-3.
5. **Хлыстова К.Б., Андрюшин А.В., Зуев П.С., Федосеев С.С.** Ледовые нагрузки на гребных винтах и обеспечение их прочности для судов активного ледового плавания с применением современных методов компьютерного моделирования. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 44–52.
6. **Андрюшин А.В., Хлыстова К.Б.** Проектирование ледокольных гребных винтов с пониженным уровнем ледовых нагрузок. Ледовые нагрузки, расчет прочности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; Специальный выпуск 1: 11–17.
7. **Родионов А.А.** Силовой подход в численном моделировании маломасштабного контактного взаимодействия ледовой среды с внедряющимся индентором / А.А. Родионов, С.В. Рябушкин // *Морские интеллектуальные технологии*. 2024. № 4. Ч. 1. – С. 57-68.