

К.Б. ХЛЫСТОВА, А.В. АНДРЮШИН, П.С. ЗУЕВ, С.С. ФЕДОСЕЕВ
АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ГРЕБНЫХ ВИНТАХ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИХ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ СУДОВ АКТИВНОГО ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено исследование и назначение ледовых нагрузок на гребных винтах (ГВ) для обеспечения их эксплуатационной прочности и повышения работоспособности пропульсивного комплекса судов активного ледового плавания. Разработана уточненная методика по назначению ледовых нагрузок, проектированию и обеспечению прочности ледокольных ГВ, позволяющая регламентировать безопасные режимы эксплуатации из условия обеспечения прочности ГВ.

Ключевые слова: гребной винт, взаимодействие со льдом, прочность, суда двойного действия, винторулевая колонка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Хлыстова К.Б., Андриюшин 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.

УДК 629.565.1:629.5.037.1

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-44-52

K.B. KHLYSTOVA, A.V. ANDRYUSHIN, P.S. ZUEV, S.S. FEDOSEEV
CNII MF, Kavalergardskaya str., 6, St. Petersburg, Russia

ICE LOADS ON PROPELLERS AND ASSURANCE OF PROPELLER STRENGTH FOR ICE-GOING VESSELS USING MODERN COMPUTER SIMULATION TECHNIQUES

Ice loads on propellers are investigated and specified to ensure their operational robustness and improved performance of propulsion systems of ice-going vessels. An updated method is developed for specification of ice loads, design and structural analysis of icebreaker propellers to regulate safe operating modes based on propeller strength requirements.

Key words: propeller, ice interaction, strength, double-acting vessels, propulsion pod.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Khlystova K.B., Andryushin A.V., Zuev P.S., Fedoseev S.S. Ice loads on propellers and assurance of propeller strength for ice-going vessels using modern computer simulation techniques. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 44–52 (in Russian).

UDC 629.565.1:629.5.037.1

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-44-52

Введение

Обеспечение прочности гребных винтов (ГВ) судов ледового плавания и ледоколов является одной из главных задач современного судостроения. В настоящее время эта проблема актуализирована вводом в действие новых высокомоощных арктических ледоколов, крупнотоннажных ледокольных судов, включая суда двойного действия с винторулевыми колонками (ВРК). Интенсивное использование режимов

движения задним ходом в ледовых условиях, рост ледовой ходкости и операционных скоростей приводит к увеличению интенсивности воздействия льда на ГВ, что обуславливает необходимость разработки уточненных методов обеспечения их прочности при проектировании и в эксплуатации.

Для определения ледовых нагрузок на ГВ и обеспечения его прочности в качестве расчетных принимаются режимы фрезерования льда [5]. Режим

взаимодействия льда с остановленным ГВ, режим взаимодействия обломка льда с ГВ при его реверсе (когда направление движения судна не соответствует направлению вращения ГВ) рассматриваются как нерасчетные. Для указанных нерасчетных режимов не удастся обеспечить прочность ГВ и пропульсивного комплекса (ПК) в рамках традиционно принятых требований к их прочным размерам из-за большого уровня ледовых нагрузок.

С целью повышения эффективности и безопасности эксплуатации во льдах нужно минимизировать частоту возникновения нерасчетных случаев, приводящих к перегрузке главного электродвигателя (ГЭД), остановке ГВ и его поломкам. Для обеспечения эксплуатационной прочности ГВ также необходимо регулирование ледовых нагрузок для предотвращения перегрузок и поломок лопастей из-за потери усталостной и статической прочности. При поломке лопасти ГВ на нерасчетных режимах его взаимодействия со льдом, согласно принципу пирамидальной прочности, все остальные элементы ПК в потоке силовых линий (вал, подшипники) должны оставаться неповрежденными (в рабочем состоянии). Решение указанных задач сводится к определению допустимых скоростей движения судна, обеспечивающих безопасный уровень ледового нагружения.

Механизмы взаимодействия лопастей гребного винта со льдом и ледовые нагрузки

На рис. 1 представлена схема фрезерования льда входящей кромкой лопасти ГВ. Угол атаки лопасти ГВ $\alpha(\bar{r})$; \bar{r} – относительный радиус цилиндрического сечения, является основным параметром, определяющим режимы взаимодействия лопасти (ГВ) со льдом. При положительных углах атаки $\alpha(\bar{r}) \geq 0$ реализуются расчетные режимы фрезерования льда. Различают два типа фрезерования. Первый тип соответствует прорезанию льда входящей кромкой (рис. 1, [1]). Основная ледовая нагрузка приложена со стороны засасывающей поверхности, где происходит смятие льда с вытеснением ледового порошка. На лопасть воздействуют аксиальная отрицательная сила F_{ice}^- и сила профильного сопротивления T_{ice} . Второй типа фрезерования соответствует прорезанию льда периферийными сечениями лопасти (рис. 2, [1]) и характерен для швартовых режимов в тяжелых ледовых условиях. Основной контакт происходит со стороны нагнетающей поверхности, что обуславливает появление положительной ледовой силы F_{ice}^+ .

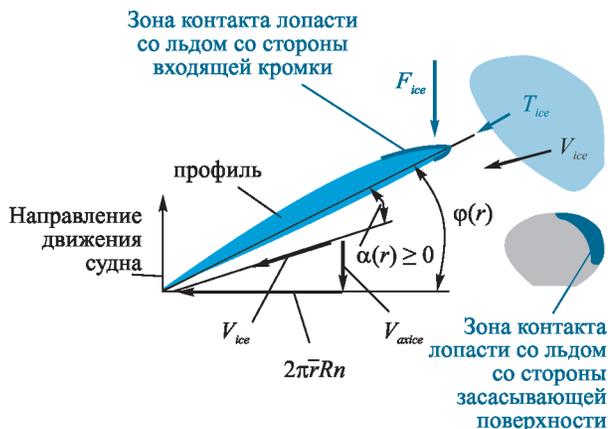


Рис. 1. Первый тип фрезерования льда входящей кромкой лопасти: α – угол атаки профиля; φ – шаговой угол; \bar{r} – относительный радиус профиля; R – радиус ГВ; V_{axial} – аксиальная скорость взаимодействия ГВ со льдом; V_{ice} – скорость взаимодействия профиля со льдом; n – скорость вращения (обороты) ГВ; F_{ice}^- – отрицательная аксиальная ледовая сила; T_{ice} – профильная ледовая сила

Ледовая сила профильного сопротивления T_{ice} определяет момент сопротивления льда вращению ГВ Q_{ice} . Воздействие ледового момента уменьшает скорость вращения ГВ и угол атаки лопасти. При малой скорости вращения ГВ и отрицательных углах атаки $\alpha(\bar{r}) < 0$ контакт со льдом распространяется по всей засасывающей поверхности лопасти (рис. 3а). Последнее вызывает неконтролируемый (резкий) рост ледовой нагрузки на ГВ (включая ледовый момент на ГВ) ГЭД. Перегрузка ГЭД по моменту может привести к остановке ГВ (рис. 3б) и поломке его лопасти [9, 10]. При низких значениях углов атаки возникают ледовые перегрузки ГВ, которые могут инициировать деформацию лопастей и их преждевременное усталостное разрушение [1, 11, 12]. На режимах реверса в тяжелых ледовых условиях может реализоваться ледовый удар «плашмя» (рис. 3в), приводящий к поломке лопасти. На режиме реверса поломка лопасти ГВ происходит без его нагружения ледовым моментом. Наибольшее количество поломок ГВ на ледоколах было зафиксировано при работе на режимах реверса [1, 9].

Обеспечение эксплуатационной прочности гребного винта и работоспособности главного электродвигателя

В процессе эксплуатации ГЭД должен поддерживать заданную мощность, момент и скорость враще-

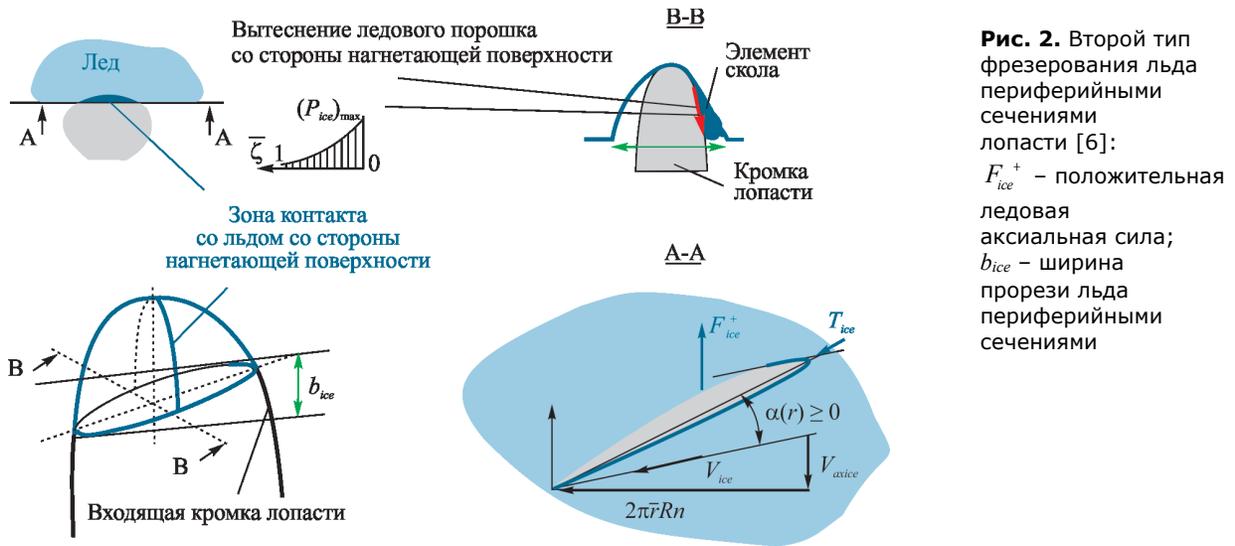


Рис. 2. Второй тип фрезерования льда периферийными сечениями лопасти [6]:
 F_{ice}^+ – положительная ледовая аксиальная сила;
 b_{ice} – ширина прорези льда периферийными сечениями

ния ГВ для обеспечения достаточного упора, а также для предотвращения заклинки ГВ и возможной поломки лопасти.

На рис. 4 представлена принципиальная схема мощности и крутящего момента для ГЭД в зависимости от скорости вращения ГВ, вала. При заданной мощности максимальный крутящий момент ГЭД (Q_{engine}^{\lim}) является одним из главных параметров, определяющих его работоспособность. При эксплуатации момент (Q_{engine}^{\lim}) не должен быть меньше максимального момента на валу (Q_{total}^{\max}) (без крутильных колебаний), см. выражение (1). В этом случае ГЭД работает в проектном режиме при постоянной мощности.

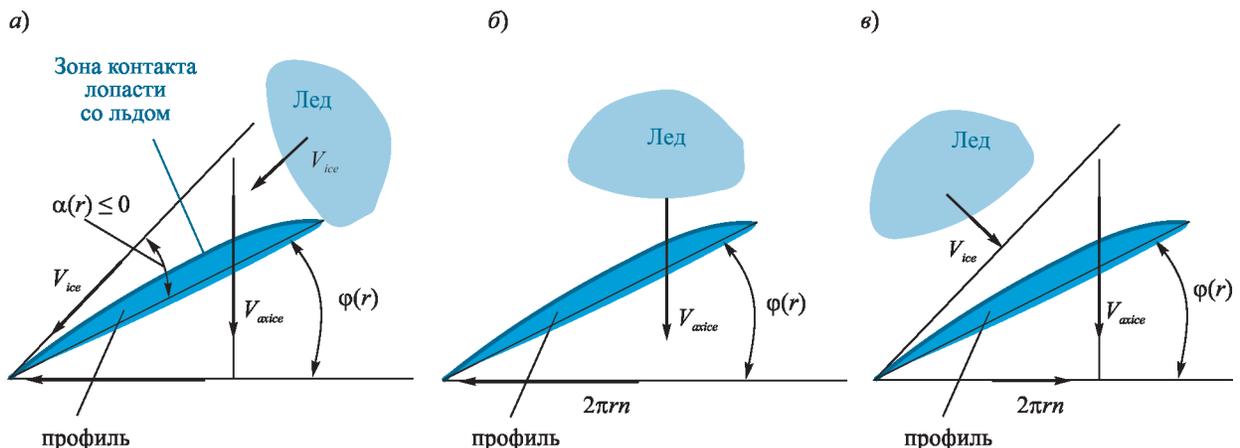
$$(Q_{engine}^{\lim}) \geq \max(Q_{total}), \quad (1)$$

$n \geq n_{\min}$ при заданной спецификационной мощности, где Q_{total} – суммарный момент на валу; $\max(Q_{total})$ – максимальное значение Q_{total} .

Суммарный момент на валу Q_{total} определяется выражением (3).

Если величина момента на валу $\max(Q_{total})$ превосходит (Q_{engine}^{\lim}) , ГЭД не поддерживает постоянной мощности, что вызывает резкое падение скорости вращения ГВ и может стать причиной его остановки при взаимодействии со льдом. Эти ситуации крайне нежелательны, т.к. приводят к сильному ограничению операционной скорости судна, а также к возможной поломке лопасти. Изложенное выше подтверждается эксплуатационным опытом [13, 14].

Рис. 3. Взаимодействие лопасти ГВ со льдом: а) при отрицательном угле атаки (режим «навала» льда на лопасть); б) при остановленном ГВ; в) на режиме реверса при ударе льда о лопасть «плашмя» [1, 6]



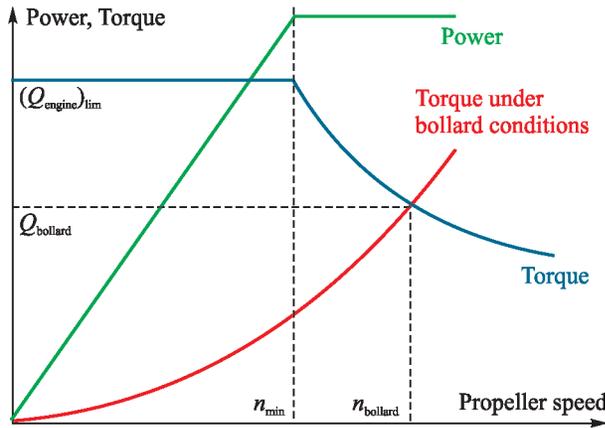


Рис. 4. Принципиальная схема мощности двигателя и крутящего момента для ГЭД в зависимости от скорости вращения ГВ

Условие (1) может быть принято в качестве одного из критериев для предотвращения указанных нерасчетных режимов взаимодействия со льдом.

Методика определения глобальных и локальных ледовых нагрузок на гребном винте и электродвигателе

Глобальные ледовые нагрузки

Для расчетных режимов фрезерования льда на основе модельных и натурных данных по ледовым нагрузкам на ГВ, включая ледоколы типа «Арктика», Polar Star, крупнотоннажный ледокольный танкер типа «Динков» и другие [1, 5, 6, 11, 15], разработаны формулы, учитывающие угол атаки ГВ (скорости вращения ГВ, скорости судна), характеристики ГВ, параметры ледовых условий.

Ледовая аксиальная сила на лопасти:

$$F_{ice} = 10^3 \cdot [17,6 + 19,2 \cdot e^{-0,17 \cdot \alpha(\bar{r}=0,9)}] \times k_{Sice} \cdot k_{Hice} \cdot D^{1,6} \cdot c_{mean} \cdot \sigma_{compr}(\bar{r} = 0,8). \quad (2)$$

Ледовый момент на ГВ:

$$Q_{ice} = k_{profile} \cdot \left[0,22515 + 30,0 \cdot \exp(-0,107 \cdot \alpha(\bar{r} = 0,8)) \right] \times K_{sice} \cdot K_{Hice} \cdot D^{2,6} \cdot t(\bar{r} = 0,8)^{0,5} \cdot \sigma(r = 0,8), \quad (3)$$

$$\alpha(\bar{r} = 0,8) \geq 3 \text{ deg},$$

$$Q_{ice} = \text{const} \quad \text{at} \quad \alpha(\bar{r} = 0,8) < 3 \text{ deg},$$

где D – диаметр ГВ, м; $\alpha(\bar{r})$ – угол атаки лопасти ГВ на относительном радиусе \bar{r} , град. (в зависимости

от скорости судна и скорости вращения ГВ) [15]; $K_{sice} \cdot K_{Hice}$ – коэффициенты, учитывающие толщину льда и прочность льда соответственно; $t(\bar{r} = 0,8)$ – толщина лопасти на относительном радиусе 0,8, м; c_{mean} – средняя безразмерная ширина лопасти по глубине врезания лопасти в лед [15]; $\sigma(\bar{r} = 0,8)$ – расчетная ледовая прочность на одноосное сжатие, МПа [15]; $k_{profile}$ – коэффициент, учитывающий форму входящей кромки лопасти.

Для заданных скорости движения судна и ледовых условий (толщина льда, прочность льда) скорость вращения ГВ (угол атаки), ледовые нагрузки на ГВ (F_{ice} , Q_{ice}), суммарный момент ГЭД Q_{total} определяются из совместного решения уравнений (2)–(4).

$$Q_{total} = Q_{hydr} + Q_{ice} - \theta \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (4)$$

где Q_{hydr} – гидродинамический момент; Q_{ice} – среднее значение ледового момента ГВ (без крутильных колебаний); n – частота вращения ГВ; $\theta(\partial n / \partial t)$ – инерциальная составляющая крутящего момента; θ – момент инерции системы «ГЭД – вал – ГВ»; t – текущее время взаимодействия ГВ со льдом.

Локальные ледовые нагрузки (ледовое давление)

Для обеспечения прочности лопастей ГВ необходим расчет их напряженного состояния под действием распределенной ледовой нагрузки (давления). В требованиях IACS I3 [5], DNV-GL [7] ледовая нагрузка для зон контакта лопасти со льдом задается в виде равномерного давления, что не соответствует реальному распределению ледового давления [1, 3, 8].

Для первого типа фрезерования льда зона контакта АВ (рис. 5) со стороны засасывающей поверхности определяется углом атаки лопасти ГВ (скоростью судна и скоростью вращения ГВ). Зона ВС (рис. 5) определяется из условия скола льда при прорезании лопастью. В тяжелых ледовых условиях лопасть прорезает лед на глубину, соответствующую $\bar{r} = [1 - 0,6]$, [9]. Распределение ледового давления в зонах АВ и ВС определяется процессами смятия льда и выдавливания ледового порошка.

Распределенная ледовая нагрузка (давление) вдоль поверхности цилиндрического сечения лопасти для участка $dw \rightarrow 0$ определяется уравнением [1, 6]

$$\bar{p}_{ice} = 0,66854 \cdot e^{\left(\frac{\xi(x)}{\alpha}\right)} + 0,33147 \cdot e^{\left(\frac{\xi(x)}{\beta}\right)}, \quad (5)$$

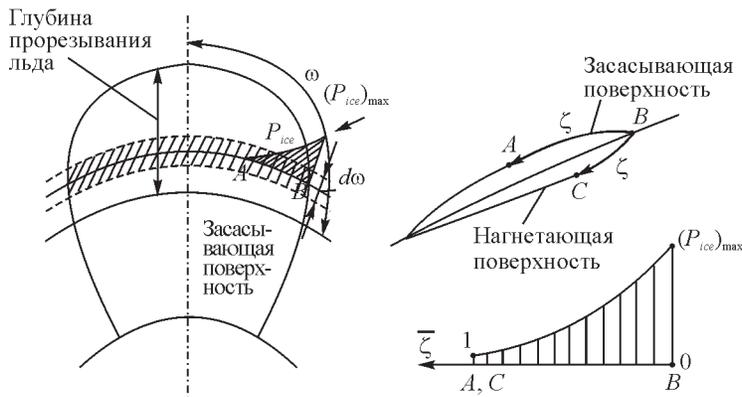


Рис. 5. Схема контактного ледового давления для режима фрезерования льда входящей кромкой

где $\bar{p}_{ice} = \frac{p_{ice}}{(p_{ice})_{max}}$ – безразмерное контактное ледовое давление; $(p_{ice})_{max}$ – максимум ледового контактного давления, $\bar{\xi}$ – безразмерная зона контакта со льдом; $\bar{\xi} \in [0, 1]$, 0 – начало зоны контакта; 1 – конец зоны контакта; α, β – параметры.

Локальное максимальное давление $(p_{ice\ peak})_{max}$ для $d\omega \rightarrow 0$ определяется в функции от прочности льда на одноосное сжатие по формуле [3]

$$(p_{ice\ peak})_{max} = C \cdot \sigma_{compr}^{0,6}. \quad (6)$$

Разрушение льда на участках $d\omega$ вдоль входящей кромки (вдоль ω , рис. 5, 6) происходит неодновременно, поэтому контактное давление $(p_{ice})_{max}(\omega)$ задается с учетом масштабного фактора в зависимости от ω .

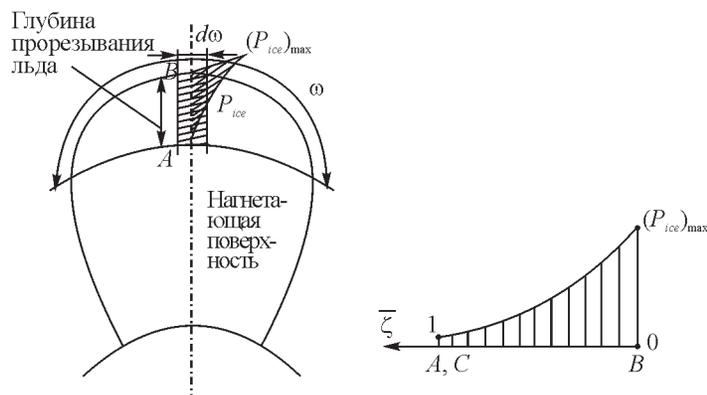


Рис. 6. Схема контактного ледового давления для второго типа фрезерования (периферийными сечениями лопасти)

Для второго типа фрезерования контакт происходит в области периферийных сечений со стороны нагнетающей поверхности. Схема приложения контактного ледового давления представлена на рис. 6. Длина зоны контакта периферийных сечений со льдом вдоль радиуса принимается равной $0,1R$ от относительного радиуса 1 до 0,9 [5]. Распределение ледового давления аналогично для первого типа фрезерования льда.

Представленная методика дает возможность назначать зоны контакта лопасти со льдом, контактные ледовые давления. Последнее позволяет выполнить уточненный расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) лопасти (включая кромки) (рис. 7) для обеспечения ее прочности.

Прямое интегрирование контактных ледовых давлений по поверхности лопасти позволяет определить интегральные ледовые нагрузки на ГВ в зависимости от скорости судна, скорости вращения ГВ и параметров ледовых условий. Определенные таким образом ледовые нагрузки соответствуют расчетным по формулам (2), (3).

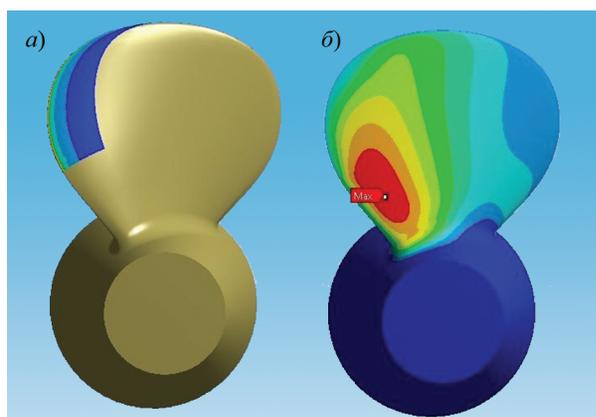


Рис. 7. НДС лопасти ГВ ледокольного судна (б) под действием кромочной ледовой нагрузки, первый тип фрезерования (а)

Рекомендации по уточнению силы поломки лопасти для формирования галтельного перехода в месте соединения лопасти со ступицей из условия обеспечения пирамидальной прочности пропульсивного комплекса

Сила поломки лопасти является одним из основных параметров, который учитывается при проектировании ледокольного ПК. Согласно принципу пирамидальной прочности, при поломке лопасти ГВ на нерасчетных режимах его взаимодействия со льдом (рис. 3) все остальные элементы ПК в потоке силовых линий должны оставаться неповрежденными.

В судостроительной практике для расчета силы поломки лопасти используются нормативные методики классификационных обществ [5, 7, 15]. Правила DNV GL более детально регламентируют назначенные прочностных характеристик отливки, расчетного корневого сечения лопасти для определения силы поломки лопасти, что обуславливает их выбор для практического решения указанной задачи.

Расчетная формула правил DNV GL [7, Pt. 6, Ch. 6, Section 5, 11.6.4] для предельной силы поломки лопасти:

$$F_{ex} = \frac{0,3ct^2\sigma_{ref}}{0,8D - 2r}, \quad (7)$$

где c , t – длина и толщина расчетного цилиндрического сечения; $\sigma_{ref} = 0,6\sigma_{0,2} + 0,4\sigma_u$, $\sigma_{0,2}$, σ_u – максимальные значения предела текучести и временного сопротивления материала лопасти; D – диаметр ГВ; r – радиус расчетного корневого сечения.



Рис. 8. Лопасть ГВ с цилиндрическим сечением

Формула (7) предполагает использование значений толщины и длины цилиндрического сечения лопасти ГВ (рис. 8). Анализ характерных поломок лопастей ГВ показывает, что разрушение лопасти происходит вдоль спрямленного корневого сечения, геометрические характеристики которого должны быть приняты в качестве расчетных для назначения предельной силы поломки лопасти (рис. 9).

Уточненная оценка предельного разрушающего момента изгибающего момента может быть выполнена по формуле, предложенной в работе [16]:

$$Q_{damage} = 0,25 \cdot c_{root} \cdot t_{root}^2 \cdot \beta_{root}^{1,5} \cdot \sigma_{design}, \quad (8)$$

где c_{root} – длина расчетного сечения излома лопасти; t_{root} – максимальная толщина сечения излома лопасти; β_{root} – коэффициент полноты сечения излома лопасти;

$$\sigma_{design} = \left[\sigma_{0,2} + \frac{2}{3}(\sigma_u - \sigma_{0,2}) \cdot (\overline{\epsilon}_{cr})_{max} \right], \quad (9)$$

где $\sigma_{0,2}$ – максимальный предел текучести; σ_u – максимальное временное сопротивление материала лопасти; $(\overline{\epsilon}_{cr})_{max} = 0,35$ – относительная величина максимальной критической упругопластической макродеформации материала в составе лопасти при $\sigma_{0,2 min} \geq 0,6\sigma_{u min}$ (мартенситные стали) [15].

Формула силы поломки лопасти с уточненным разрушающим лопасть изгибающим моментом:

$$F_{damage} = \frac{Q_{damage}}{(0,8 - 0,4) \cdot 0,5D}. \quad (10)$$

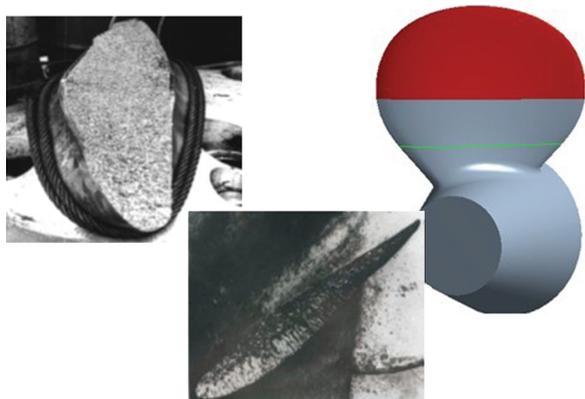


Рис. 9. Излом лопасти стального ГВ ледокола от воздействия одноразовой предельной нагрузки [1]

Уточненный расчет силы поломки лопасти ледокольного ГВ при упругопластическом деформировании выполнен методом конечных элементов (МКЭ) средствами программного комплекса ANSYS. Для оценки силы поломки лопасти ГВ проведен расчет критической упругопластической деформации ε_{cr} , соответствующей разрушению материала в составе лопасти, которая определена согласно нормативной процедуре Российского морского регистра судоходства (РМРС) [15] с учетом статистического анализа разброса прочностных характеристик материала исследуемого ГВ по формуле [15]

$$(\varepsilon_{cr})_{\max} = (\overline{\varepsilon_{cr}})_{\max} \cdot (\delta_u)_{\min} \quad (11)$$

Для назначения силы поломки лопасти и толщин галтельного перехода в месте соединения лопасти со ступицей из условия обеспечения пирамидальной прочности ПК необходимо учитывать спрямленное (реальное) сечение излома лопасти ГВ (рис. 9). Последнее подтверждается уточнен-

ным расчетом НДС в упругопластической зоне с использованием МКЭ. Пример результатов расчета силы поломки лопасти представлен в таблице.

Назначение безопасных скоростей движения судна из условия обеспечения безаварийной эксплуатации ледокольного гребного винта

Прочные размеры лопастей ГВ судов ледового плавания и ледоколов назначаются из условия обеспечения усталостной и статической прочности [11, 12, 15]. Соответствующие допустимые напряжения назначаются согласно нормативным процедурам РМРС [15] в зависимости от класса судна, типа (конвенционное, судно двойного действия), расположения ГВ. Безопасная скорость движения судна V_{ice} из условия обеспечения статической и усталостной прочности ГВ определяется из условия

$$\sigma_{ice}(L_{ice}(V_{ice}, n)) \leq \{\sigma_f, \sigma_{st}\}, \quad (12)$$

где $\sigma_{ice}(L_{ice}(V_{ice}, n))$ – напряжение в лопасти от воздействия ледовой нагрузки $L_{ice}(V_{ice}, n)$; $\{\sigma_f, \sigma_{st}\}$ – допустимые напряжения из условия обеспечения усталостной и статической прочности [15].

Условие (12) гарантирует эксплуатацию лопастей ГВ без деформаций и преждевременного усталостного разрушения при совместном обеспечении работоспособности ГЭД (с учетом падения оборотов ГВ и условия (1)) (рис. 10).

Расчет безопасных режимов и разработка рекомендаций по безопасной эксплуатации во льдах ГВ судов выполняются применительно к типовым ледовым условиям районов эксплуатации судна в соответствии с ледовым классом, конструктивными особенностями судна (судно двойного действия DAS), в зависимости от фактического состояния ледового

Результаты расчетов силы поломки лопасти ГВ

По расчету НДС в упругопластической зоне МКЭ	По предельному изгибающему моменту, формула (8), для реального сечения излома лопасти ГВ (рис. 9)	По формуле DNV GL (7) для реального сечения излома лопасти ГВ, (рис. 9)	По требованиям DNV GL [7, Pt. 6, Ch. 6, Section 5, 11.6.4],
7016 кН	6530 кН	6530 кН	5560 кН

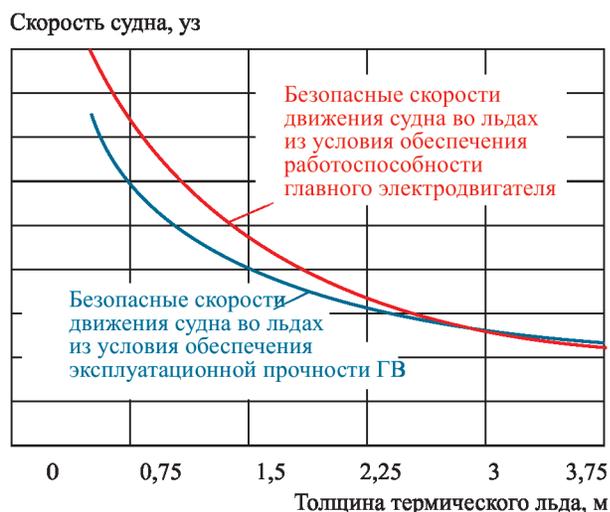


Рис. 10. Пример расчета безопасных скоростей движения судна во льдах из условия обеспечения эксплуатационной прочности ГВ и работоспособности ГЭД

покрова (толщины), а также с учетом солёности воды и льда в указанной акватории. Безопасные скорости движения судна во льдах из условия обеспечения эксплуатационной прочности ГВ и работоспособности ГЭД назначаются в соответствии с требованиями к обеспечению прочности корпуса судна и безопасной дистанции.

Библиографический список

1. *Андрюшин А.В.* Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГМТУ, 2007. 255 с.
2. *Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е.* Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. 1976. Т. XII. № 10. С. 103–109.
3. *Soinenen H.* A propeller–ice contact model. Dissertation for the degree of Doctor of Technology. VTT technical research centre of Finland. Espoo, 1988. 116 p.
4. *Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б.* Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Российский морской регистр судоходства. Научно-технический сборник. 2002. Вып. 25. С. 83–100.

5. IACS Unified Requirements I3 Machinery Requirements for Polar class Ships.
6. Отчет НИР «Разработка системы государственных нормативных правовых актов по формированию требований к морским техническим средствам для эксплуатации в российской Арктике в части судов транспортного, ледокольного и обеспечивающего флота. Шифр «Арктические требования – ЦНИИМФ», разработка и обоснование системы государственных требований, регламентирующих морскую деятельность в арктических условиях. ЦНИИМФ. Инв. № 8459 НТБ. № гос. регистрации 01201369918, по договору № К/1013-509/13/1, этап 2, 2014.
7. DNV GL Rules for classification: ships. Part 6, Chapter 6 – Cold climate. Section 5 – Polar Class – PC, 2016.
8. *Soininen H., Veitch B.* Propeller-ice interaction. Joint research project arrangement #6 (JPRA#6). Joint conclusion report // VTT Research Notes. 1996. № 1762. 31pp.
9. *Игнатъев М.А.* Гребные винты судов ледового плавания. Л.: Судостроение, 1966.
10. *Andryushin A.V., Hänninen S., Heideman T.* «Azipod» Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions // 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC 13). Helsinki, Espoo, Finland, June 9–10, 2013. P. 223–227.
11. *Andryushin A.V.* Ensuring of propeller strength for active ice going vessels and icebreakers (modern methods to ensure operation strength and efficiency of icebreaking propellers and propulsion complex under severe ice conditions) // Propeller Performance seminar. Lloyd’s Maritime Academy. London, UK, November 27–28, 2012.
12. *Andryushin A.V.* Modern RS requirements and methods ensuring operating strength of icebreaking propulsion complex // International Conference «Design and construction of vessels operating in low temperature environments». The royal institution of naval architects. London, UK, May 30–31, 2007. P. 33–43.
13. Формирование предложений по совершенствованию требований РС к работоспособности и проч-

ности пропульсивного комплекса судов ледового плавания, включая суда двойного действия и ледоколы. Отчет по договору № КНЦ №-К/1013/13/1 «Разработка системы государственных нормативных правовых актов по формированию требований к морским техническим средствам для эксплуатации в Российской Арктике в части судов транспортного, ледокольного и обеспечивающего флота». Этап 2. АО «ЦНИИМФ», 2014.

14. Исследование эксплуатационных характеристик крупнотоннажных арктических танкеров по результатам модельных и натурных испытаний и разработка рекомендаций по форме корпуса и параметрам пропульсивного комплекса перспективного газозова в обеспечение разработки концепции транспортной системы морского экспорта СПГ из п. Сабета. Разработка основных проектных решений для обеспечения требований РС к эксплуатационной надежности и работоспособности ВРК типа «AZIPOD» мощностью 15 МВт, категория Arc7, для крупнотоннажного арктического танкера «Pushing-Pulling», предназначенного для вывоза СПГ из порта Сабета. Научно-технический отчет по договору 4-889/42-2011. Этап 5. АО «ЦНИИМФ», 2011.
15. Проект новой редакции требований раздела 6 части VII «Механические установки» Правил Классификации и постройки морских судов / Сборник нормативно-методических материалов, Книга 20. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010.
16. *Бойцов Г.В.* Методика и результаты проверочных расчетов элементов МИШ ВРШ из условий обе-

спечения их пирамидальной и усталостной прочности под действием усилий от ледовых нагрузок на лопасти ВРШ. Предложения и рекомендации по нормам прочности МИШ ВРШ судов ледового плавания и ледоколов для включения в Правила РС по договору № 41/2000. Этап 4: Технический отчет. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2001.

Сведения об авторах

Андриюшин Александр Владиславович, д.т.н., заведующий лабораторией «Пропульсивные комплексы судов» АО «ЦНИИМФ». Адрес: 191015, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 6. Телефон: +7 (812) 271-81-05. E-mail: propulsionlab@cniimf.ru.

Хлыстова Ксения Борисовна, инженер лаборатории «Пропульсивные комплексы судов» АО «ЦНИИМФ». Телефон: +7 (812) 271-81-05. E-mail: propulsionlab@cniimf.ru.

Зуев Павел Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории «Пропульсивные комплексы судов» АО «ЦНИИМФ». Телефон: +7 (812) 271-81-05. E-mail: propulsionlab@cniimf.ru.

Федосеев Сергей Сергеевич, инженер лаборатории «Пропульсивные комплексы судов» АО «ЦНИИМФ». Телефон: +7 (812) 271-81-05. E-mail: propulsionlab@cniimf.ru.

Поступила / Received: 01.03.18
Принята в печать / Accepted: 03.05.18
© Коллектив авторов, 2018