УДК 629.5.037:629.94+624.042.43
EDN: CFHXTX

А.В. Андрюшин[1], С.В. Рябушкин[1], А.Ю. Воронин[1], С.Н. Коротов[2], Е.Н. Грызлова[2]
[1]Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота, Санкт-Петербург, Россия
[2]Центральное конструкторское бюро «Лазурит», Нижний Новгород, Россия

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЛЕДОВОЙ ПРОЧНОСТИ РОТОРНО-ВИНТОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ АМФИБИЙНОГО СРЕДСТВА

Объект и цель научной работы. Выполнено исследование ледовой прочности роторно-винтового движителя (РВД) арктического амфибийного средства и представлены основные подходы к ее обеспечению. Ледовые подкрепления РВД назначаются из совместного обеспечения прочности от однократного экстремального нагружения и усталостной прочности от переменных ледовых нагрузок. Рассмотрены режимы эксплуатации амфибийного средства и сценарии взаимодействия РВД со льдом для расчета ледовых нагрузок и назначения прочных размеров РВД. Предложены рекомендации в части изготовления РВД.

Материалы и методы. В работе используются методика назначения ледовых нагрузок, разработанная на основе натурных данных, математическая модель разрушения льда на основе гидродинамической модели вытеснения ледового порошка, а также критерии обеспечения прочности пропульсивного комплекса ледокольных судов.

Основные результаты. Представлены основные подходы и рекомендации для обеспечения эксплуатационной прочности роторно-винтового движителя амфибийного средства, которое эксплуатируется в условиях арктических морей.

Заключение. Результаты работы могут иметь практическое применение в проектировании роторно-винтовых движителей амфибийных средств, эксплуатируемых в Арктике. Представленные рекомендации позволяют обоснованно в зависимости от условий эксплуатации назначать прочные размеры элементов конструкции РВД и улучшать его эксплуатационные характеристики при жестких весогабаритных ограничениях.

Ключевые слова: роторно-винтовой движитель, амфибийное средство, ледовые нагрузки, ледовая прочность, критерии обеспечения прочности (приемлемости).

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

УДК 629.5.037:629.94+624.042.43
EDN: CFHXTX

A.V. Andryushin[1], S.V. Ryabushkin[1], A.Y. Voronin[1], S.N. Korotov[2], E.N. Gryzlova[2]
[1]Central Marine Research and Design Institute (CNIIVF), St. Petersburg, Russia
[2] Lazurit Central Design Bureau, Nizhny Novgorod, Russia

MAIN APPROACHES REGARDING THE ICE STRENGTH OF AMPHIBIOUS VEHICLE'S ROTARY SCREW PROPULSORS

Object and purpose of research. The ice strength of the amphibious vehicle's rotary screw propulsor intended for the arctic areas is investigated. Main approaches are highlighted. RSP ice strengthenings are assigned based on the combination of a single extreme load and fatigue strength under variable ice loads. Operating conditions of the amphibious vehicle and RSP/ice interaction scenarios are considered for calculation of ice loads and specification of RSP scantlings. Recommendations are given regarding RSP manufacturing.

Для цитирования: Андрюшин А.В., Рябушкин С.В., Воронин А.Ю., Коротов С.Н., Грызлова Е.Н. Основные подходы к обеспечению ледовой прочности роторно-винтового движителя амфибийного средства. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; Специальный выпуск 1: 114–118.
For citations: Andryushin A.V., Ryabushkin S.V., Voronin A.Y., Korotov S.N., Gryzlova E.N. Main approaches regarding the ice strength of amphibious vehicle's rotary screw propulsors. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; Special Issue 1: 114–118 (in Russian).

Materials and methods. The paper applies the ice load assignment method based on full-scale data and the mathematical model of ice failure based on the hydrodynamic model of ice particle displacement as well as the strength criterion for propulsion system of icebreaking ships.
Main results. Main approaches and recommendations regarding the strength of amphibious vehicle's rotary screw propulsor designed for the arctic waters are given.
Conclusion. Results can be of practical importance for the design of rotary screw propulsors of amphibious vehicles operated in the Arctic. Recommendations given in the paper enable designers to reasonably specify the RSP scantlings versus operating conditions, and to improve RSP operating performance within rigorous weight and size constraints.
Keywords: rotary screw propulsor, amphibious vehicle, ice loads, ice strength, strength (acceptability) criterion.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Постановка задачи

Активное освоение нефтегазоконденсатных и других месторождений арктического шельфа, а также развитие Северного морского пути требуют разработки специализированных амфибийных средств для выполнения аварийно-спасательных, транспортных операций в различных эксплуатационных условиях арктического шельфа, таких как ледовый и снежный покровы, участки с чистой водой и льдом, болота. Амфибийные средства с РВД являются одними из перспективных для применения в указанных условиях. Обеспечение прочности РВД от ледового воздействия является одной из основных задач, определяющих эффективную и безопасную эксплуатацию амфибийного средства в ледовых условиях. Обеспечение ледовой прочности РВД включает решение нескольких взаимосвязанных задач: определение ледовых нагрузок, расчет и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) наиболее нагруженных элементов, разработка критериев прочности (приемлемости) и, собственно, назначение прочных размеров. Решение указанных задач выполнено на основе опыта эксплуатации и проектирования пропульсивных комплексов ледокольных судов. Аналогично последним совместное обеспечение усталостной прочности от переменных ледовых нагрузок и прочности от однократного экстремального воздействия является одним из узловых факторов при проектировании РВД арктического амфибийного средства.

Конструкция и основные геометрические параметры роторно-винтового движителя

Роторно-винтовой движитель состоит из полого базового цилиндра с навитой на него одной или несколькими винтовыми линиями.

Назначение характеристик РВД выполняется из условия совместного обеспечения максимально возможной эксплуатационной эффективности при выполнении требований к ледовой прочности винтовой линии (рис. 1, см. вклейку).

Эксплуатационные режимы амфибийного средства в ледовых условиях

Сценарии взаимодействия роторно-винтового движителя со льдом для назначения ледовых нагрузок

Для назначения ледовых нагрузок на винтовую линию РВД рассматриваются следующие эксплуатационные режимы: ходовые режимы движения по ровным ледовому покрову и склону; преодоление торосистых образований; движение в воде с ледовыми образованиями; выход из воды на ледовую поверхность.

При взаимодействии РВД со льдом реализуются сценарии фрезерования льда винтовой линией и ее навала на ледовое образование. Кинематические схемы указанных сценариев представлены на рис. 2 (см. вклейку).

Угол атаки α винтовой линии является основным кинематическим параметром, определяющим уровень ледовых нагрузок. При $\alpha \geq 0°$ реализуется сценарий фрезерования льда (рис. 2*а,* см. вклейку). В этом случае винтовая линия может взаимодействовать со льдом со стороны как засасывающей, так и нагнетающей поверхности, но основной контакт приходится на последнюю, что обуславливает появление положительной ледовой силы, определяющей поступательное движение амфибийного средства. Максимальная положительная ледовая сила на витке соответствует моменту страгивания амфибийного средства при нулевой скорости движения, когда угол атаки равен шаговому углу винтовой линии $\varphi_л$. Максимальная достижимая скорость определяется нулевыми значениями

угла атаки и положительной ледовой силы. Сценарий фрезерования льда используется как проектный в расчетах ходкости амфибийного средства, назначении мощности и перегрузочных характеристик главного электродвигателя (ГЭД) для обеспечения таких эксплуатационных режимов, как преодоление торосистой гряды, выход из воды на лед. Переменные ледовые нагрузки для указанных режимов принимаются в качестве расчетных для обеспечения усталостной прочности конструкции РВД.

При аварийной остановке ГЭД реализуется сценарий навала винтовой линии РВД на ледовое образование (рис. 2*б,* см. вклейку), который приводит к появлению экстремальной ледовой силы, действующей на винтовую линию со стороны ее засасывающей поверхности и направленной противоположно движению амфибийного средства. При сценарии навала в торосистых льдах контакт со льдом происходит по всей глубине винтовой линии (рис. 2*б,* см. вклейку). В этом случае значение ледовой силы превосходит соответствующие для сценария фрезерования. Вероятность реализации такого сценария достаточно мала, и соответствующая ледовая отрицательная сила принимается в качестве расчетной для обеспечения прочности от однократного экстремального нагружения.

Основные положения методики определения ледовых нагрузок на винтовую линию роторно-винтового движителя при взаимодействии со льдом

Анализ наиболее нагруженных участков конструкции по результатам расчета напряженно-деформированного состояния

Уровень ледовых нагрузок определяется прочностными характеристиками ледового покрова, которые в свою очередь зависят от температуры, солености льда. Значения прочностных характеристик определяются по методике АО «ЦНИИМФ», разработанной на основе натурных данных [2]. Методика определения локальных и интегральных ледовых нагрузок на винтовую линию РВД аналогична соответствующей для лопастей ледокольных гребных винтов [3, 4], которая разработана на основе гидродинамической теории вытеснения ледового порошка [5, 6].

На рис. 3*а* и 3*б* (см. вклейку) для сценариев фрезерования льда и навала на ледовое образование представлены схемы взаимодействия винтовой линии со льдом. При внедрении в лед винтовой линии около ее вершины (кромки) образуется зона смятого льда, который в виде порошка вытесняется по поверхности винтовой линии. Указанный процесс формирует неравномерное распределение ледового давления p_{ice} с максимумом $(p_{ice})_{\max}$ в зоне смятия, рис. 3*а* и 3*б*. Для указанного случая численное решение для назначения p_{ice} получено в работах [3, 4]. Распределение ледового давления аппроксимируется выражением [3, 4]:

$$\overline{p}_{ice}\left(\overline{\zeta}\right) = \exp\left(-\frac{\zeta}{\alpha}\right) + d \cdot \exp\left(-\frac{\zeta}{\beta}\right), \qquad (2)$$

где α, β, *c*, *d* – постоянные [3, 4]; $\overline{p}_{ice}\left(\overline{\zeta}\right) = \dfrac{p_{ice}}{\left(p_{ice}\right)_{\max}}$ – безразмерное контактное ледовое давление; $\left(\overline{\zeta}\right) = [0,1]$ – безразмерная зона контакта. Значение $(p_{ice})_{\max}$ определяется прочностью льда на одноосное сжатие [3, 4, 6].

Представленная методика позволяет определять локальные и интегральные ледовые нагрузки на винтовую линию РВД и ее НДС для расчета прочности. На рис. 4 (см. вклейку) представлено характерное НДС винтовой линии на цилиндре РВД при взаимодействии со льдом. Конструкция винтовой линии аналогична предложенной в работе [9] с разгружающей галтелью переменного радиуса у основания ее профиля. Наиболее напряженные участки (концентраторы напряжений) формируются в районе галтельного перехода А и кромки винтовой линии Б (рис. 4, см. вклейку), что необходимо учитывать для обеспечения прочности РВД.

Ледовые нагрузки *x* для сценария фрезерования льда ограничиваются сверху максимальным значением $x_{\max}$, соответствующим моменту страгивания амфибийного средства, см. выше. Аналогично практике проектирования ледокольных пропульсивных комплексов и офшорных конструкций предполагается, что функция распределения нагрузок *x* определяется третьим асимптотическим законом [4, 13, 14]:

$$F\left(x\right) = \exp\left(-\left(\frac{x_{\max} - x}{s}\right)^{\alpha}\right), \qquad (3)$$

где *s*, α – параметры [4].

Критерий приемлемости для обеспечения статической прочности от воздействия экстремальной однократной нагрузки

Для сценария навала (однократное экстремальное воздействие) в качестве основного критерия для обеспечения прочности традиционно принимается

условие непревышения эквивалентными номинальными напряжениями по Мизесу $\sigma_{vonMises}$ предела текучести материала σ_{02}, т.е. $\sigma_{vonMises} \le \sigma_{02}$. Необходимо принимать во внимание зоны концентрации напряжений, см. выше, в которых допускается возникновение ограниченных упругопластических деформаций. Для указанного случая прочность обеспечивается из условия непревышения упругопластической деформацией критического уровня, соответствующего разрушению материала [4, 7]:

$$\varepsilon \le \varepsilon_{cr} \cdot k_{safety}, \quad (4)$$

где ε — упругопластическая деформация от воздействия нагрузки; ε_{cr} – критическая упругопластическая деформация материала, соответствующая возникновению и распространению макротрещины в элементе конструкции и его разрушению; k_{safety} – коэффициент безопасности. Для сталей значение ε_{cr} может быть определено по формуле [4, 7]:

$$\varepsilon_{cr} \cong 6,4\left[\frac{\sqrt{KV}}{\sigma_{02}}\right]\cdot\left(\frac{1}{t^{0,5}}\right)\cdot\ln\left(1+\delta\right) \quad (5)$$

при $\sigma_{02} \ge 0,6\,\sigma_u$,

где σ_{02}, σ_u – предел текучести и временное сопротивление материала, МПа; δ – относительное удлинение стандартного образца при одноосном растяжении; KV – работа удара по методу Шарпи для температуры эксплуатации, Дж; t – характерная толщина элемента конструкции, м.

Такой подход позволяет значительно уменьшить прочные размеры и улучшить эксплуатационные характеристики проектируемого объекта при жестких ограничениях на его весогабаритные характеристики, а также обоснованно назначать материалы для конструкции РВД из условия предотвращения хладноломкости, что является актуальным для арктических районов с низкими температурами. Последнее, как правило, повышает усталостную прочность, см. ниже.

Критерий приемлемости для обеспечения усталостной прочности при работе роторно-винтового движителя в условиях переменного случайного ледового нагружения

Расчет усталостной прочности на ходовых режимах (при фрезеровании льда) выполняется на основе правила линейного суммирования усталостных повреждений Палмгрена – Майнера с учетом соответствия вероятностного распределения ледовых нагрузок при фрезеровании третьему асимптотическому закону распределения (3) [4]. В этом случае [3, 4], допустимое напряжение $\sigma_{fatigue}$ из условия обеспечения усталостной прочности $\sigma \le \sigma_{fatigue}$ представляется в виде:

$$\sigma_{fatigue} = \left(\frac{1}{\alpha}\frac{1}{\varphi}\frac{N_0}{N_\Sigma}\right)^{\frac{1}{m}}\sigma_{-}, \quad (6)$$

где α – параметр; $\varphi = \varphi(m, \alpha)$; N_0 – количество циклов, соответствующее условному пределу усталости σ_{-}; m – параметр материала (кривой усталости); N_Σ – число циклов нагружения элемента при случайном нагружении. Расчетный условный предел усталостной прочности σ_{-} определяется с учетом масштабного эффекта от толщины элемента, механической обработки поверхности, вероятностно-статистического разброса значений σ_{-} и влияния среднего напряжения [3, 8].

Рекомендации обеспечения прочности роторно-винтового движителя

Рекомендуется использовать конструкцию профиля винтовой линии из трех элементов: центральной вертикальной пластины и двух боковых (рис. 4, см. вклейку) [9]. Целесообразно выравнивание стыка пластин на верхней кромке винтовой линии наплавкой металла. Для устранения концентрации напряжений у основания профиля выполняется разгружающая галтель переменного радиуса [10]. С целью повышения усталостной прочности поверхность винтовой линии, включая галтели, должна быть упрочнена дробеструйной обработкой аналогично практике изготовления гребных винтов [11]. Для обеспечения эксплуатационной прочности РВД рекомендуется проводить освидетельствование его конструкции после изготовления и периодически в эксплуатации на предмет выявления макротрещин, размеры которых превышают допустимые значения [12], которые определяются из условия нераспространения макротрещины под действием переменной нагрузки. Целесообразно выполнять освидетельствование после реализации экстремальных режимов (навал на ледовое образование).

Заключение

В докладе рассмотрены основные подходы к обеспечению ледовой прочности РВД арктического амфибийного средства: режимы эксплуатации и сценарии взаимодействия РВД со льдом для расчета ледовых нагрузок и назначения прочных размеров. Ледовые

подкрепления РВД назначаются из совместного обеспечения прочности от однократного экстремального нагружения и усталостной прочности от переменных ледовых нагрузок. Предложены рекомендации в части изготовления РВД.

Список использованной литературы

1. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях / В.Е. Колотилин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3. С. 156–208.
2. *Weeks W.F.* On sea ice. Fairbanks, Alaska : University of Alaska Press, 2010. XVI, 664 p.
3. *Andryushin A.V., Ryabushkin S.V., Voronin A.Y.* Sharp Profile for Icebreaking Propellers to Improve Their Ice and Hydrodynamic Characteristics // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10(6). DOI: 10.3390/jmse10060742.
4. *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 : 05.08.01 / А.В. Андрюшин ; ФГУП «Российский морской регистр судоходства». Санкт-Петербург, 2006.
5. *Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е.* Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. 1976. Т. 12, № 10.
6. *Soininen H*. A propeller-ice contact model : Dissertation for the degree of Doctor of Technology / H. Soininen ; VTT technical research Centre of Finland. Espoo, 1988. 116 p.
7. Требования к прочности механизма изменения шага (МИШ) гребных винтов судов ледового плавания и ледоколов // РМРС. Научно-технический сборник № 24. Санкт-Петербург, 2001.
8. Assurance of Load – Carrying Capacity for Ice Propellers // Proceedings of 30th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2020). Shanghai, 2020. Ocean Arctic, Energy. P. 673–681.
9. *Крашенинников М.С., Кошурина А.А., Дорофеев Р.А*. Прочность движителя с точки зрения выхода роторно-винтовой машины из воды на лед // Актуальные вопросы машиностроения / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. Вып. 5. С. 160–164.
10. *Петерсон Р.* Коэффициенты концентрации напряжений. Пер. англ. Москва : Мир. 1977.
11. Руководящий документ РД5.УЕИА.27.11-89 «Винты гребные из коррозионностойкой стали марок 08Х14НДЛ и 08Х15Н4ДМЛ. Поверхностное упрочнение методом дробеструйного наклёпа», Инструкция, дата введения 01.03.1989.
12. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XIII. Материалы : НД № 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023.
13. Основные подходы к вероятностно-статистической оценке безопасности МЛСП при ледовых воздействиях // Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений газа / Ю. Алексеев, В. Афанасьев, О. Литонов и др. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2001. 360 с.
14. Андрюшин А.В. Анализ натурных ледовых нагрузок на лопасти гребного винта регулируемого шага арктического ледокола // Труды Центрального научно-исследовательского института имени А.Н. Крылова. 2005. Вып. 24(308). С. 172–183.

Сведения об авторах

Андрюшин Александр Владиславович, д.т.н., начальник лаборатории «Пропульсивные комплексы судов» Центрального ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского и проектно-конструкторского института морского флота (АО «ЦНИИМФ»). Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А. E-mail: andryushinAV@cniimf.ru.

*Сергей Владимирович Рябушкин***,** младший научный сотрудник лаборатории «Пропульсивные комплексы судов» Центрального ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского и проектно-конструкторского института морского флота (АО «ЦНИИМФ»). Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А.. E-mail: serg.ryabuschkin@yandex.ru.

Александр Юрьевич Воронин, научный сотрудник лаборатории «Пропульсивные комплексы судов» Центрального ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского и проектно-конструкторского института морского флота (АО «ЦНИИМФ»). Адрес: 191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А. E-mail: voroninay@cniimf.ru.

Сергей Николаевич Коротов, зам. главного конструктора по направлению, Центральное конструкторское бюро «Лазурит» (АО «ЦКБ «Лазурит»). Адрес: 603951, Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 57. E-mail: sn_korotov@cdb-lazurit.ru.

Елена Николаевна Грызлова, зам. главного конструктора по направлению, Центральное конструкторское бюро «Лазурит» (АО «ЦКБ «Лазурит»). Адрес: 603951, Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 57. E-mail: en_gryzlova@cdb-lazurit.ru..

Поступила / Received: 14.05.24
Принята в печать / Accepted: 27.06.24
© Коллектив авторов, 2024