УДК 629.94:629.5.016+624.042.43
EDN: HVTKHB

А.В. Андрюшин[1], С.В. Рябушкин[1], А.Ю. Воронин[1], В.К. Грызлов[2], С.В. Дубров[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 ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ АМФИБИЙНОГО СРЕДСТВА С РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

Объект и цель научной работы. В настоящее время на арктическом шельфе выполняется широкий спектр промышленных работ, для выполнения которых требуются специализированные транспортные средства. Концепция амфибийного средства на базе роторно-винтовых движителей (РВД) является одной из наиболее перспективных для работы в тяжелых ледовых условиях, однако их разработка для арктических районов выходит за рамки накопленного опыта проектирования. Одной из актуальных задач является разработка методов расчета ледовой ходкости арктических амфибийных средств с РВД для обеспечения эффективной эксплуатации на ледовом покрове.

Материалы и методы. В настоящей работе для расчета ледовых нагрузок на винтовую линию РВД используется гидродинамическая модель вытеснения ледового порошка (ГДМ). Расчеты ходкости выполняются согласно законам классической механики. Представлено сопоставление результатов с экспериментальными данными.

Основные результаты. В работе представлены основные подходы к решению задачи по расчету ледовой ходкости средств с РВД, включая: рассмотрение сценариев взаимодействия РВД со льдом, построение расчетных моделей ледовых нагрузок на винтовую линию РВД для расчета характеристик движения по ледовому покрову и назначения проектных характеристик главного двигателя. Выполнены расчеты ледовой ходкости для прототипа. Представлено сопоставление результатов с экспериментальными данными.

Заключение. Представленная методика может быть использована для обеспечения ледовой ходкости современной амфибийной техники с роторно-винтовыми движителями для эксплуатации в арктических регионах.

Ключевые слова: роторно-винтовой движитель (РВД), амфибийное средство, ледовая ходкость, ледовые нагрузки, гидродинамическая модель вытеснения ледового порошка (ГДМ).

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

УДК 629.94:629.5.016+624.042.43
EDN: HVTKHB

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

MAIN APPROACHES REGARDING PROPULSION PERFORMANCE CALCULATIONS IN ICE FOR AMPHIBIOUS VEHICLES WITH ROTARY SCREW PROPULSORS

Object and purpose of research. At present, a wide range of industrial activities are witnessed on the Arctic Shelf supported with special-purpose transport vehicles. An amphibious vehicle propelled with a rotary screw propulsor (RSP) is one of the promising concepts for rigorous ice environment, however development of such vehicles for the Arctic areas goes beyond available design practices. Elaboration of propulsion performance analysis method for RSP amphibious vehicles designed for the Arctic areas is one of the challenges to be met for effective operation of these vehicles over ice cover.

Для цитирования: Андрюшин А.В., Рябушкин С.В., Воронин А.Ю., Грызлов В.К., Дубров С.В. Основные положения расчета ледовой ходкости амфибийного средства с роторно-винтовым движителем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; Специальный выпуск 1: 109–113.
For citations: Andryushin A.V., Ryabushkin S.V., Voronin A.Y., Gryzlov V.K., Dubrov S.V. Main approaches regarding propulsion performance calculations in ice for amphibious vehicles with rotary screw propulsors. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; Special Issue 1: 109–113 (in Russian).

Materials and methods. This paper suggests a hydrodynamic model (HM) of ice particle displacement for calculation of ice loads on the RSP helix. Estimations are based on the laws of classical mechanics. Results of calculations are compared with experimental data.
Main results. Main approaches to evaluation of propulsion in ice for RSP vehicles are presented: including scenarios of RSP/ice interaction, models of ice loads on the RSP helix to calculate motion characteristics over ice cover, and specification of main engine's design parameters. Propulsion performance in ice is calculated for the prototype. Results are compared with experimental data.
Conclusion. The described methodology can be used for validation of propulsion performance of modern amphibious vehicles with rotary screw propulsors designed for the Arctic.
Keywords: rotary screw propulsor (RSP), amphibious vehicle, propulsion in ice, ice loads, hydrodynamic model (HM) of ice particle displacement.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Постановка задачи

В настоящее время ведется интенсивное освоение нефтегазоконденсатных месторождений на Арктическом шельфе России, что связано с выполнением и обеспечением аварийно-спасательных (эвакуация персонала), транспортных и других операций в различных эксплуатационных условиях (чистая вода, ледовый покров, болотистые грунты). Последнее обуславливает целесообразность разработки амфибийных средств. Разработка амфибийных машин с роторно-винтовым движителем является одним из перспективных направлений. Однако разработка таких средств для арктических районов выходит за рамки предшествующего опыта эксплуатации и проектирования, когда амфибийные средства с РВД в основном использовались для относительно мягких грунтов и снежного покрова.

В арктических условиях движение по ледовому покрову является одним из основных эксплуатационных режимов. Последнее обуславливает необходимость разработки соответствующих методов расчета ледовой ходкости, включая назначение мощности и момента главного двигателя (ГД), обеспечивающих заданные характеристики эксплуатации амфибийного средства: скорость движения, выход на лед, работоспособность ГД. Аналогично требованиям Российского морского регистра судоходства (РМРС) к пропульсивным установкам ледокольных судов под работоспособностью ГД в ледовых условиях понимается способность поддерживать вращение РВД и движение амфибийного средства в диапазоне расчетных значений мощности и момента, соответствующих условиям и режимам эксплуатации [1]. Необходимо отметить, что главный двигатель РВД арктического амфибийного средства работает в широком диапазоне действующих на него эксплуатационных моментов, созданных воздействием воды, льда, что обуславливает целесообразность установки электрического двигателя как главного (ГЭД).

В докладе представлены основные подходы к решению указанной задачи, включая: рассмотрение сценариев взаимодействия РВД со льдом, построение расчетных моделей ледовых нагрузок на винтовую линию РВД для расчетных режимов движения по ледовому покрову и назначения проектных характеристик ГД.

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 (рис. 1, см. вклейку).

Выбор конструктивных параметров определяет тягово-сцепные характеристики движителя. Назначение указанных параметров геометрии РВД производится из совместного обеспечения максимально возможной эффективности при движении по ледовому и снежному покровам, в воде при выполнении требований к ледовой прочности.

Режимы эксплуатации амфибийного средства в ледовых условиях и сценарии взаимодействия роторно-винтового движителя со льдом для расчетов ходкости

С учетом ранее выполненных исследований [2, 4] можно выделить следующие эксплуатационные режимы движения амфибийного средства в ледовых условиях: движение по ровной поверхности льда и ледовому склону; в торосистых льдах; в воде с обломками льдом; выход из воды на поверхность льда.

Для указанных режимов в качестве расчетного (проектного) для назначения мощности и момента ГД для обеспечения движения амфибийного средства принимается сценарий прорезания (фрезерования) льда. Прорезание (фрезерование) льда реализуется при вращении РВД, когда винтовая поверхность прорезает (фрезерует) лед при положительном угле атаки при взаимодействии профиля винтовой линии со льдом, см. ниже. В этом случае основной контакт происходит по нагнетающей поверхности винтовой линии, что обуславливает возникновение положительной ледовой силы, обеспечивающей поступательное движение амфибийного средства, и ледового момента сопротивления вращению РВД (рис. 2*а*, см. вклейку). Режим движения по ровному льду рассматривается как *спецификационный*, т.е. для назначения спецификационных характеристик ходкости, подтверждаемых натурными испытаниями головного образца. Для обеспечения эксплуатационной ходкости рассматриваются сценарии взаимодействия РВД со льдом для режима движения в торосистых льдах, выхода на лед. Учет последних необходим для назначения запаса ГЭД РВД для обеспечения его работоспособности.

Для обеспечения прочности в качестве одного из расчетных принимается режим навала винтовой линии на лед. Последний реализуется при выходе из строя (отказе) главного электродвигателя, например, при срабатывании зашиты по моменту, что приводит к резкой остановке РВД. В этом случае основной контакт происходит по засасывающей поверхности винтовой линии, что обуславливает возникновение отрицательной ледовой силы, направленной противоположно движению амфибийного средства (рис. 2*б*, см. вклейку). Однако задача обеспечения прочности выходит за рамки данной статьи.

Расчетная модель ледовых нагрузок на винтовую линию роторно-винтового движителя при фрезеровании льда для расчета ледовой ходкости амфибийного средства

Расчетная модель ледовых нагрузок на винтовую линию РВД при взаимодействии со льдом разработана на базе современной теории взаимодействия гребных винтов со льдом, в основу которой для назначения контактного ледового давления на лопасть положена «гидродинамическая» модель вытеснения ледового порошка с учетом неодновременности разрушения ледового покрова [3, 5–7].

Для расчета спецификационных характеристик ходкости на ровном ледовом покрове *на первом этапе* производится расчет внедрения (заглубления) винтовой линии в лед при статической постановке амфибийного средства на ровный ледовый покров. *На втором этапе* рассчитываются ледовые нагрузки при прорезании (фрезеровании) льда витками, которые впоследствии используются для расчета ледовой ходкости амфибийного средства, а также обеспечения ледовой прочности винтовой линии РВД (рис. 3, см. вклейку).

В общем случае главным кинематическим параметром, определяющим уровень ледовых нагрузок, является угол атаки α (рис. 3):

$$\alpha(\bar{r}) = \varphi_{\text{л}}(\bar{r}) - \operatorname{arctg}\left[\frac{v_x}{(2\pi \cdot \bar{r} \cdot R \cdot n_{ice})}\right], \qquad (1)$$

где $\bar{r}$ – относительный радиус; $\varphi_{\text{л}}(\bar{r})$ – шаговый угол винтовой линии на радиусе $\bar{r}$.

В зависимости от значения угла атаки α (1) можно выделить следующие режимы движения РВД в зависимости от характеристик взаимодействия винтовой линии РВД со льдом:

- *Режим страгивания*. В момент страгивания (старта) при нулевой скорости движения амфибийной машины и вращения РВД контакт реализуется со стороны нагнетающей поверхности, что приводит к появлению положительной ледовой силы, направленной в сторону движения амфибийного средства;
- *Разгонный режим*. При увеличении скорости движения амфибийного средства угол атаки винтовой поверхности уменьшается, что приводит к уменьшению зоны контакта со стороны нагнетающей поверхности и появлению зоны контакта со стороны засасывающей поверхности, что приводит к уменьшению угла атаки и положительной ледовой силы, а также момента на РВД;
- *Установившийся режим*. Увеличение скорости движения амфибийного средства и вращения РВД приводит к практически нулевым значениям угла атаки и суммарной аксиальной ледовой силы. В указанный момент скорость движения амфибийного средства достигает максимального значения и стабилизируется.

Необходимо подчеркнуть, что надежное зацепление (сцепление) винтовой поверхности РВД за лед является необходимым условием реализации движения по ледовой поверхности, по ледовому склону и выхода амфибийного средства из воды на

ледовую поверхность, Последнее обеспечивается только при отсутствии разрушения льда в виде его скалывания со стороны нагнетающей поверхности (рис. 4, см. вклейку). Для оценки возможности указанного явления рассматривается плоская задача взаимодействия профиля винтовой линии РВД со льдом (рис. 4).

Экспериментальные исследования по внедрению инденторов различной формы в лед [9–11] показывают, что скалывание льда происходит при определенном значении угла скола φ_{split}. В качестве критерия прочности льда на скалывание используется критерий Кулона – Мора:

$$\tau_{failure} = c + \mathrm{tg}(\varphi)P, \quad (2)$$

где c – когезионная прочность, характеристика материала; φ – угол внутреннего трения; P – нормальные напряжения к расчетной плоскости скола, определяемые на базе гидродинамической модели вытеснения ледового порошка вдоль поверхности профиля при внедрении витка винтовой линии в лед [3, 5, 6].

Условие обеспечения необходимого зацепления за лед формулируется следующим образом:

$$\tau < \tau_{failure}, \quad (3)$$

где τ – касательные действующие напряжения в ледовом покрове (рис. 4).

Анализ показывает, что зацепление витка за лед определяется прочностными характеристиками льда, глубиной внедрения винтовой линии в лед, а также углом раскрытия (раствора) винтовой линии (рис. 4). Последнее необходимо дополнительно учитывать при проектировании конструкции РВД для обеспечения эффективной эксплуатации амфибийного средства.

Пример расчета ледовой ходкости для спецификационного режима движения по ровному ледовому покрову

В данном пункте представлены результаты расчета ходкости для перспективного амфибийного средства с РВД, основные параметры которого выбирались на основе статистического анализа [2]. На рис. 5 (см. вклейку) представлены характерные результаты расчета ледовых нагрузок (осевой ледовой силы и момента сопротивления), действующих на винтовую поверхность РВД при движении по ровному ледовому покрову.

Результаты расчетов (рис. 3, 5) показывают, что на *режиме страгивания* и *разгонном режиме* основной контакт со льдом происходит со стороны нагнетающей поверхности винтовой линии. Со стороны засасывающей поверхности зона контакта меняется незначительно. За этот период амфибийное средство начинает движение и разгоняется.

По мере роста скорости уменьшается угол атаки (1), что приводит к увеличению зоны контакта со стороны засасывающей поверхности винтовой линии и быстрому уменьшению положительной ледовой силы (тяги), а также ледового момента. Последнее обуславливает рост скорости вращения РВД при постоянной мощности ГЭД. При значениях $\alpha \sim 0°$ ледовая тяга становится равной нулю, процесс роста скорости стабилизируется и амфибийное средство выходит на *установившийся режим* с максимально достижимой скоростью.

Полученные результаты согласуются с результатами натурных испытаний шнекоходов ШН-68 [8] (рис. 5). Предложенная методика позволяет выполнить расчет ходкости, включая моментные характеристики ГЭД РВД (рис. 5).

Заключение

В докладе разработаны и представлены основные подходы к обеспечению ледовой ходкости современной амфибийной техники с роторно-винтовыми движителями для эксплуатации в арктических регионах, включая: рассмотрение сценариев взаимодействия РВД со льдом, построение расчетных моделей ледовых нагрузок на винтовую линию РВД для расчетных режимов движения по ледовому покрову и назначения проектных характеристик главного двигателя (ГД).

Список использованной литературы

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VII. Механические установки : НД 2-020101-174 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023.
2. 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.
3. *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.
4. *Дорофеев Р.А.* Многофункциональный мобильный комплекс транспортно-технологических машин для Арктики. НГТУ им Р.Е. Алексеева, RAO/CIS OFFSHORE. Санкт-Петербург, 2017.
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. *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).
8. *Данилов Р.Г.* Автомобили для бездорожья: снегоболотоход «шнек» // Техника и вооружение вчера, сегодня, завтра. 2010. 42 с.
9. *Daley C.G.* Ice Edge Contact – A Brittle Failure Process Model // Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series. No. 100 (Helsinki, 1991). 92 p.
10. *Kujala P.* Modelling of the ice-edge failure process with curved failure surfaces // Proceedings of Annals of Glaciology / International Glaciological Society. Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Otakaari 4, SF-02150 Espoo, Finland. 1994. Vol. 19. P. 158–164.
11. *Цуприк В.Г.* Влияние угла скола в исследованиях удельной энергии механического разрушения морского льда // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013.

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.

Василий Константинович Грызлов, зам. главного конструктора Центрального конструкторского бюро «Лазурит» (АО «ЦКБ «Лазурит»). Адрес: 603951, Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 57. E-mail: vk_gryzlov@cdb-lazurit.ru.

Сергей Валерьевич Дубров, начальник сектора Центрального конструкторского бюро «Лазурит» (АО «ЦКБ «Лазурит»). Адрес: 603951, Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 57. E-mail: holostyk@mail.ru.

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