

А.А. Петров, М.С. Шилкина
АО «ЦНИИМФ», г. Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК НА НОСОВУЮ ОКОНЕЧНОСТЬ СУДНА, БУКСИРУЕМОГО ВПЛОТНУЮ ЗА ЛЕДОКОЛОМ

Буксировка «на усах» – сложнейшая морская операция. Недостаточное внимание к вопросу обеспечения прочности носовой оконечности может привести к повреждению судна и, как следствие – к невозможности дальнейшей буксировки в штатном режиме и необходимости аварийной буксировки, а также к последующему ремонту судна. Основной трудностью при расчете прочности носовой оконечности судна в районе контакта с кринолином ледокола является корректное определение нагрузок, возникающих в зоне контакта. Целью исследования является обзор существующих методик подобных расчетов и анализ их применимости для выполнения оперативных оценок прочности судов в эксплуатации.

Математические модели буксировки судов «вплотную», методики расчета нагрузки в зоне контакта судна с кринолином ледокола.

Выполнен обзор и анализ существующих методик определения усилия, возникающего к зоне контакта судна с кринолином ледокола.

Из рассмотренных методик наиболее подходящей для поставленных задач в исследовании является методика Купермана. В первом приближении эту нагрузку можно принимать как расчетную при оценке прочности носовой оконечности, однако в дальнейшем возможно уточнение влияния инерционной составляющей буксируемого судна на результирующее ускорение торможения тандема, а также учет демпфирующих свойств кранцевой защиты.

Ключевые слова: буксировка судов во льдах, буксировка вплотную за ледоколом, буксировка «на усах», кранцевая защита ледокола, Северный морской путь, ледокол.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Введение

Российская Арктика – активно развивающийся и имеющий стратегическое значение регион РФ. Обеспечение круглогодичной доставки грузов в арктические порты на данный момент невозможно без привлечения судов в эксплуатации, подчас имеющих возраст более 20 лет. На рис. 1 показано распределение по возрасту судов, постоянно работающих в арктических морях (без учета транзитных рейсов).

Эти суда зачастую спроектированы без учета особенностей навигации в Арктике. Одной из таких особенностей является необходимость проводки судов ледоколом методом буксирования «вплотную» для преодоления особо тяжелых (с точки зрения ледовой обстановки) участков маршрута. Из практики данный метод буксирования применяется в акватории Северного морского пути (далее – СМП) 6 месяцев – с декабря по май. При таком типе буксировки носовая оконечность судна

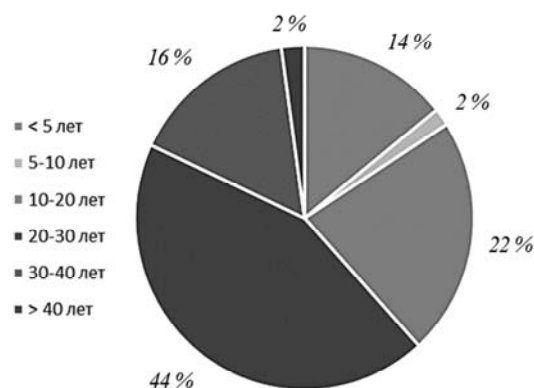


Рис. 1. Возраст судов, постоянно работающих в арктических морях (Источник: Информационная система государственного портового контроля РФ, Регистровая книга Российского морского регистра судоходства. В выборку брались суда ледовых классов Arc4-Arc7, IA и IA Super)

Для цитирования: Петров А.А., Шилкина М.С. Анализ методик определения нагрузок на носовую оконечность судна, буксируемого вплотную за ледоколом. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; Специальный выпуск 1: 11–17.

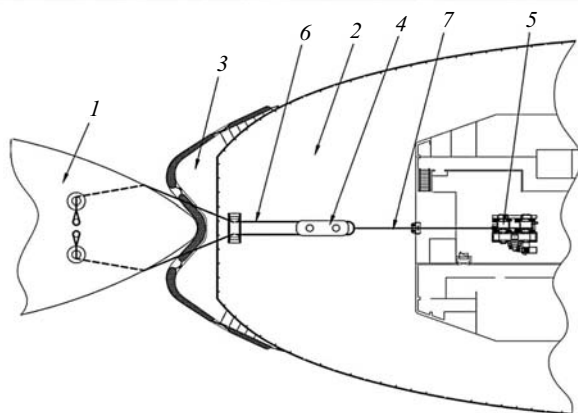


Рис. 2. Схема расположения судна в кормовом вырезе ледокола
1 – буксируемое судно; 2 – ледокол; 3- кринолин;
4 – блок Николаева; 5 – буксирная лебедка;
6 – ветви буксирного стропа; 7 – буксирный трос

фиксируется в кормовом щвырезе ледокола, называемом кринолином, а буксирная линия это – один конец (буксирный строп), закрепленных на судовых кнехтах буксируемого судна и соединенный с помощью блока Николаева с основным буксиром, идущем на буксирную лебедку ледокола (см. рис. 2). Отсюда следует второе, более распространенное на флоте название данной операции – буксировка «на усах».

Буксировка «на усах» – сложнейшая морская операция, безопасность которой зависит как от опыта и квалификации моряков, так и от технических характеристик буксируемого судна и ледокола, вместе называемых тандемом. На сегодняшний день ФГУП «Атомфлот», оказывающим услуги по ледокольной проводке судов на СМП, накоплен богатый опыт буксировки судов, из которого сформированы минимальные требования к буксируемым судам и характеристикам тандема, такие как: соотношение водоизмещений судна и ледокола, форма носовой оконечности судна, расположение якорей и якорных ниш буксируемого судна, несущая способность кнехтов, угол наклона буксирной линии при всех комбинациях осадок судна / ледокола и т.д. Однако даже при выполнении всех этих критериев, есть одна характеристика, оценка которой без соответствующих расчетов невозможно – прочность носовой оконечности в районе контакта с кринолином ледокола. Недостаточное внимание к этому вопросу может привести к повреждению судна (см. рис. 3) и, как следствие, к его временному выводу из эксплуатации, влекущему за собой как финансовые потери для судовладельцев, так



Рис. 3. Пример повреждения носовой оконечности судна в результате буксировки «на усах»

и логистические сбои в работе транспортной системы СМП. Основной трудностью при выполнении расчетов прочности носовой оконечности судна является определение нагрузок, возникающих в районе контакта судна с кринолином, другими словами – силы реакции кранцевой защиты. Целью настоящего исследования является обзор существующих методик подобных расчетов и анализ их применимости для выполнения оперативных оценок прочности судов в эксплуатации.

Способы определения динамических нагрузок на кринолин ледокола

В качестве расчетных усилий, действующих на кранцевое устройство ледокола при выполнении буксировки «вплотную», необходимо принимать максимальную продольную нагрузку, возникающую при резком торможении ледокола. При этом могут быть рассмотрены различные расчетные схемы, основанные на тех или иных допущениях о характере движения тандема.

Анализ литературных источников показал, что иностранные авторы практически не уделяют внимания вопросам буксировки «на усах», за исключением [1], где, впрочем, основной акцент делается на расчетах ходкости тандема и силовых характеристиках буксирного устройства, а вопросы прочности или усилий в кранцевом устройстве ледокола не рассматриваются. Из отечественных разработок можно выделить четыре методики, которые будут рассмотрены ниже.

1.1

В соответствии с исследованиями В.А. Лихоманова и Ю.Н. Попова [2], продольную силу, возникающую в системе «ледокол-судно» и являющейся основной частью суммарного контактного усилия, можно приближенно определить, как для равнозамедленного движения:

$$P = \frac{V_0^2 M_C}{2S_0} k, \quad (1.1)$$

где k – эмпирический коэффициент, учитывающий нелинейность ускорения, которое в рамках данной методики, в процессе торможения системы не зависит от времени; M_C – масса буксируемого судна; V_0 – начальная скорость буксировки перед началом взаимодействия ледокола со льдом; S_0 – длина выбега при торможении.

Методика определения продольной силы при торможении тандема включает длину выбега ледокола, которая, в свою очередь, зависит от скорости буксировки, соотношения масс ледокола и буксируемого судна, характеристик троса.

Практическое использование формулы (1.1) для определения продольного усилия, действующего в кранцах, возможно только при наличии экспериментальных данных о длине выбега или получении их с помощью автоматизированного расчета параметров движения ледокола набегам с эмпирическими коэффициентами [3].

1.2

В методике, предложенной А.Я. Казарезовым и В.Э. Магулой [4], принимается, что для кормового кранца ледокола наиболее опасен момент полной внезапной остановки ледокола в условиях тяжелой ледовой обстановки. Исходя из этого было составлено дифференциальное уравнение движения буксируемого судна в момент остановки:

$$M_S \ddot{y} = -Q + T_{ES}, \quad (1.2)$$

где \ddot{y} – перемещение буксируемого судна относительно ледокола; T_{ES} – тяга судна, зачастую принимается как постоянная; Q – реакция кранца, которая может приниматься как линейная $Q = c_k y$ и нелинейная $Q = (y_0 - y)^n$ характеристики кранцев.

При линеаризованной силовой характеристике кранца уравнение движения (2.2) может быть записано как:

$$Q = T_{ES} - T_{ES} \cos \sqrt{\frac{c_k}{M_S}} t + \frac{V_0 \sqrt{M_S}}{T_{ES} \sqrt{c_k}} \sin \sqrt{\frac{c_k}{M_S}} t. \quad (1.3)$$

Для решения уравнения движения (1.2) при нелинейной силовой характеристике кранца необходимо выполнить численное интегрирование чтобы получить ряд значений $y(t)$ для подстановки в выражение силовой характеристики:

$$t = \int_{u=y_0}^u \frac{dy}{2Du - \frac{2}{(1-n)M_S} u^{1+n} + 2C}, \quad (1.4)$$

$$\text{где} \quad u = y_0 + y; \quad D = \frac{T_{ES} - B}{M_S},$$

$$C = \frac{V_0^2}{2} + \frac{y_0^{1-n}}{(1+n)M_S} - D y_0.$$

Основным недостатком методики является предположение о мгновенной остановке ледокола в процессе буксировки, что практически не может быть реализовано в реальных условиях эксплуатации. В этой связи ее применимость для целей оперативных расчетов прочности носовой оконечности буксируемого судна вызывает сомнения.

1.3

При движении судна с заданной скоростью в сплошном ледовом поле заданной толщины, в соответствии с методикой, предложенной А.М. Куперманом [5], определить величину усилия, действующего на кранец ледокола при буксировке, можно по формуле:

$$F = m_2 \frac{R_T - \sum R_{сomp}}{m}, \quad (1.5)$$

где R_T – равнодействующая сила тяги винтов судов, входящих в тандем; $\sum R_{сomp}$ – полное сопротивление движению тандема; $m = m_1 + m_2$, – масса тандема (m_1 – масса ледокола, m_2 – масса буксируемого судна).

При решении уравнения (1.5) с выполнением некоторых геометрических и алгебраических преобразований можно получить формулу для определения горизонтальной составляющей ускорения торможения:

$$\ddot{x} = -1,31 \cdot 3 \sqrt{\left(\frac{V_0 \sin \phi}{c}\right)^2 \cdot \frac{\sigma_c \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \phi}{m_1}}, \quad (1.6)$$

где v_0 – скорость буксировки перед началом взаимодействия ледокола с торосом; ϕ – угол наклона фор-

штевня ледокола; α – угол наклона носовой ветки ватерлинии впереди идущего ледокола; σ_c – предел прочности льда на смятие; c – коэффициент приведения массы ледокола, определяемый как:

$$c = \frac{\sin^2 \phi}{1 + k_{11}} + \frac{\cos^2 \phi}{1 + k_{33}} + \frac{\cos^2 \phi}{0,28\alpha_B(1 + k_{13})}, \quad (1.7)$$

где k_{11} , k_{33} , k_{13} – коэффициенты присоединенных масс воды; α_B – коэффициент полноты носовой ветки ватерлинии ледокола.

Величину усилия, действующего на крацевое устройство ледокола при ударе форштевнем о неразрушаемое ледяное поле, в первом приближении можно посчитать из зависимости:

$$F = \ddot{x}m_2. \quad (1.8)$$

Недостатком приведенной методики является то, что при определении ускорения торможения тандема не учитывается инерционная составляющая массы буксируемого судна. Однако для случаев, когда водоизмещение судна меньше водоизмещения ледокола¹, влияние этой составляющей на результирующее ускорение торможения тандема не велико.

1.4

Предложенная Н.В. Куликовым и К.Е. Сазоновым [6] математическая модель движения тандема основывается на решении дифференциальных уравнений и аппроксимациях ледовых сил. Система дифференциальных уравнений, описывающая движение тандема, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{D_I}{g}(1 + k_{11}^I)\ddot{\xi}_{gI} &= T_{EI} - R_{WI} - R_{II} - F_T + F_x; \\ \frac{D_I}{g}(1 + k_{33}^I)\ddot{\zeta}_{gI} &= T_{EI}\Psi_I - \rho g S_I(\zeta_{gI} - b_I\Psi_I) - \\ &- F_T\theta_I - F_{zk} + F_{zI}; \\ I_y^I(1 + k_{55}^I)\ddot{\psi}_I &= T_{EI}(h_{SI} + a_I) + \rho g S_I(\zeta_{gI} - b_I\Psi_I) \times \\ &\times (b_I + a_I\Psi_I) - D_I H_I \Psi_I + F_T z_{TI} + \\ &+ F_T\theta_I(0,5L_I - l_{TI}) - F_{zk} z_{kI} + 0,5F_{zk}(L_I - l_k) + M_I. \end{aligned} \quad (1.9)$$

¹ До настоящего времени (зимне-весенняя навигация 2021–2022 гг.) ФГУП «Атомфлот» не брал под проводку методом буксирования «вплотную» суда, водоизмещение которых превышает водоизмещение ледокола, поэтому данное допущение справедливо для целей исследования. Возможность буксировки «на усах» судов большего, чем ледокол, водоизмещения может быть определена в результате углубленного инженерного анализа движения тандема с учетом всех динамических составляющих.

$$\begin{aligned} \frac{D_S}{g}(1 + k_{11}^S)\ddot{\xi}_{gS} &= T_{ES} - R_{WS} - R_{IS} + F_T - F_{xk}; \\ \frac{D_S}{g}(1 + k_{33}^S)\ddot{\zeta}_{gS} &= T_{ES}\Psi_S - \rho g S_S(\zeta_{gS} - b_S\Psi_S) + \\ &+ F_T\theta_S + F_{zk} + F_{zI}; \\ I_y^S(1 + k_{55}^S)\ddot{\psi}_S &= T_{ES}(h_{SS} + a_S) + \\ &+ \rho g S_S(\zeta_{gS} - b_S\Psi_S)(b_S + a_S\Psi_S) - \\ &- D_S H_S \Psi_S - F_T z_{TS} + F_T\theta_S(0,5L_S - l_{TS}) + \\ &+ F_{xk} z_{kS} + 0,5F_{zk}(L_S - l_k) + M_I, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где индекс I относится к ледоколу, а индекс S – к судну; D – весовое водоизмещение судна; I_y – момент инерции массы судна относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести; k_{11} , k_{33} , k_{55} – коэффициенты присоединенных масс; α_B – коэффициент полноты ватерлинии; δ – коэффициент общей полноты; S – площадь действующей ватерлинии; a – отстояние от центра тяжести площади ватерлинии от поперечной плоскости, проходящей через центр тяжести судна; H , м – большая метацентрическая высота; T_E – тяга гребных винтов; h_{SI} , h_{SS} – отстояния линии действия гребных винтов от ватерлинии; ξ_g , $\dot{\xi}_g$, $\ddot{\xi}_g$, ζ_g , $\dot{\zeta}_g$, $\ddot{\zeta}_g$ – проекции перемещения, скорости и ускорения центра тяжести судна на оси $O\xi$ и $O\zeta$; ψ , $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ – угол дифферента, угловая скорость и угловое ускорение корпуса относительно центральной поперечной оси; ρg – удельный вес воды; R_w – сопротивление воды движению судна; F_T – сила натяжения буксирного троса; z_T , z_k – возвышение точек крепления буксирного троса и точек приложения суммарной реакции крацев над центрами тяжести судов; l_{TI} , l_{TS} , м – расстояние от кормы ледокола и носа судна до точки крепления буксирного троса соответственно; F_{xk} , F_{zk} – проекция усилий в крацах на оси координат; θ – угол между осью Ox и линией натяжения троса; $F_{zI}M_{ix}$ – вертикальная составляющая ледового усилий и ледовый момент. За положительное направление действия момента принято вращение против часовой стрелки.

Так как представленная выше система дифференциальных уравнений (1.9) и (1.10) является незамкнутой, ее необходимо дополнить уравнениями связи: кинематическими уравнениями связи и выражениями для расчета ледовых и других сил, необходимых для первой части уравнений. Для определения усилия, возникающего в крацах, необхо-

димо получить кинематическое соотношение – величину внедрения носовой оконечности судна в кормовой вырез. В таком случае нормальное усилие, возникающее в кранцах, можно определить по следующей формуле:

$$N_k = \tilde{F}_k(\bar{s}_k)\Sigma l_k, \quad (1.11)$$

где N_k – нормальное усилие в кранцах; $\tilde{F}_k(\bar{s}_k)$ – погонная нагрузка на кранец; \bar{s}_k – относительное смятие кранца в радиальном направлении, $\bar{s}_k = s_k / D_k$, где D_k – диаметр кранца, Σl_k – суммарная длина кранцевой защиты.

Исходя из рассуждений на стр. 61 [6], при установлении зависимости погонной нагрузки \tilde{F}_k от относительного смятия в радиальном направлении \bar{s}_k были аппроксимированы данные из [5] для одного типоразмера толстостенной резиновой трубы, что, строго говоря, не в полной мере учитывает характеристики кранцевых защит атомных ледоколов, работающих в настоящее время на СМП, поскольку помимо резиновых кранцев в составе кранцевой защиты есть слои плетеных синтетических, растительных и стальных тросов. Величину s_k в [6] предлагается определять в зависимости от величины внедрения носовой оконечности судна в кормовой вырез ледокола v , которая находится следующим образом:

$$v = \frac{s_\xi - i_\xi - (s_\zeta - i_\zeta)tg\phi_s}{\cos\psi_I}; \quad (1.12)$$

$$s_\xi = \xi_S - \xi_{S0} - r_F [\cos\theta_F - \cos(\theta_F + \psi_S)];$$

$$s_\zeta = \zeta_S - \zeta_{S0} + r_F [\sin(\theta_F + \psi_S) - \sin\theta_F];$$

$$i_\xi = \xi_I - \xi_{I0} - r_F [-\cos\theta_k + \cos(\theta_k - \psi_I)];$$

$$i_\zeta = \zeta_I - \zeta_{I0} - r_F [-\sin(\theta_k - \psi_I) - \sin\theta_k],$$

где индексы «0» означают начальные значения параметров, $r_F = \sqrt{z_{kS}^2 + 0,25(L_S - l_k)}$ – расстояние от центра тяжести судна до точки на форштевне, находящейся в плоскости верхней поверхности кранца;

$$\text{угол } \theta_F = \arctg \frac{z_{kS}}{0,5(L_S - l_k)};$$

$r_k = \sqrt{z_{kI}^2 + 0,25(L_I - l_k)}$ – расстояние между кранцами и центром тяжести ледокола; угол

$$\theta_k = \arctg \frac{z_{kI}}{0,5(L_I - l_k)}.$$

В 4-й главе [6] авторами сделана адаптация системы дифференциальных уравнений (1.9) и (1.10) для выполнения практических расчетов:

$$\left\{ \begin{array}{l} (1+k_{11}^I)(D_I/g)\ddot{x}_I = T_{IE}(\dot{x}_I) - R_I(x_I) + \\ + \tilde{F}_k \left(\frac{x_S - x_I}{D_k} \right) \Sigma l_k - R + F_{k0}; \\ (1+k_{11}^S)(D_I/g)\ddot{x}_S = T_{SE}(\dot{x}_S) - \\ - \tilde{F}_k \left(\frac{x_S - x_I}{D_k} \right) \Sigma l_k - F_{k0}, \end{array} \right. \quad (1.13)$$

однако, для определения входящего в систему уравнений (1.13) параметра \tilde{F}_k необходимо решить систему уравнений (1.12), которые, в свою очередь, должны учитывать реальные дифференты судна и ледокола и их взаимное расположение. Таким образом, объем вычислений по методике Куликова-Сазонова остается весьма большим, а сами вычисления – трудоемкими и требующими множество исходных данных. При этом в основе методики определения нагрузки на кранцевое устройство ледокола лежит аппроксимация данных из книги [5] для одного типоразмера толстостенной резиновой трубы, что не может быть признано универсальным решением. Вместе с тем, данная методика наиболее полно описывает движение тандема и учитывает максимальное количество внешних факторов.

Характерные особенности инженерных расчетов, объектами которых являются суда в эксплуатации

Как было отмечено во введении, увеличение грузопотока по СМП в ближайшее время возможно преимущественно за счет привлечения уже эксплуатирующихся судов, возраст которых может быть 10, 20 и даже более лет. На таких судах, сменивших не одного судовладельца, зачастую отсутствует полный комплект проектной документации, исчерпывающая информация о ВРК, результаты модельных или ходовых испытаний и т.д. Поэтому все зависимости и методики, используемые при выполнении любых расчетов, должны требовать минимальный объем исходных данных, причём эти данные должны быть доступны из основных судовых чертежей и документов, наличие которых обязательно в соответствии с требованиями классификационного общества или государственного портового контроля.

Другая особенность судов в эксплуатации – сжатые сроки на выполнение любых изысканий, проектов или ремонта. Если не касаться особенностей взаимодействия между всеми участниками рынка грузоперевозок, то в сухом остатке можно констатировать одно – решение о конкретном рейсе в конкретном районе может приниматься в пределах одного-двух месяцев, а зачастую и быстрее. На оценку пригодности судна к буксировке «на усах» и его модернизацию (в случае необходимости) обычно отводится соразмерное время, то есть около одного месяца. Очевидно, что в такой срок выполнение углубленного инженерного анализа, компьютерного моделирования или модельных/натурных испытаний либо трудно реализуемо, либо экономически не привлекательно для судовладельца.

Таким образом применительно к рассматриваемому вопросу расчет нагрузок на носовую оконечность судна, буксируемого «на усах» должен:

- требовать минимальный объем исходных данных, желательно доступных из основных судовых чертежей и документов;
- быть выполнимым в сжатые сроки.

Рассмотрим соответствие описанных в разделе 1 методик данным критериям.

Анализ применимости существующих методик для оперативных расчетов прочности судов в эксплуатации

В табл. 1 приведено обобщение основных исходных данных, требуемых для выполнения расчетов по методикам, описанным в разделе 1.

Из табл. 1 видно, что методика Купермана – единственная, не требующая исходных данных, недоступных при выполнении предварительного расчета, то есть без проведения натурных испытаний. Все исходные данные могут быть получены из основных судовых документов, за исключением характеристик льда, которые, в свою очередь, достаточно подробно описаны в справочной литературе. Методика Лихоманова-Попова требует информацию о длине выбега при торможении, которая может быть получена в натуральных условиях и будет актуальна только для конкретного судна. Методика Казарезова-Магулы не рекомендуется к применению ввиду основного допущения о мгновенной остановке ледокола, что не может быть реа-

Таблица 1. Исходные данные, требуемые для расчета усилий в кранцевом устройстве ледокола

Параметр	Лихоманов	Казарезов, Магула	Куперман	Куликов, Сазонов	Доступность исходных данных
Водоизмещение и размерения ледокола	–	–	+	+	доступно
Водоизмещение и размерения буксируемого судна	+	+	+	+	доступно
Упор винта ледокола и буксируемого судна	–	+	+	+	труднодоступно
Ледовое сопротивление	–	–	+	+	требует расчета
Параметры посадки судна в процессе движения	–	–	–	+	требует расчета
Характеристики льда (предел прочности, толщина)	–	–	+	+	доступно
Начальная скорость буксировки	+	+	+	–	доступно
Длина выбега при торможении	+	–	–	–	недоступно
Перемещение судна относительно ледокола	–	+	–	+	недоступно
Коэффициенты масс	–	+	+	+	требует расчета
Коэффициенты, характеризующие степень уменьшения тяги при возрастании скорости движения (для судна и ледокола)	–	–	–	+	недоступно
Параметры формы корпуса	–	+	+	+	доступно
Характеристики кранцевой защиты ледокола	–	–	–	+	доступно

лизовано на практике. Наибольшее количество исходных данных требуется для расчетов по методике Куликова-Сазонова, часть из которых могут быть получены либо в результате испытаний, либо с помощью сложных математических преобразований или полуэмпирических методов. Вместе с тем, она учитывает наибольшее число внешних факторов, влияющих на результат, и ее можно по праву считать самой современной и пригодной для исследовательских целей или проектирования новых объектов морской техники. Для целей же оперативных практических расчетов судов в эксплуатации предлагается использовать методику Купермана.

Направления дальнейших исследований

Как отмечается в [6], недостатком методики Купермана является то, что она не учитывает инерционную составляющую буксируемого судна, влияющую на величину ускорения торможения. Поэтому в будущем целесообразно оценить степень этого влияния на результирующее значение нагрузки, возникающей в кранцевом устройстве. Для этих целей специалистами АО «ЦНИИМФ» планируется участие в процессе буксировки судна «на усах» по СМП с последующим сравнением расчетных и реальных параметров движения тандема.

Также в порядке обсуждения стоит отметить, что методика Купермана не учитывает демпфирующие свойства кранцевой защиты, которая, в некоторой степени приводит к снижению расчетной нагрузки на носовую оконечность буксируемого судна. Поскольку в настоящее время на СМП работают атомные ледоколы трех проектов, исследование демпфирующих свойств их кранцевых устройств не должно встретить практических трудностей.

Заключение

Поскольку ощутимая часть привлекаемых на СМП судов изначально не спроектированы для навигации в Арктике, в частности – для буксировки вплотную за ледоколом, для повышения безопасности судоходства таким судам рекомендуется предварительно выполнять оценку прочности носовой оконечности при буксировке «на усах». Учитывая описанные в настоящей работе особен

ности инженерных расчетов, объектами которых являются суда в эксплуатации, такую оценку необходимо выполнять в короткие сроки и с минимальным набором исходных данных. Из рассмотренных методик указанным критериям в наибольшей степени отвечает методика Купермана, согласно которой нагрузки на кранец ледокола определяются по формуле (1.6). В первом приближении эту нагрузку можно принимать как расчетную при оценке прочности носовой оконечности, однако в дальнейшем возможно уточнение влияния инерционной составляющей буксируемого судна на результирующее ускорение торможения тандема, а также учет демпфирующих свойств кранцевой защиты.

Список использованной литературы

1. *Teemu Heinonen*. Notch Towing Operations: Full Scale Measurements and Observations. Research report No. 94. 2016, 41 с.;
2. *Лихоманов В.А., Попов Ю.Н.* Анализ опыта проводки транспортных судов во льдах в кормовом вырезе ледокола. Труды ААНИИ: 1985, с.97-100;
3. *Грамузов Е.М., Калинина Н.В.* Движения ледокола набегами в толстом сплошном ледяном поле. Физические технологии в машиностроении. Н. Новгород: 1998, с.145-152;
4. *Казарезов А.Я., Магула В.Э.* Кранцевая защита. СПб: Судостроение, 1992, с.160;
5. *Куперман А.М.* Кранцевые устройства морских судов. Л.: б.н., Судостроение, 1973, с.128;
6. *Куликов Н.В., Сазонов К.Е.* Буксировка судов во льдах. СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2003, с.158.

Сведения об авторах

Петров Алексей Анатольевич, к.т.н., заведующий отделом конструктивной надежности и модернизации судов АО «ЦНИИМФ». Адрес: г. Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А. Тел.: 8 (812) 490-96-19. E-mail: Petrov25@cniimf.ru.

Шилкина Марина Сергеевна, инженер 1-й категории отдела конструктивной надежности и модернизации судов АО «ЦНИИМФ». Адрес: г. Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А. Тел.: 8 (812) 490-96-19. E-mail: ShilkinaMS@cniimf.ru.