

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК И ТРЕБОВАНИЙ К КОНСТРУКЦИЯМ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ

Е. М. Апполонов

Центральное конструкторское бюро «Лазурит» (Нижний Новгород, Российская Федерация)

В. В. Платонов

Крыловский государственный научный центр (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

В. Н. Тряскин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 января 2020 г.

Представлен анализ развития методов определения ледовых нагрузок и требований к конструкциям ледовых усилений от основанных на чисто эмпирических подходах до вытекающих из современных физических представлений о взаимодействии корпуса судна со льдом. Более подробно рассмотрены требования к ледовым усилениям, наиболее широко применяющиеся в практическом проектировании: Финско-шведские требования, которые были разработаны еще в начале 70-х годов прошлого века и до настоящего времени являются в зарубежной практике базовыми для проектирования конструкций ледовых усилений судов, предназначенных для эксплуатации в относительно легких ледовых условиях; Канадские требования к корпусным конструкциям судов, направленные на предотвращение загрязнения канадской Арктики; требования, разработанные российскими специалистами, включенные в Правила Российского морского регистра судоходства, которые являются основными для судов, эксплуатирующихся в российской Арктике; унифицированные требования Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) для полярных судов, базирующиеся на канадском и российском подходах, включенные в Правила классификационных обществ – членов МАКО.

Ключевые слова: *методы определения ледовых нагрузок, требования к ледовым усилениям, Правила классификационных обществ.*

Введение

Первые работы, в которых делались попытки теоретически обосновать взаимодействие судна со льдом, появились в конце XIX в. В 1890 г. Р. И. Рунберг предложил формулу для определения величины вертикальной составляющей давления льда и толщины ломаемого льда при непрерывном движении ледокола [1]. В. И. Афонасьев [2] в 1897 г. получил эмпирическую зависимость, связывающую мощность силовой установки, скорость хода ледокола и толщину форсируемого им льда. Эти рабо-

ты, а также ряд исследований адмирала С. О. Макарова [3] были использованы при проектировании, постройке и эксплуатации ледокола «Ермак», на котором была предпринята первая попытка активного плавания во льдах. С. О. Макаров отметил ударное взаимодействие носовой оконечности со льдом и раздробление кромки льда. Повреждение носовой оконечности заставило пересмотреть конструктивное оформление и размеры ледового пояса в носовой части ледокола. После проведения в 1889—1890 гг. С. О. Макаровым и академиком А. Н. Крыловым первых опытов по исследованию движения ледокола «Ермак» во льдах в исследовательской работе по ледоколостроению наступил длительный перерыв.

Дальнейшее освоение морей Советской Арктики и Дальнего Востока потребовало строительства судов, приспособленных для эксплуатации в ледовых условиях. Активное проектирование и строительство ледоколов и транспортных судов ледового плавания началось в 1930-х годах. Одновременно шло систематическое изучение ледовых качеств судов, в основном ледовой ходкости и прочности, поскольку существовавший в то время советский ледокольный флот был построен за границей¹ и никаких материалов по оценке качеств судов как в отношении прочности, конструкции корпуса, так и в части мореходных и ледовых качеств не имелось. Единственным критерием надежности ледоколов и транспортных судов ледового класса был опыт эксплуатации. Поэтому исследования были начаты с систематизации этого опыта и натурных испытаний судов в условиях ледового плавания.

Значительный объем экспериментов был проведен в 1933—1934 гг. во время арктических рейсов ледоколов «Челюскин», «Садко», «Сибиряков», «Ермак» и др. Особенно важными были результаты испытаний ледокола «Ермак». Обобщил эти результаты П. Ф. Папкович [5]. Он сформулировал основные проблемы, на разработку которых следовало направить дальнейшие усилия. Указывалось на необходимость изучения удара о лед и ледовых сжатий. Намечены три основных метода исследований: теоретический анализ нагрузок, опасных для конструкций корпуса судов во льдах; систематизация и анализ ледовых повреждений конструкций корпуса судна и тех усилий, которых они не выдерживают; исследование фактической прочности корпусов судов при действии ледовых нагрузок путем натурных тензометрических испытаний. А. И. Маслов [6] в 1937 г. сформулировал весьма важное положение о том, что величина ледовой нагрузки не может превзойти усилие, разрушающее ледяной покров, т. е. к указанному П. Ф. Папковичем добавляется проблема несущей способности ледяного покрова. Последующие работы в основном были направлены на выполнение отдельных частей этой программы.

В связи с большими трудностями определения абсолютных величин ледовых нагрузок вопросы обеспечения прочности проектируемых ледоколов и транспортных судов ледового плавания в 1930-х годах решали исключительно с помощью сравнительного анализа и сопоставления с прототипом. Следует отметить работы И. В. Виноградова [7], который предложил метод сравнения ледокольных качеств судов при непрерывном движении во льдах и форсировании ледяных полей набегами. В 1938 г. академик Ю. А. Шиманский предложил метод условных измерителей ледовых качеств судов [8]. В качестве основной задачи он предполагал добиться соответствия между ледокольной мощностью судна

и прочностью его корпуса. Эта работа оказала большое влияние на дальнейшее развитие исследований по проблемам судов ледового плавания.

В. В. Давыдов на основании результатов испытаний ледоколов «Садко» и «Сибиряков» во время экспедиций 1935—1936 гг. указал на локальный характер ледовой нагрузки [9]. Он предполагал, что давления льда не могут превосходить предела прочности льда на смятие. Им же была сделана одна из первых попыток теоретического исследования удара корабля о льдину [10]. Он определил ударный импульс на основании решения задачи о внецентренном косом ударе корпуса судна о лед. Для определения контактного усилия решалось дифференциальное уравнение движения судна в процессе удара.

Следует отметить работы по испытанию ледоколов «Ермак» и «Трувор», выполненные в начале 1940-х годов В. И. Негановым, Л. М. Ногидом и А. С. Фишером, в которых отмечалось, что лед при ударе не сминается на всю толщину, площадь контакта возрастает до тех пор, пока льдина способна воспринимать контактное усилие, не разрушаясь от изгиба.

В 1943—1947 гг. были опубликованы работы Г. С. Шапиро [11], С. С. Голушкевича [12], Л. С. Гильмана [13] по изгибу ледяных пластин на упругом основании. Полученные решения использовались для оценки несущей способности ледяного покрова.

К 1950-м годам при проектировании ледоколов второго поколения стало ясно, что прямое следование методу условных измерителей Ю. А. Шиманского бесперспективно, и особенно остро встал вопрос об определении абсолютных величин расчетных ледовых нагрузок. Работы специалистов Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) послужили основой для создания физических моделей взаимодействия корпуса судна со льдом.

Эмпирические требования Правил Регистра СССР

Требования к конструкции корпуса судов ледового плавания и ледоколов входят в состав Правил Регистра СССР (Российского морского регистра судоходства) уже более 70 лет. До середины 1970-х годов требования к ледовым усилениям корпуса были основаны на эмпирическом подходе [14]. Так, толщина наружной обшивки в районе ледового пояса устанавливалась в виде процентной надбавки (15—60%) к толщине обшивки неподкрепленного корпуса судна в зависимости от категорий ледовых усиления и районов по длине корпуса судна. Усиление бортового набора заключалось в установке промежуточных шпангоутов и увеличении на 20% момента сопротивления основных шпангоутов. При этом промежуточные шпангоуты могли иметь момент сопротивления на 25—50% меньше, чем основные. Они заканчивались за пределами ледового пояса на интеркостельной связи или про-

¹ Обстоятельный обзор состояния ледокольного флота России в 1860—1918 гг. содержится в монографии В. А. Андриенко [4].

сто срезались на ус. Поэтому требуемые размеры основных шпангоутов не допускалось принимать меньше получаемых из расчета на забортное давление воды без учета наличия промежуточных шпангоутов. В районе ледового пояса требовалось введение интеркостельных стрингеров с наибольшим расстоянием между ними 1,4 м.

Финско-шведские правила морской администрации 1971—1983—2019 гг.

Требования Финско-шведских правил (ФШП) [15] основаны на работе Б. Юханссона [16]. Он исследовал повреждения корпусных конструкций более 200 судов различных ледовых классов и расчетным путем определил предельные нагрузки для отдельных элементов конструкций ледового пояса. По результатам расчетов установлена статистическая зависимость между средней интенсивностью ледовой нагрузки p , массой судна Δ и мощностью энергетической установки P в виде $p = a + m\sqrt{\Delta P}$, в которой величины a и m зависят от ледового класса и от района ледового пояса по длине судна. Расчетное давление p_s устанавливается несколько больше, чем среднее $p_s = k_s p$, где $k_s = 1,75$ — коэффициент, выбираемый таким образом, чтобы кривая $p_s = f(\sqrt{\Delta P})$ охватила все случаи, связанные с повреждениями конструкций ледового пояса. Вероятно, такое значение коэффициента k_s было выбрано не случайно. Оно находится в хорошем соответствии с соотношением между предельной нагрузкой и нагрузкой фибровой текучести для балок основного набора ледового пояса. В дальнейшем это позволило перейти к простым расчетным зависимостям для определения размеров набора ледового пояса, основанных на расчетах в упругой стадии и критериях фибровой текучести [17].

В первоначальной редакции ФШП предполагалось, что контактные давления не могут превышать предел прочности льда на сжатие σ_c , который ограничивался величиной 30 кг/см² (3 МПа). С учетом этого обстоятельства наибольшая расчетная нагрузка ограничивалась значением $p_{\max} = \sigma_c / 1,75 \cong 16,5$ кгс/см² (1,65 МПа). Для разных ледовых классов и районов по длине судна регламентировались свои предельные значения расчетного давления. Ледовая нагрузка считалась равномерно распределенной на участке борта высотой 0,8 м. Форма обводов судна при определении ледовой нагрузки не учитывалась.

В ФШП впервые появились требования к минимальной мощности силовой установки судна в зависимости от ледового класса (Ice Class, IC) и водоизмещения, Δ в виде $P = k(IC)\Delta + P_0(IC)$, при этом $P_{\min}(IC) \leq P \leq P_{\max}(IC)$.

В январе 1983 г. на совещании рабочих групп по ледовым усилениям судов для стран Балтийского бассейна был принят проект новой версии требований к ледовым усилениям корпусов судов [18]. Эти требования устранили ряд существенных недостат-

ков требований ФШП-1971. Требования распространяются на суда, эксплуатирующиеся в Северной Балтике зимой. Администрациями Швеции и Финляндии допускалось использование ледаколов для проводки судов. Классификация не изменилась по сравнению с правилами 1971 г. Внесены незначительные изменения в части протяженности ледовых усилений. В отношении нормирования ледовых нагрузок на обшивку и набор ледового пояса сделаны существенные изменения: ликвидировано ограничение сверху на величину расчетного давления, значительно уменьшены значения расчетной высоты распределения ледовой нагрузки, которые стали зависеть от ледового класса и приниматься в долях от расчетной толщины льда.

При разработке новых требований Правил были широко использованы испытания теплохода «Игрим» и буксира «Раума 1», проведенные судоверфью А/О «Раума-Реппола». Кроме того, использовались данные испытаний, начатых в 1983 г. на теплоходе «Аркутурус». Испытания теплохода «Игрим» проводились с использованием датчиков давлений, встроенных в наружную обшивку. Наиболее важный результат измерений на теплоходе «Игрим» — были зарегистрированы давления льда в размере 8,5 МПа, которые значительно превосходят предел прочности льда на местное смятие. Кроме того, наибольшие значения давлений получены в обшивке у шпангоутов, что подтвердило подход редуцирования расчетных давлений для пластин наружной обшивки, принятый в ФШП-1971. Увеличение контактного давления в районе шпангоутов по сравнению с давлением в пролете пластины (между шпангоутами) объяснялось податливостью наружной обшивки. В результате были предложены новые зависимости для определения расчетных нагрузок, которые сохранены и в действующих в настоящее время требованиях ФШП:

- Расчетное давление определяется по формуле

$$p = p_0 C_d C_1 C_a,$$

где $p_0 = 5,6$ МПа — номинальное значение контактного давления; C_d — коэффициент, учитывающий влияние массы судна и мощности силовой установки; C_1 — коэффициент, учитывающий класс судна и район ледовых усилений по длине судна; C_a — коэффициент, учитывающий влияние длины распределения ледовой нагрузки, которая для разных элементов и систем набора конструкций ледового пояса принимается различной.

- Расчетная высота зоны контакта определяется табулированной функцией $h_0 = f_h(IC)$ в зависимости от ледового класса судна IC и находится в диапазоне 0,20—0,35 м. Следует отметить, что (как и в исходных требованиях ФШП-1971) параметры ледовой нагрузки не зависят от формы корпуса в точке контакта со льдом, что вряд ли следует признать правильным.

Требования к обшивке и балкам основного набора ледового пояса по сравнению с Правилами 1971 г. претерпели существенные изменения:

- учитываются влияние локального характера ледовой нагрузки (для обшивки и набора) и неравномерность распределения контактных давлений (для обшивки) в связи с различной жесткостью обшивки ледового пояса в районах расположения балок набора и за их пределами;
- полностью изменена расчетная схема шпангоутов для определения момента сопротивления поперечного сечения, учтено (правда, очень упрощенно) влияние граничных условий для расчетного пролета;
- расчетные формулы для определения размеров продольных балок при продольной системе набора борта учитывают перераспределение нагрузки на смежные балки, неравномерное распределение нагрузки по пролету, конструкцию узлов закрепления балок в опорных сечениях.

Требования для определения размеров балок рамного набора также пересмотрены:

- структуру расчетной зависимости для определения требуемого момента сопротивления поперечного сечения рамного шпангоута можно расценить как попытку оценивать прочность рамных шпангоутов по некоторым приведенным напряжениям, учитывающим взаимное влияние изгибающего момента и перерезывающей силы;
- при определении размеров бортовых стрингеров при системе набора с рамными шпангоутами принимаются во внимание эффект упругого основания, создаваемого обыкновенными шпангоутами, неравномерное распределение нагрузки по пролету, конструкция узлов закрепления стрингеров на рамных шпангоутах.

Предложения 1983 г. сохранились в действующих ФШП (см., например, [19]) практически в неизменном виде.

Канадские правила 1972 г.

Требования Канадских правил к ледовым усилениям корпусов судов 1972 г. являются составной частью законодательства Канады по предотвращению загрязнения арктических морей [20]. Канадская Арктика разделена на 16 зон, и для каждого ледового класса оговариваются сроки плавания в определенной зоне. Для судов предусмотрено девять классов (1, 1А, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10). Различий между транспортными судами и ледоколами не делается. Номер класса соответствует толщине в футах сплошного льда, который судно должно преодолевать непрерывным ходом. Таким образом, ледовый класс связывается с ледопроеходимостью судна.

Особенностью Канадских правил 1972 г. по сравнению со всеми остальными, включая Правила Регистра СССР 1981 г., являлось назначение районов усиления. Было предусмотрено шесть таких районов: носовой, средний, кормовой, верхний переходный,

нижний переходный, нижний носовой. По сравнению с Финско-шведскими правилами и Правилами Регистра СССР в канадских требованиях регламентируется значительно бо́льшая протяженность ледового пояса по высоте борта. Причем размеры ледового пояса не связываются с размерами судна. Возможен вариант, когда верхняя кромка ледового пояса формально оказывается выше верхней палубы. Непонятно, как трактовать требование, что нижняя граница ледового пояса должна располагаться более чем на 9 м ниже балластной ватерлинии (для 10-го класса). Кроме того, ни одни правила кроме Канадских в то время не регламентировали переходных районов. Целесообразность введения верхних переходных районов, проектируемых на воздействие льда, сомнительна. Практика введения нижних переходных районов явно оправданна.

Подход к назначению расчетных ледовых нагрузок в Канадских правилах 1972 г. также очень упрощенный. Интенсивность ледовой нагрузки зависит только от ледового класса и района по длине судна. Ни масса судна, ни форма корпуса, ни мощность силовой установки не учитываются. Максимальная интенсивность ледовой нагрузки для 8-го и 10-го классов составляет 10,4 МПа, что приблизительно соответствовало расчетной нагрузке на наружную обшивку ледоколов класса ЛЛ2 Правил Регистра СССР 1981 г.

Расчетные зависимости для определения размеров элементов конструкций ледового пояса в Канадских правилах 1972 г. практически соответствуют требованиям ФШП-1971. Требования к рамным балкам сформулированы очень поверхностно.

Никакого соответствия между требованиями Канадских правил 1972 г. и Правил Регистра СССР 1981 г., разработанным в конце 1970-х годов, установить невозможно. Требования Регистра СССР к размерам элементов конструкций ледовых усиления укладываются между 1-м и 2-м канадскими классами. Крупнотоннажные суда с категорией ледовых усиления УЛА приближаются к 3-му канадскому классу (ледопроежимость около 0,9 м). Однако суда типа «Норильск» (СА-15) преодолевали непрерывным ходом лед толщиной 1,0—1,2 м, что соответствует 3—4-му классу, а по классификации имеют корпус, приблизительно соответствующий 2-му классу. В сложных ледовых условиях осени 1983 г. конструкции корпуса в районе ледового пояса этих судов показали высокую надежность в эксплуатации². Поэтому нельзя признать, что в Канадских

² Конструкции ледовых усиления судов типа СА-15 проектировались с учетом требований Правил Регистра СССР 1981 г. В части нормирования требований к конструкциям ниже ледового пояса Правила содержали общие указания об обеспечении плавного изменения толщин от ледового пояса к плоскому днищу. Предполагалось, что плавное изменение толщин будет обеспечиваться за счет введения переходных поясов. Финская фирма-проектант обеспечила это введением ласки на нижнем листе ледового пояса с переходом

правилах решена задача соответствия прочности корпуса условиям ледового плавания. Для среднего района имеется совершенно сходная ситуация. Следовательно, требования канадских классов выше 3-го могли быть применены только к ледаколам либо крупнотоннажным судам.

Требования ААНИИ. Правила Регистра СССР 1974 г.

Зарубежные требования к конструкции корпуса судов ледового плавания и ледаколов, появившиеся в 1970-х годах, основаны на обобщении опыта ледового плавания и анализе повреждений судовых конструкций. Они были сугубо эмпирическими, применимыми для судов относительно небольших размеров с традиционной формой корпуса.

В российской практике получил развитие другой подход к определению ледовых нагрузок, основанный на исследовании процесса взаимодействия корпуса судна со льдом. Эмпирические данные использовались для верификации моделей взаимодействия и оценки величин характеристик прочности льда, входящих в расчетные зависимости.

Работы по созданию физической модели взаимодействия корпуса судна со льдом при ударе и ледовых сжатиях были начаты в конце 1950-х годов. Первая модель была предложена в ААНИИ Д. Е. Хейсиным [21] в 1962 г. Суммарное контактное усилие при ударном взаимодействии корпуса судна со льдом определялось в результате решения дифференциального уравнения внедрения борта судна в лед в направлении удара

$$M_{red}v \frac{dv}{d\zeta} = - \int_F p dF \quad (1)$$

при начальном условии $v_{\zeta=0} = v_{red}$ и конечном условии $v_{\zeta=\zeta_{max}} = 0$, где M_{red} и v_{red} — масса и скорость судна, приведенные к направлению удара; v — скорость внедрения борта судна в лед; p — давление в зоне контакта; F — площадь зоны контакта; ζ — глубина внедрения борта судна в лед.

В этой работе для определения нагрузки на набор контактные давления p в зоне удара предполагались равными эффективному значению предела прочности льда на смятие σ_c и распределенными по некоторой зоне контакта. Размеры зоны зависели от глубины внедрения борта в лед и конфигурации

на толщины, регламентируемые общими требованиями Правил. Такое конструктивное решение при первой эксплуатации во льдах привело к массовым повреждениям (гофрировке) скуловых поясов наружной обшивки. После этого в Правила Регистра СССР 1981 г. были введены требования к нижним переходным поясам наружной обшивки в виде условных расчетных ледовых нагрузок, что заставляет проектанта обеспечивать плавный переход путем введения переходных листов меньшей толщины чаще всего при сохранении промежуточного набора.

кромки льдины. Значения приведенной массы и скорости ударного взаимодействия определялись на основе решения Ю. Н. Попова [22].

Из условия $p = \sigma_c = \text{const}$ следует, что давление на обшивку ледового пояса должно приниматься постоянным, т. е. толщина обшивки не зависит от массы судна, формы корпуса, района по длине и пр. Это противоречит практике проектирования судов. Для обхода этого противоречия нагрузка на обшивку определялась в рамках метода условных измерителей Ю. А. Шиманского — пропорциональной нагрузке на бортовой набор $q = \sigma_c b(\zeta_{max})$ с учетом данных по судам-прототипам.

Продолжительность ударного взаимодействия по предложенной модели получается близкой к данным натурных испытаний, а форма ударного импульса неверна. Вместо колоколообразного импульса, наблюдаемого при обработке результатов испытаний, получается импульс с максимумом, смещенным в конец удара, когда зона контакта имеет максимальную величину.

На основе этой модели были разработаны «Требования к классификации и постройке судов ледового плавания и ледаколов» ААНИИ 1964 г. [23], многие положения которых использовались при составлении Правил Регистра СССР по ледовым усилениям судов 1974 г. [24].

Для определения расчетных ледовых нагрузок по требованиям Правил 1974 г. необходимо проанализировать форму корпуса судна на уровне расчетной ватерлинии в районе носового заострения, определить углы наклона ватерлинии к диаметральной плоскости, α и шпангоутов к вертикали, β в заданных сечениях. Масса судна учитывается в расчетных зависимостях косвенно через его длину L . Нагрузка для определения толщины обшивки ледового пояса в носовом районе ледовых усилений представлена в виде расчетного давления $p = K_p(IC)L(1+2L/1000)\alpha^{4/5}u_1(\beta)$, т/м^2 . Для определения размеров балок набора регламентируется величина погонной нагрузки: $q = K_q(IC)L(1+2L/1000)\alpha^{4/5}u_2(\beta)$, т/м ; $K_p(IC)$ и $K_q(IC)$ — числовые коэффициенты, зависящие от категории ледовых усилений; $u_1(\beta)$, $u_2(\beta)$ — табулированные функции угла β и абсциссы расчетного сечения. Расчетные нагрузки для районов, расположенных за пределами носового, определяются простыми зависимостями:

$$p = \max \{ [L - \delta(IC)]; p_{\min}(IC) \},$$

$$q = \max \{ k(IC)L; q_{\min}(IC) \}.$$

Расчетная высота зоны контакта не нормируется. Ее значение может быть оценено косвенно из соотношения $b = q/p$.

Размеры элементов конструкций ледовых усилений определяются на основе критерия фибровой текучести. Для обшивки используется модель жест-

козаделанной балки-полоски, для обыкновенных шпангоутов при системе набора без рамных шпангоутов — модель неразрезной балки, нагруженной в середине пролета сосредоточенной силой $P = qa$ (a — расстояние между соседними шпангоутами). При системе набора с рамными шпангоутами требования для определения размеров основных, промежуточных, рамных шпангоутов и несущих стрингеров определяются по модели перекрытия, нагруженного в линию погонной нагрузкой интенсивностью q .

Попытка отказаться от допущения $p = \sigma_c = \text{const}$ была предпринята Д. Е. Хейсиным в 1966 г. [25]. Для определения ударных контактных усилий рассматривалась задача о вытеснении раздробленного льда из зоны контакта, которое описывалось упрощенной системой уравнений Рейнольдса для тонкого слоя вязкой жидкости. Толщина слоя принималась постоянной. Решение задачи в такой постановке дало приемлемую форму ударного импульса, но привело к физически неправдоподобному времени соударения. В результате полученное решение оказалось непригодным для разработки практической методики.

К середине 1960-х годов фактически были сформулированы основные задачи, решение которых необходимо для определения ледовых нагрузок, и частично намечены пути их решения. Для реализации этой программы требовалось выполнить большой объем исследований. Эти экспериментальные и теоретические исследования проводились в 1967—1977 гг. На основании накопленного к середине 1970-х годов теоретического и экспериментального материала появилась возможность приступить к разработке современных методов определения нагрузок на конструкции судов ледового плавания.

Гидродинамическая модель взаимодействия корпуса судна со льдом. Принципы нормирования ледовой прочности. Правила Регистра СССР 1981 г.

В 1974 г. Д. Е. Хейсин и В. А. Курдюмов разработали гидродинамическую модель (ГДМ) удара твердого тела о лед [26]. Для определения контактных усилий рассматривался процесс вытеснения раздробленного льда (промежуточного слоя) из зоны смятия. Контактное давление для случая одномерного вытеснения, которое справедливо, если зона контакта значительно вытянута в продольном направлении, определяется зависимостью

$$p = v^{0,25} \left(6\mu k_p^3 \right)^{0,25} \left(\alpha^2 - \bar{x}^2 \right)^{0,25} \left(\frac{b}{2\alpha} \right)^{0,25}, \quad (2)$$

где v — скорость внедрения тела в лед; μ — коэффициент внутреннего трения в промежуточном слое; k_p — гипотетический коэффициент, устанавливающий связь между контактными давлениями p и толщиной промежуточного слоя h в виде $p = k_p h$; $\alpha > 1,0$ — коэффициент, учитывающий сколы по

краям зоны смятия; b — высота зоны смятия; $\bar{x} = 2\alpha x / b$ — относительная координата соответствующей точки зоны контакта.

Решение уравнения движения судна по нормали к борту в точке удара (1) с использованием полученной зависимости для контактных давлений дает возможность определить максимальные значения параметров ледовой нагрузки: суммарную силу P_{S_max} , давление p_{max} , погонную нагрузку q_{max} и соответствующую ей высоту зоны контакта b_{max} . Это позволило разработать требования к конструкциям корпуса ледоколов, для которых расчетным является удар об очень толстый лед, не разрушаемый от изгиба при ударе [27]. При этом, естественно, ледовые нагрузки не зависят от толщины льда.

Прочность конструкций транспортных судов не позволяет эксплуатировать их в аналогичных условиях, следовательно, нельзя использовать эту методологию при проектировании ледовых усилений. Поэтому следующим шагом было создание физической модели взаимодействия корпуса со льдом ограниченной толщины с учетом его изгибного разрушения при ударе, ограничивающего величину контактного усилия. На основе такой модели была разработана единая схема назначения расчетной ледовой нагрузки на различные элементы конструкций ледового пояса транспортных судов всех ледовых классов [28], включая нагрузки при прямых и отраженных ударах, при маневрировании и циркуляции. Нагрузка, разрушающая ледяной покров при изгибе, принималась по решению, предложенному Д. Е. Хейсиным [29]: $P_z = 1,33\sigma_f H^2$ (σ_f — предел прочности льда на изгиб, H — толщина льда). Определение ледовых нагрузок при ударе о не разрушаемое от изгиба ледяное поле вытекает из такой модели как частный случай.

Параметры расчетной ледовой нагрузки были представлены в виде следующих зависимостей:

$$P_S = f_p(k) P_{S_max}, \quad p = f_p(k) p_{max},$$

$$b = f_b(k) b_{max}, \quad q = f_q(k) q_{max},$$

где f_p, f_p, f_b, f_q — некоторые функции параметра $k = v_d / v_{red}$, определяемого несущей способностью ледяного покрова и равному отношению скорости v_d внедрения борта судна в лед, при которой происходит разрушение льда от изгиба, к исходному значению приведенной скорости v_{red} .

На основе этих зависимостей были разработаны принципы нормирования ледовой прочности конструкций транспортных судов и рекомендации для определения расчетных ледовых нагрузок на обшивку и набор ледового пояса судов ледового плавания. Из условия $P_S = P_{Ice_b} = P_{Str}$, в котором P_S — суммарное контактное усилие, P_{Ice_b} — сила, разрушающая лед толщиной H , P_{Str} — величина суммарной контактной силы, которую может воспринять

данная конструкция в соответствии с принятым критерием прочности, которую принято называть «строительной прочностью» конструкции. Из этого условия для каждой точки носового заострения можно получить поверхность ледовой прочности — функцию, связывающую три параметра: v_0 , a_p , H : v_0 — скорость поступательного движения судна в момент удара о кромку льда (рис. 1), H — толщину льда, a_p — измеритель динамической прочности льда на раздробление. Линии пересечения поверхности ледовой прочности с плоскостями $a_p = \text{const}$ задают комбинацию v_0 и H , при которых в конструкциях бортового перекрытия возникает заданное предельно допустимое состояние.

Каждое сечение по длине носовой оконечности характеризуется своей поверхностью ледовой прочности вследствие изменения строительной прочности и формы корпуса. При удалении от носового перпендикуляра к району перехода в цилиндрическую вставку кривые $v_0(H)$ смещаются в зону меньших толщин льда и больших скоростей (см. кривые 1 на рис. 2).

При движении во льдах судно может удариться о ледяное поле любым участком носовой оконечности. Поэтому допустимые скорости и толщины льда определяются огибающей $v_0(H)$ (кривая 2 на рис. 2), вид которой позволяет говорить о некоторых квазиасимптотических значениях v_0 и H , которые трактуются как безопасные скорость v_s и толщина льда H_s . Во льду с толщиной не более безопасной судно может двигаться с любой достижимой скоростью. При движении с безопасной скоростью нет ограничений по толщине льда из условия прочности конструкций. Значения безопасных скорости и толщины льда характеризуют категорию ледовых усилений, так как они задают допустимые условия плавания во льдах.

Нормативные кривые безопасных скоростей $v_s(\Delta)$ (рис. 3) и безопасных толщин льда $H_s(\Delta)$ (рис. 4), построенные на основе зависимостей ГДМ и обобщения опыта проектирования конструкций судов ледового плавания, были заложены в основу требований к ледовым усилениям Правил Регистра СССР 1981 г. Значения безопасной скорости снижаются с увеличением массы (водоизмещения) судна Δ , а значения безопасной толщины льда возрастают. Особенно это относится к судам малых ($\Delta < 20$ —25 тыс. т) и средних ($\Delta < 30$ —40 тыс. т) размеров, что свидетельствует о неравнопрочности судов различных размеров в пределах одной ледовой категории. Результаты исследований позволили экстраполировать требования Правил Регистра 1981 г. на суда с водоизмещением до 60 тыс. т. В 1979 г. впервые на основе требований Правил были разработаны конструкции ледовых усилений корпуса крупнотоннажного судна с водоизмещением около 60 тыс. т — лихтеровоза с атомной энергетической установкой «Севморпуть». На основе требований Правил Регистра СССР 1981 г. с конца 1970-х до

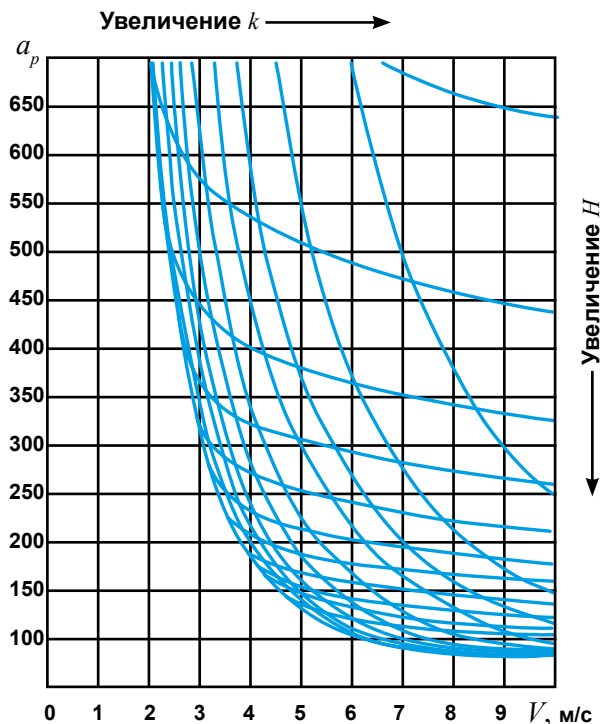


Рис. 1. Поверхность ледовой прочности
Fig. 1. Ice strength surface

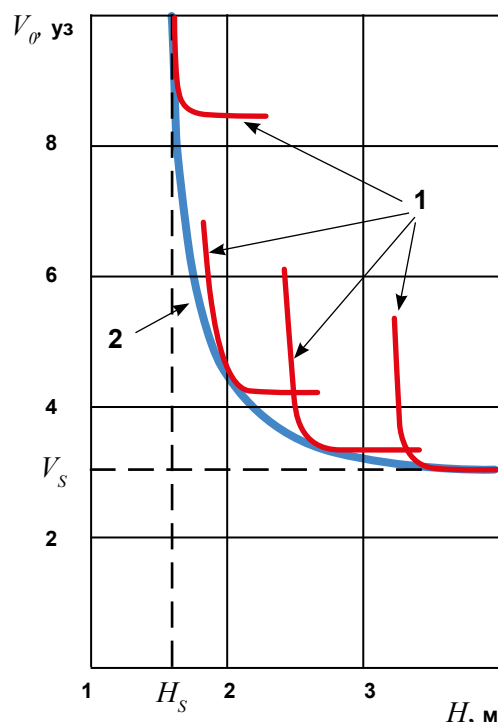


Рис. 2. Кривая допустимых скоростей
Fig. 2. Allowable Speed Curve

конца 1990-х годов было построено значительное количество судов ледового плавания, которые длительное время составляли основу арктического флота России.

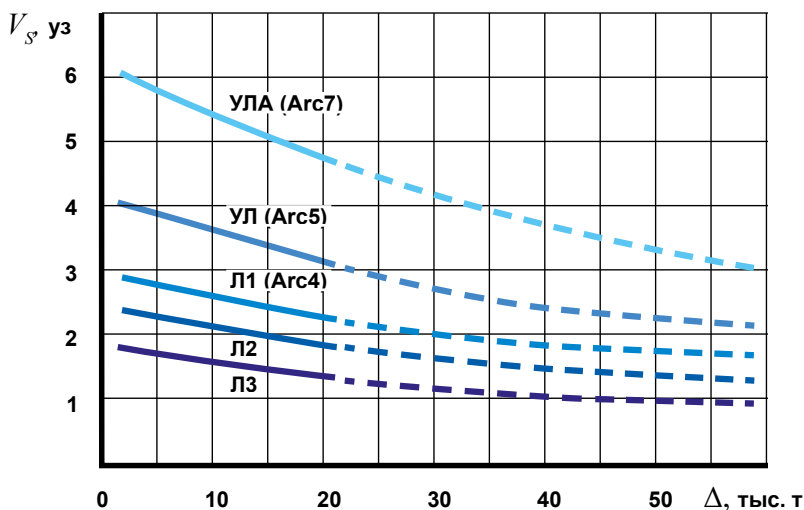


Рис. 3. Нормативные кривые безопасных скоростей
Fig. 3 Safety speed reference curves

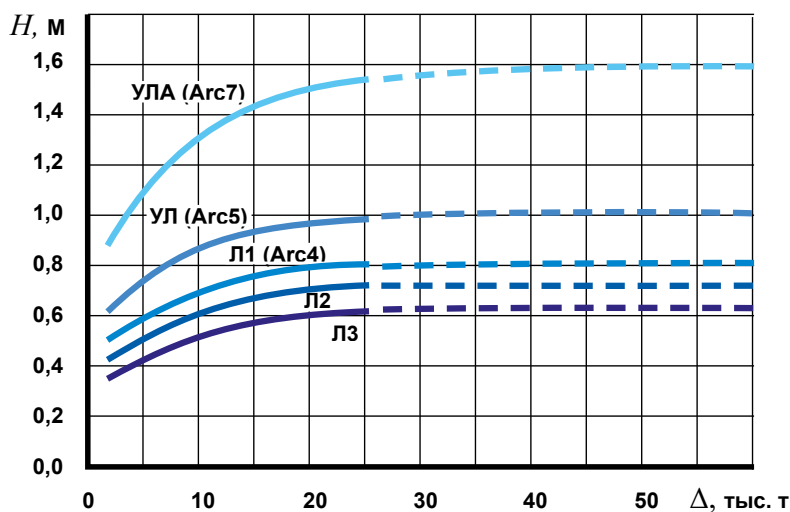


Рис. 4. Нормативные кривые безопасных толщин льда
Fig. 4. Reference curves of safe ice thicknesses

**Эмпирическая модель: Pressure — Area.
Канадские правила 1995 г.**

В 1989 г. появились новые «Требования по предотвращению загрязнения арктических морей с судов» (Arctic Shipping Pollution Prevention Regulation — ASPPR), содержащие также новые требования к корпусу судна [30]. Два принципа, заложенные в основу этих требований, существенно отличают их от требований 1972 г.:

- доступ к любой географической зоне должен быть связан с ледовыми условиями, преобладающими в этой зоне;
- категория (ледовый класс) должна быть мерой прочности корпуса судна, связанной с типом льда, при котором судно может безопасно работать.

Требования 1989 г. основаны на обобщении опыта эксплуатации в морях Канадской Восточной и Западной Арктики нескольких судов, построенных в соответствии с требованиями 1972 г., имевших 2—4-й арктический класс: «Arctic», «Terry Fox», «Kalvik», «Canmar Kigoriak»,

«Robert Lemeur» и ледокола береговой охраны, которые интенсивно работали в сложных ледовых условиях. Эти суда были также предметом многочисленных натурных испытаний и исследований. «Canmar Kigoriak» работал в течение зимы 1979—1980 гг. исключительно как исследовательское судно и поэтому был первым проработавшим в Арктике круглый год.

При разработке требований для определения расчетных ледовых нагрузок исходили из соответствия класса и ледовых условий, в которых судно должно безопасно работать. Нагрузки определялись на основе детерминистической модели с учетом вероятностных характеристик льда. Уровень расчетных нагрузок согласовывался с критериями прочности элементов конструкций. Учитывались следующие характеристики расчетной нагрузки: суммарная сила, среднее давление в зоне контакта корпуса со льдом, среднее давление для части площади, определяемой расстоянием между балками набора.

Предполагались пиковый характер распределения контактного давления по высоте зоны контакта и эмпирически обоснованная связь между средним давлением P_a и площадью зоны контакта A в виде кривой $P(A)$ (Pressure-Area curve). Высота зоны контакта определялась в зависимости от величины суммарной силы при фиксированном соотношении короткой и длинной сторон зоны контакта, принятым 1:8.

При разработке нормативов для параметров расчетной нагрузки учитывалось влияние скорости и массы судна, мощности силовой установки и формы корпуса. Принималась во внимание возможность различной ориентации зоны контакта относительно балок набора. Расчетные нагрузки на обшивку определялись с использованием несколько иного метода, чем нагрузки на набор.

Таблица 1. Определение коэффициентов класса

Ледовый класс	Коэффициент класса	Опасный тип льда	Средняя толщина льда, м
CAC1	1,0	Без ограничений	5
CAC2	0,8	Тяжелый MY	4
CAC3	0,6	Легкий MY	3
CAC4	0,4	Любой FY	2
TYPE A	0,2	Балтийский FY	1

Примечание. MY — многолетний (Multi-year), FY — однолетний (First-year).

Различие в расчетных нагрузках для судов разных классов и для разных районов по длине судна устанавливалось введением коэффициентов класса CF и коэффициентов района CA в качестве множителей в формулу для определения расчетного давления. Коэффициент класса определяется по табл. 1.

Коэффициент района CA составляет 1,0 для носового района, 0,5 для среднего и кормового районов, 0,3 для днищевого района.

Анализ требований Правил и пояснительной записки к ним [30] показывает, что влияние параметров формы корпуса на величину расчетных нагрузок практически не учитывается. Основанием для этого авторы считают независимость суммарного контактного усилия от формы корпуса. Очевидно, что энергия судна, приведенная к направлению удара, существенно изменяется по длине носового заострения, а коэффициенты приведения массы и скорости являются функциями координат точки ударного взаимодействия и параметров формы корпуса. Некорректность принятого подхода в части учета влияния формы корпуса, видимо, скрывается в упрощенном представлении параметров эпюры распределения суммарного усилия в зоне контакта.

Предлагаемые Правила регламентируют уменьшенную толщину обшивки и более высокую прочность набора в связи с тем, что в настоящее время закладывается большой запас прочности листовых элементов обшивки в упругопластической стадии пластичной стали. Для балок учитываются прочность на сдвиг, на изгиб, а также боковая и сдвиговая устойчивость.

Анализ повреждений, измерение нагрузки в реальных условиях, анализ риска и модели предельного состояния судовых конструкций использовались при разработке этих предложений. Правила 1989 г. построены на критерии предельной прочности. Требования к боковой и местной устойчивости включены в требования.

Для судов класса CAC1 устанавливается требование к общей прочности в режиме форсирования ледовой преграды. Для других классов регламентируется наличие системы мониторинга общей прочности.

Модифицированная гидродинамическая модель. Принципы нормирования ледовой прочности. Правила Российского регистра 1999 г.

Как отмечалось выше, в отечественном ледовом судостроении с конца 1970-х годов при определении ледовых нагрузок используется ГДМ, на основании которой были построены и требования Правил Регистра СССР. Однако проведенные в 1980—1990-х годах в Канаде эксперименты по сбрасыванию полусферических грузов на лед, получившие название Drop Ball Tests [31; 32], позволили поставить под сомнение достоверность ГДМ. В рамках этих экспериментов проводились замеры давлений в нескольких точках полусферы, показавшие, что эпюра давлений имеет не пологую, а ярко выраженную пиковую форму. Впоследствии аналогичные результаты были получены в серии экспериментов по внедрению в лед среднemasштабных инденторов [33], а также при натурных испытаниях судов во льдах со специальной системой для построения эпюры давлений в зоне контакта корпуса со льдом [34].

Анализ результатов этих экспериментов позволил установить следующую качественную картину разрушения льда при местном смятии применительно к представляющему основной практический интерес случаю удара корпуса судна о лед с формой эпюры зоны контакта, вытянутой в продольном (вдоль длины судна) направлении (рис. 5):

- в центре зоны контакта располагается относительно небольшая по отношению к общей высоте распределения эпюры ледовой нагрузки область прямого контакта внедряемого корпуса со льдом;
- по обе стороны от области прямого контакта (в вертикальном направлении) располагаются области разрушенного (мелкодисперсного) льда, вытеснявшегося в процессе внедрения корпуса в лед;
- форма распределения давлений в зоне контакта в вертикальном направлении имеет четко выраженный пик в области прямого контакта, а за пределами зоны прямого контакта в областях вытеснения разрушенного льда давления быстро убывают.

Таким образом, согласно изложенной физической картине максимальные давления реализуются в области, где промежуточный слой отсутствует,



Рис. 5. Физическая картина разрушения льда при местном смятии: а – эксперимент, б – гидродинамическая модель
 Fig. 5. The physical picture of ice destruction while local crushing: а – experiment, б – hydrodynamic model

а с увеличением толщины промежуточного слоя давления уменьшаются. В рамках ГДМ имеет место обратная ситуация:

- максимальные давления возникают в области максимальной толщины промежуточного слоя в центре зоны контакта, где в действительности размещается зона прямого контакта;
- распределение давлений по высоте зоны контакта имеет пологий характер, игнорирующий наблюдаемый в экспериментах пиковый характер эпюры.

Изучение изложенных экспериментальных данных и существующих нормативных требований позволило сформулировать вывод о необходимости разработки усовершенствованной модели разрушения льда, в полной мере учитывающей пиковый характер эпюры ледовых давлений и описывающей оба наблюдаемых в экспериментах параллельных процесса.

Первым шагом в этом направлении стала разработка модифицированной ГДМ (МГДМ) [35], частично использованной при разработке требований действующих Правил Регистра 1999 г. В МГДМ пиковый характер ледовых давлений учитывался с помощью параметра пиковости и эффективной высоты распределения ледовой нагрузки. В МГДМ наличие действительного пикового характера эпюры давлений достигался введением эффективной площади контакта, в пределах которой давления считаются постоянными, а вне ее — равными нулю. Переход к эффективной площади контакта осуществляется с помощью параметра пиковости, равного отношению эффективного и фактического размеров зоны контакта. Параметр пиковости, а также параметр динамической прочности льда рассматриваются как физические константы, для определения которых в ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова был проведен комплекс экспериментальных исследований. Учет введенного изложенным образом эффекта пиковости приводит к увеличению максимального давления

и продолжительности удара, снижению суммарной силы и погонной нагрузки.

Принципы нормирования ледовой прочности.

Анализ данных о ледовых повреждениях, выполненный в работах [36; 37], показал, что запасы прочности конструкций ледовых усилений (КЛУ) должны обеспечивать исключение больших повреждений и повреждений массового характера. Появление отдельных локальных деформированных зон длиной от одной до трех-четырех шпаций основного набора с вероятностью реализации порядка 7% рассматривается как нормальная эксплуатационная практика. Другими словами, полностью исключить повреждение КЛУ невозможно, это потребует очень большого увеличения массы корпуса. Поэтому появление отдельных повреждений в виде визуально различных деформаций следует воспринимать как нормальную практику. Поскольку эти повреждения, распространяясь на значительных площадях, характеризуются в среднем относительно небольшими стрелками прогибов, то связанному с ними отказу соответствует опасное состояние конструкции, непосредственно предшествующее началу интенсивного нарастания пластических составляющих прогибов. Для относительно жестких КЛУ этому опасному состоянию вполне обоснованно отвечает описываемый в рамках теории предельного равновесия (ТПР) переход конструкции в предельное состояние. Предельная нагрузка, вызывающая в конструкции предельное состояние, является интегральной характеристикой ее прочности.

Изложенные соображения позволили установить в качестве опасного состояния возникновение в КЛУ предельного состояния в результате одноразового нагружения, для которого расчетная ледовая нагрузка не должна превышать предельной нагрузки конструкции.

Расчетная ледовая нагрузка в Правилах Регистра традиционно характеризуется двумя параметрами:

давлением p и высотой распределения b . При таком способе описания расчетной нагрузки математическая форма критерия предельной прочности имеет вид

$$p < p_0(p; \tilde{E}), \quad (3)$$

где \tilde{E} — вектор размеров конструкций ледовых усилений; p_0 — предельная нагрузка, определяемая методами ТПР.

Практическое использование формулы (3) предполагает наличие методов, обеспечивающих решение обратной задачи, т. е. проектирования КЛУ на заданную расчетную нагрузку по критерию предельной прочности

$$\tilde{E} = \tilde{E}(p_0; b). \quad (4)$$

В ТПР постулируется неизменность формы конструкции вплоть до ее превращения в пластический механизм. Выполнение данного постулата связано с необходимостью обеспечения определенного запаса устойчивости сжатых элементов конструкций. В связи с этим выражение (4), регламентирующее требования к предельной прочности, дополняется требованиями к устойчивости конструкций:

$$\tilde{E} > \tilde{E}^*(p_0; b), \quad (5)$$

где \tilde{E}^* — вектор размеров КЛУ, регламентируемых требованиями к устойчивости.

Способы построения решений (3)—(5), подробно описанные в [37; 38], учитывают следующие особенности работы конструкций ледовых усилений. Повышенная жесткость балочных элементов конструкций и локальность нагрузки требуют при описании предельного состояния учитывать влияние перерезывающих сил, что приводит к нелинейности условий пластичности в пластических шарнирах. Изгибно-сдвиговой характер предельного состояния балочных конструкций заставляет выделить в качестве самостоятельной задачи описание предельного равновесия поперечного сечения балок с учетом конечной жесткости мощного присоединенного пояска. При оценке предельной прочности наружной обшивки учет локализации нагрузки по полю пластины приводит к необходимости отказа от модели балки-полоски в пользу пластины с конечным соотношением сторон. В расчетных моделях, описывающих предельное состояние листовых конструкций, нельзя игнорировать фактор поддерживающего влияния, создаваемого для листовой конструкции достаточно жесткой пластиной наружной обшивки или пересекающими ее балками основного набора.

Расчетные зависимости для определения размеров связей, учитывающие все указанные выше

особенности конструкций, представлены в действующей редакции требований Правил РМРС к ледовой прочности.

Правила Российского регистра 1999 г. Соотношения для определения ледовых нагрузок на основании ГДМ (МГДМ) включают два параметра прочности льда — предел прочности льда на изгиб σ_f и параметр прочности льда на динамическое раздробление. При этом учитывается, что с ростом толщины льда увеличивается его прочность. В результате принятия нормативных решений были установлены регламентационные зависимости для определения величин σ_f и a_p при известном ледовом классе судна [39]. Подобный подход, впервые введенный в Правила РМРС в 1999 г., дал возможность перейти к регламентации ледовых нагрузок на основе базовых опасных режимов движения (БОРД) для ледовых категорий (рис. 6а).

Построение ледовой классификации на основе БОРД обеспечивает регламентацию в рамках каждой ледовой категории одинаковых для всех судов допустимых условий плавания во льдах независимо от размерений и формы обводов конкретного судна и установление стабильного гарантированного запаса допустимых условий плавания судов по отношению к опасным, приводящим к ледовым повреждениям корпусов.

На основании аналогичного подхода построена система базовых допустимых режимов движения для регламентации в рамках ледовой классификации Правил РМРС 1999 г. допустимых условий ледового плавания (рис. 6б и 6в).

Унифицированные требования Международной ассоциации классификационных обществ для полярных судов 2006 г.

Унифицированные требования Международной ассоциации классификационных обществ (УТ МАКО) для полярных судов [40] разработаны на основе гармонизации наиболее апробированных требований к ледовой прочности: Требования Канады, Правил РМРС и Финско-шведских правил (для категорий IA и IASuper). В настоящее время все члены МАКО включили эти правила в свои нормативные документы. В УТ МАКО выделяется семь полярных классов в зависимости от тяжести ледовых условий, описание которых соответствует практике Всемирной метеорологической организации. Построение зависимостей для параметров расчетных ледовых нагрузок в УТ МАКО основано на принципе равенства кинетической энергии движения судна и энергии разрушения льда [41]. Для определения локальных ледовых нагрузок в зоне контакта корпуса со льдом используется широко применяемая в мировой практике эмпирическая модель «pressure-agea» (кривая давление-площадь).

В основу требований к размерам конструкций ледовых усилений в УТ МАКО положены критерий

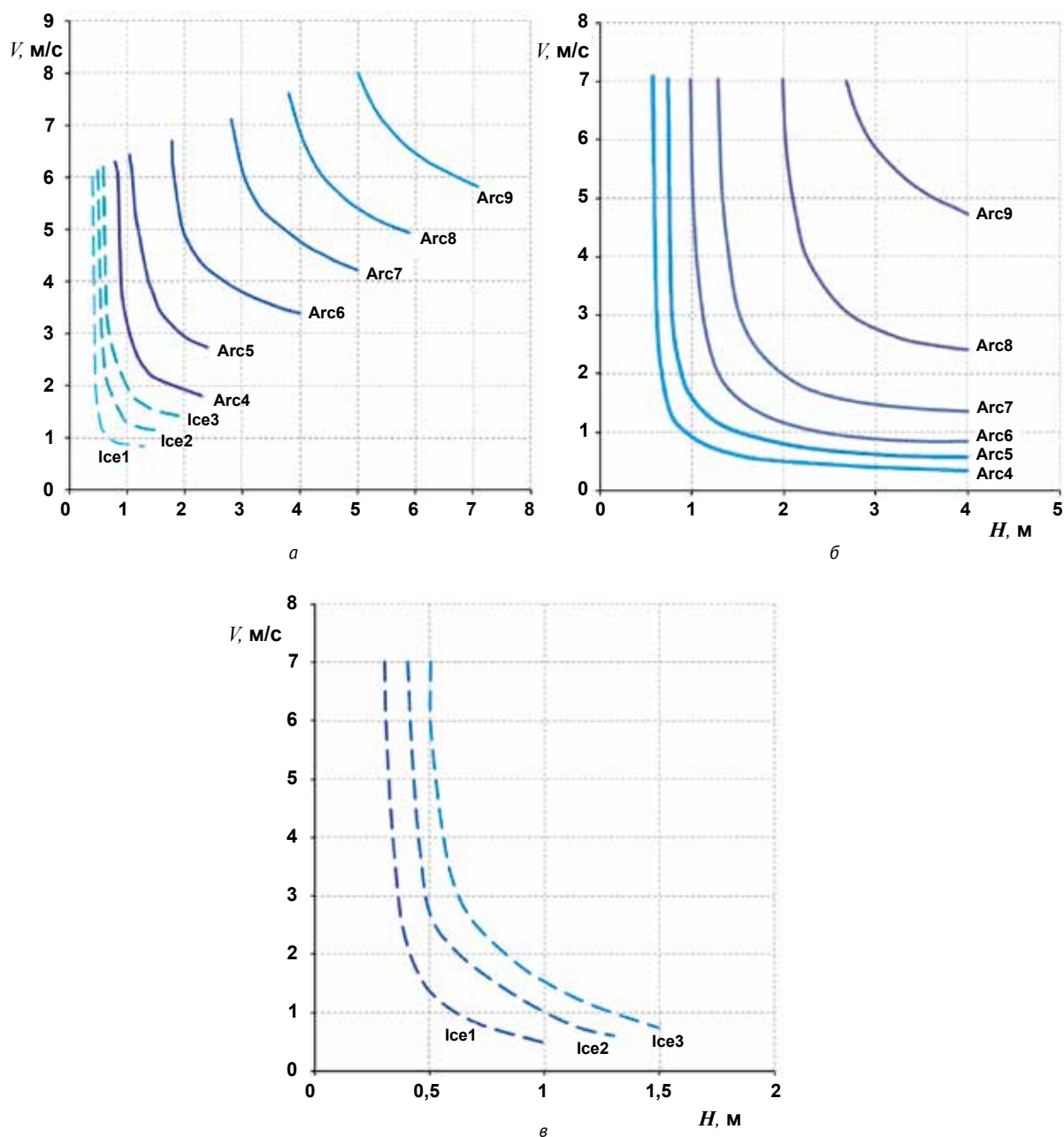


Рис. 6. Базовые опасные (а) и допустимые (б, в) режимы движения для ледовых категорий РМРС: V – скорость судна, H – толщина условно ровного льда

Fig. 6. Basic dangerous (a) and allowable (б, в) navigation modes for ice categories of RMRS: V – vessel speed, H – conditionally level ice thickness

предельной прочности и методы оценки предельной прочности, заимствованные из методологии Правил РМРС. Так, для регламентации толщины наружной обшивки используется расчетная формула Правил РМРС, корректно учитывающая резервы пластического деформирования и локальность ледовой нагрузки. При регламентации площади стенки и пластического момента сопротивления обыкновенного шпангоута в УТ МАКО значительное внимание уделено случаю приложения локальной ледовой нагрузки вблизи опоры, при этом в качестве опасной

рассматривается не предельная нагрузка, а нагрузка, соответствующая ограниченным упруго-пластическим деформациям. В связи с этим требования к шпангоутам УТ МАКО в ряде случаев могут быть заметно выше требований Правил РМРС. В действующих Правилах содержатся зависимости для определения толщины наружной обшивки, момента сопротивления и площади поперечного сечения стенки для обыкновенных шпангоутов, продольных днищевых и бортовых балок. Для определения размеров рамных шпангоутов и несущих стрингеров

предлагается выполнять прямые расчеты предельного состояния на основании метода конечных элементов в соответствии с приведенными требованиями к такому расчету.

Недостатком УТ МАКО является отсутствие четкой регламентации величины пролета шпангоута — его предлагается вычислять в соответствии с подходами классификационного общества, которому поднадзорно судно. Учитывая, что для современных танкеров характерна конструкция двойного борта с часто расставленными горизонтальными диафрагмами в районе ледового пояса, необходимо отметить, что в этом случае различие между пролетом, измеренным по концам книц, и пролетом между диафрагмами может быть очень значительным.

Модель динамического разрушения льда. Проект требований Правил Российского регистра к ледовым усилениям транспортных судов и ледоколов 2019 г.

Первым шагом к учету фактической картины разрушения льда при местном смятии была разработка МГДМ, использовавшейся при разработке действующих Правил Регистра. Затем была сформулирована модель динамического разрушения льда при местном смятии (МДРЛ) [35; 42]. Она описывает два параллельных процесса: смятие льда как твердого тела в области прямого контакта и вытеснение разрушенного мелкодисперсного льда.

Для описания процесса вытеснения используются уравнения ГДМ и вводится система дополнительных условий, отвечающих наблюдаемой в экспериментах физической картине разрушения льда (рис. 7):

- область прямого контакта тела со льдом, расположенная в центре зоны контакта, мала по сравнению с полной шириной зоны контакта, ледовое давление в ее пределах можно считать постоянным;
- раздробленный лед образует тонкий промежуточный мелкодисперсный слой между бортом судна и массой неразрушенного льда;
- в области разрушенного льда толщина промежуточного слоя монотонно возрастает при удалении от области прямого контакта, ледовое давление при этом монотонно убывает.

Математическая запись дополнительных условий имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 h &= kx, \\
 p(x) &= p_m \text{ при } x \leq 0,5b_0, \\
 p(0,5b) &= 0, \\
 p(x) &\leq p_m \text{ при } 0,5b_0 < x \leq 0,5b, \\
 b_0 &\ll b,
 \end{aligned}$$

где k — постоянный коэффициент, определяемый по экспериментальным данным; h — толщина промежуточного слоя; b — размер высоты зоны контакта судна со льдом; b_0 — размер области прямого кон-

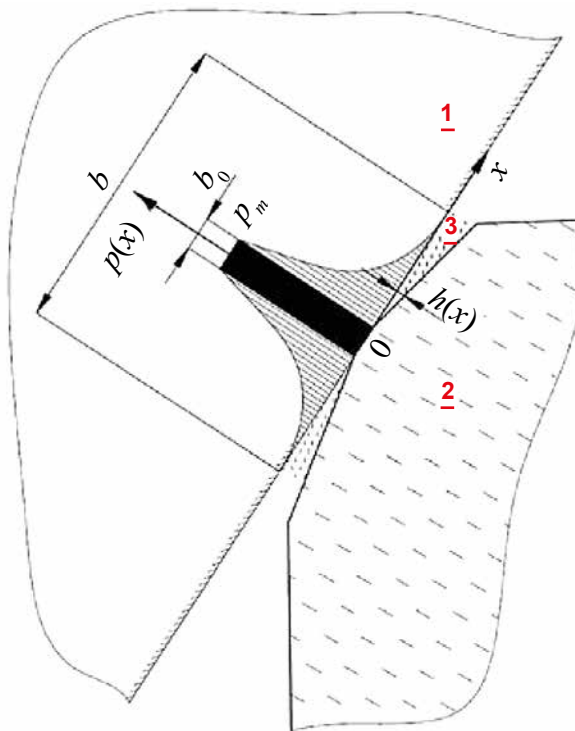


Рис. 7. Модель динамического разрушения льда (зона контакта вытянута вдоль борта судна): 1 — твердое тело (борт судна), 2 — ледовое поле, 3 — промежуточный слой разрушенного мелкодисперсного льда

Fig. 7. Dynamic ice failure model (contact zone extended along the vessel side): 1 — solid body (the vessel side), 2 — ice field, 3 — intermediate layer of crushed ice (small pieces)

такта тела со льдом; p_m — давление в области прямого контакта тела со льдом, которое можно принять постоянным и равным пределу прочности льда на местное смятие; x — координата, отсчитываемая (с учетом симметрии) от центра зоны контакта в положительном направлении.

Для внедрения МДРЛ в практику проектирования судов ледового плавания и ледоколов было выполнено совершенствование модели в части обоснования подходов к заданию и нормированию параметров [43]:

- выполнено уточнение относительного размера зоны прямого контакта как переменной, изменяющейся в процессе внедрения борта судна в лед;
- введена связь максимального давления в зоне прямого контакта p_m с пределом прочности льда на сжатие σ_c ;
- введен учет влияния масштабного эффекта на относительный размер зоны прямого контакта и величину среднего давления по площади зоны контакта, базирующегося на эмпирической модели «pressure-area»;
- выполнено уточнение зависимостей МДРЛ при малых углах наклона борта;
- выполнена регламентация параметра вытеснения раздробленного льда за пределы зоны контакта.

Результаты соответствующих теоретических исследований и расчетного анализа приведены в [44]:

- при расчетном определении ледовых нагрузок осуществлен переход от ГДМ к прогрессивной МДРЛ, описывающей сложный процесс одновременного силового раздробления и динамического вытеснения льда и согласующейся с современными экспериментальными данными по разрушению льда при местном смятии;
- построена новая система регламентационных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок, ориентированная на систему ледовой классификации Правил РМРС;
- разработаны предложения по совершенствованию требований Правил РМРС в части:
 - расчетного определения ледовых нагрузок;
 - требований к форме корпуса и районированию ледовых усилений;
- при переходе к разработанным предложениям при сохранении неизменным общего уровня требований к ледовой прочности судов ледового плавания и ледоколов ледовых классов Правил РМРС достигается снижение ледовых нагрузок для:
 - перспективных крупнотоннажных судов ледового плавания;
 - судов высших ледовых категорий Arc8 и Arc9;
 - мощных ледоколов нового типа, включая ледокол-лидер с мощностью 120 МВт;
- выполненный расчет фактического экономического эффекта показал, что при переходе к разработанным предложениям для перспективных крупнотоннажных судов и ледоколов нового типа снижение металлоемкости конструкций ледовых усилений составит около 20%.

Новая МДРЛ и разработанные на ее основе предложения обеспечивают обоснованную экстраполяцию накопленного опыта нормирования ледовой прочности на перспективные крупнотоннажные суда ледового плавания и мощные ледоколы [44].

Заключение

В статье рассмотрены наиболее существенные этапы развития требований к усилению судов для плавания во льдах. В 2018—2019 гг. существенно дополнены требования к усилению судов для плавания во льдах в Правилах Российского морского регистра судоходства. Уточнены зависимости для определения расчетных ледовых нагрузок, позволяющие учесть архитектурно-конструктивные особенности новых судов. Появились требования к конструкциям судов, эксплуатирующихся во льдах кормой вперед. На стадии внедрения находятся предложения для определения расчетных ледовых нагрузок на корпуса судов ледового плавания и ледоколов, основанные на новой физической модели взаимодействия корпуса судна со льдом.

Ограничения на размеры публикации не позволили включить в обзор методы определения ледовых нагрузок на конструкции при ледовых сжатиях,

а также при использовании методов имитационного моделирования. Не представлены полученные авторами в 2017—2019 гг. значимые результаты, касающиеся определения ледовых нагрузок на конструкции судов с бульбовыми обводами и вертикальными бортами в районах носового и кормового заострений корпуса судна, а также требований к конструкциям судов, эксплуатирующихся во льдах кормой вперед.

Соответствующая информация может быть найдена в последних публикациях авторов в научных изданиях «Труды Крыловского государственного научного центра», «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», «Арктика: экология и экономика», «Морские интеллектуальные технологии» за 2018—2019 гг.

Литература/ References

1. *Рунеберг Р. И.* О пароходах для зимнего плавания и ледоколах // Сб. Ин-та путей сообщения [СПб.]. — 1890. — Вып. 17.
Runeberg R. I. O parokhodakh dlya zimnego plavaniya i ledokolakh. [About steamers for winter navigation and icebreakers]. Sb. In-tf putey soobshcheniya [St. Petersburg], 1890, iss. 17. (In Russian).
2. *Афонасьев В. И.* Материалы по изучению движения судна. — Ч. 3: Ледоколы. — СПб., 1899. — С. 50.
Afonas'ev V. I. Materialy po izucheniyu dvizheniya sudna. Ch. 3. Ledokoly. [Materials for studying the movement of the ship. Pt. 3. Icebreakers]. St. Petersburg, 1899, p. 50. (In Russian).
3. *Макаров С.* «Ермак» во льдах. — СПб., 1901.
Makarov S. "Yermak" vo l'dakh. ["Yermak" in the ice]. St. Petersburg, 1901. (In Russian).
4. *Андриенко В. Г.* Ледокольный флот России 1860-е — 1918 гг. — М.: Paulsen, 2009 г. — 536 с.
Andrienko V. G. Ledokol'nyy flot Rossii 1860-e — 1918 gg. [Russian icebreaking fleet 1860—1918]. Moscow, Paulsen, 2009, 536 p. (In Russian).
5. *Папкович П. Ф.* Экспериментальные исследования судов арктического плавания // Папкович П. Ф. Труды по прочности корабля. — Л.: Судпромгиз, 1956. — С. 300—305.
Papkovich P. F. Eksperimental'nye issledovaniya sudov arkticheskogo plavaniya. Trudy po prochnosti korablya. [Experimental studies of Arctic navigation vessels. Transactions on the strength of the ship]. Leningrad, Sudpromgiz, 1956, pp. 300—305. (In Russian).
6. *Маслов А. И.* Опыт расчета внешних усилий, действующих на корпус судна в ледовых условиях // Труды ВНИИ ТОСС. — 1937. — Т. 2, вып. 3. — С. 129—132.
Maslov A. I. Opyt rascheta vneshnikh usilий, deystvuyushchikh na korpus sudna v ledovykh usloviyakh. [Experience in calculating external forces acting on the ship's hull in ice conditions]. Trudy VNII TOSS, 1937, vol. 2, iss. 3, pp. 129—132. (In Russian).
7. *Виноградов И. В.* Суда ледового плавания. — М.: Оборонгиз, 1946. — 240 с.

- Vinogradov I. V. Suda ledovogo plavaniya. [Ice going vessels]. Moscow, Oborongiz, 1946, 240 p. (In Russian).
8. Шиманский Ю. А. Условные измерители ледовых качеств судов // Труды ААНИИ. — 1938. — Т. 130. Shimanskiy Yu. A. Uslovnye izmeriteli ledovykh kachestv sudov. [Conditional measures of ice qualities of vessels]. Trudy AANII, 1938, vol. 130. (In Russian).
9. Давыдов В. В. Крепость ледокольных судов. — М.: Судостроение, 1937. — (№ 2, ОНТИ). Davydov V. V. Krepost' ledokol'nykh sudov. [Fortress of icebreaking vessels]. Moscow, Sudostroenie, 1937. (No. 2, ONTI). (In Russian).
10. Давыдов В. В. Теоретические исследования удара корабля о льдину // Проблемы Арктики. — 1938. — № 5-6. Davydov V. V. Teoreticheskie issledovaniya udara korablya o l'dinu. [Theoretical studies of the impact of a ship on an ice floe]. Problemy Arktiki, 1938, no. 5-6. (In Russian).
11. Шапиро Г. С. Полубесконечная пластина на упругом основании // Прикладная математика и механика. — 1943. — Т. 7, № 4. Shapiro G. S. Polubeskonechnaya plastina na uprugom osnovanii. [Semi-infinite plate on an elastic base]. Prikladnaya matematika i mekhanika, 1943, vol. 7, no. 4. (In Russian).
12. Голушкевич С. С. О некоторых задачах изгиба ледяного покрова. — Л.: Оборонгиз, 1947. — 231 с. Golushkevich S. S. O nekotorykh zadachakh izgiba ledyanogo pokrova. [On some problems of bending of the ice cover]. Leningrad, Oborongiz, 1947, 231 p. (In Russian).
13. Гильман Л. С. Определение напряжений в плавающей ледяной плите, ограниченной прямолинейной кромкой от действия нагрузки, приложенной к кромке // Труды ВИТУ ВМФ. — 1943. — Вып. 4. Gil'man L. S. Opredelenie napryazheniy v plavayushchey ledyanoy plite, ograni-chennoy pryamolineynoy kromkoy ot deystviya nagruzki, prilozhennoy k kromke. [Determination of stresses in a floating ice plate bounded by a straight edge from the action of a load applied to the edge]. Trudy VITU VMF, 1943, iss. 4. (In Russian).
14. Регистр СССР. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 1. — Л.: Транспорт, 1970. Registr SSSR. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Leningrad, Transport, 1970, vol. 1. (In Russian).
15. Finnish-Swedish Ice Class Rules, Finnish Board of Navigation. Helsinki, 1971.
16. Johansson B. M. On the Ice Strengthening of Ship Hulls. International Shipbuilding Progress, 1967, vol. 14, June, no. 154.
17. Тряскин В. Н. Вопросы проектирования конструкций судов ледового плавания // Судостроение за рубежом. Суда ледового плавания. — 1981. — № 3 (171). — С. 84—106. Tryaskin V. N. Voprosy proektirovaniya konstruksiy sudov ledovogo plavaniya. [Design issues of hull side structures of vessels for ice navigation]. Sudostroenie za rubezhom. Suda ledovogo plavaniya, 1981, no. 3 (171), pp. 84—106. (In Russian).
18. Board of Navigation Ice Class Rules. Finnish Maritime Administration, No. 2575/85/37, 02.09.1985.
19. DnV-GL Rules for Classification. Ships. Edition July 2018. Part 6 Additional class notation. Chap. 6. Cold climate. Sect. 2. Ice strengthening for the Northern Baltic — Ice.
20. Arctic shipping Pollution Prevention Regulations. Canadian Gazette, 1972, Pt. II, 106, no. 16.
21. Хейсин Д. Е. Определение ледовых нагрузок, действующих на корпус судна, плавающего во льдах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / ААНИИ. — Л., 1962. — 17 с. Kheysin D. E. Opredelenie ledovykh nagruzok, deystvuyushchikh na korpus sudna, plavayushchego vo l'dakh. [Determination of ice loads acting on the hull of a ship floating in ice]. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. AANII. Leningrad, 1962, 17 p. (In Russian).
22. Попов Ю. Н. К вопросу об ударе судна о льдину // Труды ЛКИ. — 1955, вып. 15. Popov Yu. N. K voprosu ob udare sudna o l'dinu. [To the question on the impact of the vessel with ice floe]. Trudy LKI, 1955, iss. 15. (In Russian).
23. Требования к постройке судов ледового плавания и их классификация. — Л.: Изд. ААНИИ, 1964. Trebovaniya k postroyke sudov ledovogo plavaniya i ikh klassifikatsiya. [Requirements for the construction of ice going vessels and their classification]. Leningrad, Izd. AANII, 1964. (In Russian).
24. Правила классификации и постройки морских судов. — Т. 1. — Л.: Транспорт, 1974. (Регистр СССР). Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships]. Vol. 1. Leningrad, Transport, 1974. (Registr SSSR). (In Russian).
25. Хейсин Д. Е. К определению контактных давлений, действующих в зоне удара судна о лед // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1966. — Вып. 22. — С. 43—51. Kheysin D. E. K opredeleniyu kontaktnykh davleniy, deystvuyushchikh v zone udara sudna o led. [To the determination of contact pressures acting in the zone of impact of a vessel on ice]. Problemy Arktiki i Antarktiki, 1966, iss. 22, pp. 43—51. (In Russian).
26. Кудюмов В. А., Хейсин Д. Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. — 1976. — Т. 12, № 10. — С. 104—109. Kudymov V. A., Kheysin D. E. Gidrodinamicheskaya model' udara tverdogo tela o led. [Hydrodynamic model of a solid body impact on the ice]. Prikladnaya mekhanika, 1976, vol. 12, no. 10, pp. 104—109. (In Russian).
27. Кудюмов В. А., Хейсин Д. Е. К определению ледовых нагрузок, действующих на корпус ледокола при ударе // Труды ЛКИ. — 1975. — Вып. 90.

Kudyumov V. A., Kheysin D. E. K opredeleniyu ledovykh nagruzok, deystvuyushchikh na korpus ledokola pri udare. [To determination of the ice loads acting on the icebreaker's hull at impact]. Trudy LKI, 1975, iss. 90. (In Russian).

28. Курдюмов В. А., Тряскин В. Н., Хейсин Д. Е. Определение ледовой нагрузки и оценка ледовой прочности корпусов транспортных судов // Труды ЛКИ: Ледопробитость и ледовая прочность морских судов. — Л., 1979. — С. 3—12.

Kurdyumov V. A., Tryaskin V. N., Kheysin D. E. Opredelenie ledovoy nagruzki i otsenka ledovoy prochnosti korpusov transportnykh sudov. [Determination of ice load and assessment of ice strength of hulls of transport vessels]. Trudy LKI: Ledoprokhodimost' i ledovaya prochnost' morskikh sudov. Leningrad, 1979, pp. 3—12. (In Russian).

29. Хейсин Д. Е. Прочность ледяного поля под действием нагрузки, приложенной к кромке // Труды ААНИИ. — 1960. — Вып. 237. — С. 133—152.

Kheysin D. E. Prochnost' ledyanogo polya pod deystviem nagruzki, prilozhennoy k kromke. [The strength of the ice field under the load applied to the edge]. Trudy AANII, 1960, iss. 237, pp. 133—152. (In Russian).

30. Proposals for the Revision of the Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations. Vol. 1: Background; Vol. 2: Regulations. TP#9981. Report of Sub-Committee for Canadian Coast Guard Arctic Ship Safety.

31. Timco G. W., Frederking R. M. W. Drop impact tests on freshwater ice: spherical head. Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium, vol. 11, Espoo, Finland, Aug. 20—23, 1990, pp. 776—787.

32. Timco G. W., Frederking R. M. W. Laboratory impact tests on freshwater ice. Cold Region Science and Technology, 1993, vol. 22, pp. 77—97.

33. Frederking R. M. W., Jordaan I. J., McCallum J. S. Field tests of ice indentation of medium scale Hobson's choice ice island. Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium, vol. 11, Espoo, Finland, Aug. 20—23, 1990, pp. 931—944.

34. Ritch R., John J. St., Browne R., Sheinberg R. Ice load impact measurements on the CCGS Louis S. St. Laurent during the 1994 Arctic Ocean Crossing. Proceeding of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. July 11—16, 1999, St. John's Newfoundland, paper OMAE99/P&A-1141.

35. Апполонов Е. М., Дидковский А. В., Кутейников М. А., Нестеров А. Б. Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Науч.-техн. сб. РМРС. — 2002. — Вып. 25. — С. 83—100.

Appolonov E. M., Didkovskiy A. V., Kuteynikov M. A., Nesterov A. B. Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya ledovykh nagruzok. [Improvement of the methodology for determining ice loads]. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik RMRS, 2002, iss. 25, pp. 83—100. (In Russian).

36. Апполонов Е. М. Проектирование конструкций ледовых усилений по критерию предельной прочности // Судостроение. — 1992. — № 2. — С. 9—12.

Appolonov E. M. Proektirovanie konstruktsiy ledovykh usileniy po kriteriyu predel'noy prochnosti. [Design of ice strengthening structures based on the ultimate strength criterion]. Sudostroenie, 1992, no. 2, pp. 9—12. (In Russian).

37. Appolonov E. M., Nesterov A. S. The investigation of ice damage and increase of the requirements to ice strength of Arctic ships. Proceeding of the 13th International Conference "POAC'95". Vol. 1. Murmansk, Russia, 1995.

38. Appolonov E. M., Nesterov A. B. Criteria and methods for assessment of strength of Arctic ships and icebreakers ice strengthenings. Proceeding of the 6th International Conference POLARTECH'96. Workshop B. St. Petersburg, Russia, 1996.

39. Апполонов Е. М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации. — Спб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — 288 с.

Appolonov E. M. Ledovaya prochnost' sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodich-noy arkticheskoy navigatsii. [Ice strength of ships for all-year-round Arctic navigation.]. St. Petersburg, Izd-vo SPbGMTU, 2016, 288 p. (In Russian).

40. Requirements Concerning Polar Class, International Association of Classification societies UR 11 & 12, 2016.

41. Daley C. G. Background Notes to Design Ice Loads — IACS Unified Requirements for Polar Ships. Prepared for IACS Ad-Hoc Group on Polar Class Ships and Transport, Canada, January 2000.

42. Appolonov E. M., Nesterov A. B. A model of ice dynamic failure under local crushing. Proceedings of Third International Shipbuilding Conference ISC'2002, section C. St.-Petersburg, 2002, pp. 77—84.

43. Апполонов Е. М., Платонов В. В. Новая модель динамического разрушения льда как основа для совершенствования требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов // Труды Крылов. гос. науч. центра. — 2019. — 4 (390). — С. 99—116.

Appolonov E. M., Platonov V. V. Novaya model' dinamicheskogo razrusheniya l'da, kak osnova dlya sovershenstvovaniya trebovaniy Pravil Registra k ledovym usileniyam sudov i ledokolov. [New model of dynamic ice failure as basis for improvement of RS requirements to ice belts of ice-going ships and icebreakers]. Trudy Krylov. gos. nauch. tsentra, 2019, no. 4 (390), pp. 99—116. (In Russian).

44. Апполонов Е. М., Платонов В. В., Тряскин В. Н. Совершенствование требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов // Труды Крылов. гос. науч. центра. — 2018. — 3 (385). — С. 18—28.

Appolonov E. M., Platonov V. V., Tryaskin V. N. Sovershenstvovanie trebovaniy Pravil Registra k ledovym usileniyam sudov i ledokolov. [Improvement of RS ice strengthening requirements for ice-class vessels and icebreakers]. Trudy Krylov. gos. nauch. tsentra, 2018, no. 3 (385), pp. 18—28. (In Russian).

Информация об авторах

Апполонов Евгений Михайлович, доктор технических наук, генеральный директор, ЦКБ «Лазурит» (603951, Россия, Нижний Новгород, ул. Свободы, д. 57), e-mail: em_appolonov@cdb-lazurit.ru.

Платонов Виктор Викторович, кандидат физико-математических наук, начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), e-mail: viktorplatonov@yandex.ru.

Тряскин Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3), e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Апполонов Е. М., Платонов В. В., Тряскин В. Н. Развитие методов определения ледовых нагрузок и требований к конструкциям ледовых усилений // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 65—81. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-65-81.

DEVELOPMENT OF METHODS FOR DETERMINING ICE LOADS AND REQUIREMENTS FOR ICE REINFORCEMENT STRUCTURES

Appolonov E. M.

Central Design Bureau “Lazurit” (Nizniy Novgorod, Russian Federation)

Platonov V. V.

Krylov State Research Centre (St. Petersburg, Russian Federation)

Tryaskin V. N.

St. Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on January 16, 2020

Abstract

Authors present an analysis of the development of methods for determining ice loads and the requirements for ice reinforcement designs. It covers from those ones based on purely empirical approaches to those arising from modern physical ideas about the interaction of the vessel hull with ice. The requirements for ice reinforcements that are most widely used in practical design are more detailed: Finnish-Swedish requirements, which were developed in the early 70s of the last century and are still the basis in foreign practice for designing ice reinforcement structures of ships to be operated in relatively light ice conditions; Canadian vessel hull requirements to prevent pollution of the Canadian Arctic; requirements developed by Russian experts, included in the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping, which are basic for ships operating in the Russian Arctic; unified requirements of the International Association of Classification Societies (IACS) for polar vessels, based on the Canadian and Russian approaches, included in the Rules of Classification Societies — the IACS Members.

Key words: *Methods for determining ice loads, ice reinforcement requirements, Rules of classification societies.*

Information about the authors

Appolonov Evgeny Michailovich, Doctor of Engineering Science, General Director, Central Design Bureau “Lazurit” (57, Svobody Str., Nizhny Novgorod, Russia, 603951), e-mail: em_appolonov@cdb-lazurit.ru.

Platonov Viktor Viktorovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Head of Section, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), e-mail: viktorplatonov@yandex.ru.

Tryaskin Vladimir Nikolaevich, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Department, Ship Structure and Operation Department, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru.

Bibliographic description

Appolonov E. M., Platonov V. V., Tryaskin V. N. Development of methods for determining ice loads and requirements for ice reinforcement structures. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 1 (37), pp. 65—81. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-65-81. (In Russian).