

К ВОПРОСУ О КРИТЕРИИ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ

&

Деление судов на классы позволяет судить лишь о безопасных с точки зрения ледовой прочности условиях плавания. В то же время, как показывает опыт проектирования и эксплуатации ледокольно-транспортных судов, помимо определения требований к ледовой прочности ледовый класс должен характеризовать также эксплуатационные (функциональные) возможности судна, которые определяются для судов ледового плавания его ледовой ходкостью.

ЛОЛИЙ ЦОЙ, главный научный сотрудник, д.т.н., профессор АО «ЦНИИМФ»

Основные исходные предпосылки по оценке допустимого уровня ледопроеходимости транспортных судов в зависимости от ледового класса

О том, что безопасность плавания во льдах зависит не только от ледовой прочности, но и от ледовой ходкости, свидетельствует накопленный опыт освоения Арктики и Антарктики. Можно привести следующие примеры, подтверждающие зависимость безопасности плавания судна от ледовой ходкости:

- Судно с недостаточной ледопроеходимостью может быть остановлено льдами и, если это дрейфующие льды, его может вынести на мель и подводные скалы.

- Судно, застрявшее во льду из-за недостаточной мощности, может вмерзнуть в лед и оказаться в ледовом плену на весь зимний период, подвергаясь опасности быть раздавленным вследствие сжатий.

В обоих случаях потребуются спасательные операции по высвобождению судна, снятию людей.

В качестве примеров в таблице 1 приводится описание вынужденных дрейфов судов, совершивших автономное плавание в Антарктику.

Из истории зимнего плавания в Арктике известны случаи вовлечения в дрейф даже мощных ледоколов. Так, атомоход «Ленин» в конце марта — начале апреля 1976 г. после «разведки корпусом» в районе Карских Ворот выходил из пролива в условиях встречного дрейфа льда в течение 40 часов, находясь практически на одном месте между широтами $70^{\circ}12'$ и $70^{\circ}22'$.

В марте следующего, 1977 года ледокол «Мурманск» в том же районе попал в «ледяную реку», которая текла вдоль припая со скоростью 4–5 узлов. На оказание помощи «Мурманску» был вызван а/л «Арктика».

Сжатия в результате дрейфа льда часто являются причиной ледовых повреждений корпуса и винторулевой группы судов. Известны случаи гибели судов в условиях сжатий в Арктике (п/х «Челюскин» в 1934 г., п/х «Казахстан» в 1949 г., т/х «Витимлес» в 1965 г., т/х «Нина Сагайдак» в 1983 г.).

Поэтому наряду с обеспечением ледовой прочности судно должно также обладать необходимой ледопроеходимостью, позволяющей безопасно оперировать в соответствующих его классу ледовых условиях как по району, так и по сезону плавания.

Изучение опыта эксплуатации судов в покрытых льдом водах показало, что минимально необходимую ледопроежимость для судов каждого класса

целесообразно назначать исходя из следующего сценария: «Транспортное судно, оказавшись в необычно тяжелой ледовой обстановке, в частности во льдах, которые по толщине превышают на одну ступень установленные для судна этого класса предельные значения, должно обладать достаточной мощностью (ледопроежимостью), чтобы иметь возможность под проводкой ледокола выйти из района с запределными для его класса льдами».

С учетом изложенного могут быть сформулированы основные исходные предпосылки по оценке допустимого минимального уровня ледопроежимости транспортных судов в зависимости от ледового класса.

1. В сложных ледовых условиях осуществляется проводка транспортных судов ледоколами. Оказавшись в условиях, соответствующих более высокому (на один разряд) классу, судно должно иметь достаточную ледопроежимость, чтобы устойчиво двигаться в канале за ледоколом в этих запределных для судна данного класса льдах.

2. Рассматривается движение судна в заполненном мелкобитым и тертым льдом канале, проложенном ледоколом в сплоченных торосистых и наслоенных дрейфующих льдах.

3. Скорость движения судна в канале за ледоколом должна составлять не менее 4–5 узлов, чтобы при ледовых

ТАБЛИЦА 1. СВЕДЕНИЯ О ВЫНУЖДЕННЫХ ДРЕЙФАХ СУДОВ В АНТАРКТИЧЕСКИХ ЛЬДАХ

Судно	Район	Период	Место начала и окончания дрейфа		Протяженность дрейфа, км		Средняя скорость дрейфа, м/с	
			широта	долгота	общая	по прямой	общая	по прямой
«Бельжика»	Море Беллинсгаузена	02.03.1898-10.03.1899	71° 30' 70° 50'	82° 15'W 102° 15'W	3730	600	0,10	0,02
«Дойчланд»	Море Уэдделла	05.03-26.11.1912	73° 40' 63° 42'	31° 00'W 36° 20'W	2940	1134	0,13	0,05
«Эндыюренс»	Море Уэдделла	10.01.1915-09.04.1916	76° 34' 61° 56'	31° 30'W 54° 05'W	3268	1728	0,09	0,04
«Аврора»	Море Росса и Балленский ледяной массив	05.05.1915-12.02.1916	77° 38' 64° 49'	166° 24'E 152° 40'E	2144	1440	0,09	0,06
«Обь»	Балленский ледяной массив	23.04-22.07.1973	68° 05' 64° 54'	156° 39'E 160° 32'E	1015	673	0,13	0,09
«Михаил Сомов»	Балленский ледяной массив	02.02.-26.03.1977	68° 48' 67° 19'	156° 39'E 152° 19'E	452	380	0,09	0,04
«Михаил Сомов»	Тихоокеанский ледяной массив	15.03-26.07.1985	74° 21' 74° 54'	135° 10'E 153° 03'E	997	517	0,09	0,05

Примечание:

- «Обь»: 1973 г. – получила серьезные повреждения корпуса вследствие ледовых сжатий;
- «Михаил Сомов»: 1985 г. – высвобожден ледоколом «Владивосток»;
- «Михаил Сомов»: 1986 г. – снова прибывал в вынужденном дрейфе;
- «Михаил Сомов»: 1991 г. – попал в ледовый плен на всю зиму с июня по декабрь;
- «Степан Крашенинников» попал в ледовую реку, дрейфовал кормой вперед и повредил кормовую оконечность.

сжатиях силой 1 – 2 балла обеспечивался минимальный устойчивый ход со скоростью около 2 узлов. Подобный запас скорости требуется также для обеспечения управляемости судна.

4. В качестве расчетной толщины исходного ровного льда, в котором прокладывается канал и применительно к которому оценивается потребная ледопроемкость судна рассматриваемого ледового класса, принимается нормативная толщина льда, соответствующая более высокому на один разряд ледовому классу. В расчетах учитывается природная торосистость льда в соответствии с его возрастом, и скорости движения судна в канале определяются применительно к эквивалентной толщине льда с учетом торосистости.

5. Ходкость судна в ледовом канале зависит от относительной ширины канала. Особенно сильное влияние шири-

ны канала сказывается, когда ширина судна значительно превышает ширину ледокола, прокладываемого канал, и движение сопровождается расширением и доламыванием кромок канала корпусом ведомого судна. В этих условиях могут потребоваться чрезмерно большие мощности крупнотоннажных судов. Поэтому применительно к большому (широким) судам предлагается исходить из рассмотрения их проводки двумя ледоколами, прокладываемыми канал соответствующей судну ширины, или одним ледоколом с дополнительным расширением канала.

Результаты выполненных массовых расчетов потребной ледопроемкости судов полярных классов с учетом изложенных предпосылок и основанное на этих расчетах предложение по рекомендуемому минимальному уровню ледопроемкости

представлены в таблице 2.

Таким образом, выполненные исследования позволяют установить минимально допустимые численные значения ледопроемкости для судов каждого класса, которые предлагается назначать из условия возможности вывода (высвобождения) судна ледоколом, если первое окажется в не соответствующей его классу более тяжелой на один разряд ледовой обстановке и не сможет двигаться самостоятельно. В этих запредельных (с учетом торосистости) для данного класса условиях судно должно иметь достаточную ледопроемкость, чтобы устойчиво двигаться в канале за ледоколом и, таким образом, избежать ледового плена.

На рис. 1 представлена структурная схема влияющих на ледопроемкость факторов.

ТАБЛИЦА 2. ПРЕДЛАГАЕМОЕ ДЕЛЕНИЕ СУДОВ ПО ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛЕДОВОГО КЛАССА

Ледовый класс РМРС, 2018 г. (1995 г.)	Ледовые условия по «Нормам-таблице морских льдов» ВМО, см	Исходная расчетная толщина ровного льда, см	Торосистость, баллы	Коэффициент увеличения толщины льда	Эквивалентная толщина льда в канале, см	Расчетная ледопроемкость, м	Предлагаемое требование к минимальному уровню ледопроемкости, м
Arc9	Многолетний лед 300–400	400–500	1–2	1,4	560–700	2,4–3,0	2,4
Arc8	Двухлетний лед 200–300	300–400	1–2	1,4	420–560	1,8–2,4	1,8
Arc7	Однолетний толстый 120–200	200–300	2	1,5	300–450	1,3–1,8	1,3
Arc6	Однолетний средний 90–120	120–200	2–3	1,6	190–320	0,9–1,3	1,0
Arc5 (УЛ)	Однолетний средний 70–90	90–120	2–3	1,6	145–190	0,6–0,9	0,7
Arc4 (Л1)	Однолетний тонкий 50–70	70–90	2–3	1,6	110–145	0,4–0,6	0,5
Ice3	Белый 30–50	50–70	2–3	1,6	80–110	0,3–0,4	0,35
Ice2	Серо-белый 15–30	30–50	3	1,7	50–85	0,2–0,3	0,25
Ice1	Серый 10–15	15–30	3	1,7	25–50	0,1–0,2	0,15



РИС. 1. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОТ КОТОРЫХ ЗАВИСИТ ЛЕДОПРОХОДИМОСТЬ СУДНА

Требования к ледоходимости

Следует отметить, что помимо российской практики требования к ледоходимости судов в той или иной форме предъявляются также некоторыми зарубежными морскими администрациями. В частности, в Канадских правилах CASPPR-1972 номер ледового класса судна означает толщину льда в футах, которая принимается в качестве исходной для расчета потребной мощности судна данного класса. В Рекомендациях ХЕЛКОМ-2004 также сформулировано требование к ледоходимости судов балтийских классов.

К настоящему времени подготовлены новые редакции требований к мощности Российского морского регистра судоходства (РМРС) и Правил плавания по Северному морскому пути (СМП), в которых в качестве основного базового режима при оценке достаточности мощности рассматривается ледоходимость судов в зависимости от их ледовой категории. Насколько известно, с аналогичным подходом разрабатываются новые требования ABS к мощности судов ледового плавания.

Упомянутые требования к ледоходимости транспортных судов указаны в таблице 3. Здесь же приведены предлагаемые российской стороной в качестве нормативных значения ледоходимости для судов полярных классов ИМО.

Ледоходимость судна (и, соответственно, требуемая для этого мощность в процессе его проектирования) может быть оценена либо с помощью общепризнанного (хорошо зарекомендовавшего себя на практике) аналитического выражения, либо путем модельных испытаний в ледовом бассейне.

В качестве расчетной формулы для оценки ледоходимости (h_n) ледокольно-транспортных судов с традиционными ледокольными обводами носовой оконечности корпуса автором предложено основанное на анализе опыта постройки и испытаний отечественных ледокольных судов, а также специально выполненных серийных модельных испытаний следующее регрессионное выражение:

$$h_n = \frac{0,07 \cos^{\frac{3}{2}} \varphi \sqrt{\sin\left(\frac{\alpha_0 + \beta_0 + \beta_2}{3}\right)}}{2\sqrt[3]{f_d} \sqrt[3]{L/B} \sin^{\frac{3}{2}}(90^\circ - \beta_\infty)} \sqrt{\frac{P_e}{B}} \sqrt{D}, \text{ м} \quad (1)$$

где φ — угол наклона форштевня к КВЛ, град.;

α_0 — угол заострения КВЛ, град.;

β_0 — угол развала шпангоута на нулевом теоретическом шпангоуте, град.;

β_2 — угол развала шпангоута на втором теоретическом шпангоуте, град.;

β_∞ — угол развала шпангоута на мидель-шпангоуте, град.;

L — длина судна по КВЛ, м;

B — ширина судна по КВЛ, м;

D — водоизмещение по КВЛ, т;

P_e — суммарная тяга гребных винтов на режиме, близком к швартовному, т;

f_d — коэффициент динамического трения корпуса о лед:

$$f_d = \begin{cases} 0,065 & \text{— для нержавеющей стали,} \\ 0,072 & \text{— для покрытия типа Инерта-160,} \\ 0,080 & \text{— для обычной судостроительной стали} \end{cases}$$

Предлагаемая формула (1) успешно используется при решении задач по сравнению вариантов и выбору рациональных характеристик ледоколов и судов ледового плавания в процессе их технико-экономического обоснования. Она также применяется в практике конструкторских бюро для оценки достижимой ледоходимости или потребной мощности судна по заданной ледоходимости, а также для оптимизации параметров формы обводов носовой оконечности, исходя из условия обеспечения наименьших затрат мощности.

При известных мощности на гребных валах и диаметре винтов их суммарная тяга может быть определена по формуле:

$$P_e = k_b (d_v \cdot N_p)^{2/3}, \text{ кН} \quad (2)$$

где N_p — суммарная мощность на гребных валах, кВт;

d_v — диаметр гребного винта, м;

k_b — коэффициент, учитывающий геометрические характеристики гребных винтов, их число и взаимодействие с корпусом судна:

$$k_b = \begin{cases} 0,78 & \text{— для одновального судна,} \\ 0,98 & \text{— для двухвального судна,} \\ 1,12 & \text{— для трехвального судна.} \end{cases}$$

Как видно из формулы (1), ледоходимость судна зависит также от состояния наружной обшивки в подводной части корпуса. Это означает, что для обеспечения спецификационного значения ледоходимости в течение всего срока службы судна наружная обшивка его корпуса должна либо быть выполнена из коррозионно-стойких материалов, либо окрашена ледостойким покрытием. Ледостойкое покрытие необходимо периодически восстанавливать, и это должно быть предметом наблюдения Регистра при очередных техосмотрах и освидетельствованиях судов.

Принятие в качестве критерия ходкости судов во льдах соответствующих для каждого ледового класса значений ледопроеходимости позволит с учетом накопленного опыта благополучной эксплуатации судов в Арктике достаточно надежно оценивать возможности каждого судна в части его самостоятельного плавания или потребности в ледокольной проводке в зависимости от ледопроеходимости (ледового класса) судна, района и сезона эксплуатации в ледовых условиях. На рис. 2 представлены полученные по результатам статистической обработки данных по многолетней эксплуатации флота на трассах Северного морского пути зависимости продолжительности автономного плавания судов от их ледопроеходимости и района работы. При недостаточной ледопроеходимости для круглогодичной самостоятельной работы в заданном районе Арктики, то есть в более тяжелых по сравнению с допустимыми по ледопроеходимости условиях, судну потребуется ледокольное обеспечение. Графически это демонстрируется на рис. 2 применительно к транзитным рейсам по Севморпути судна ледопроеходимостью 2,4 м.

Таким образом, предлагаемое нормирование ледопроеходимости транспортных судов арктического плавания позволяет с учетом данных на рис. 2 значительно упростить и одновременно улучшить процедуру как оценки возможности самостоя-

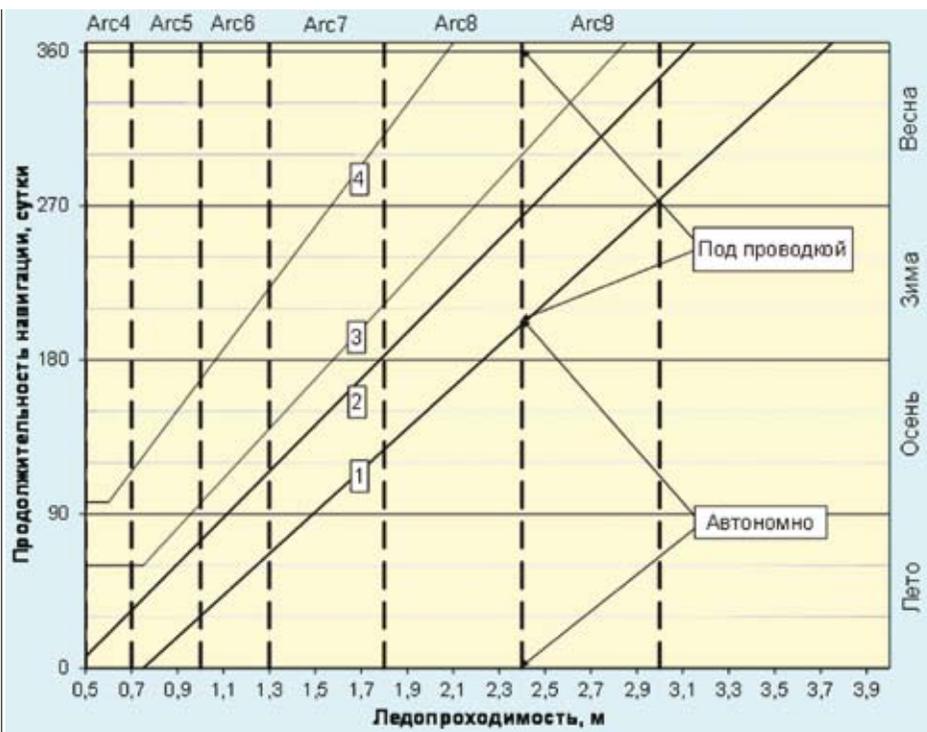


РИС. 2. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ АВТОНОМНОГО ПЛАВАНИЯ ЛЕДОКОЛЬНО-ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ОТ ЛЕДОПРОХОДИМОСТИ
 1 – в восточном районе Российской Арктики и при транзитном плавании по СМП;
 2 – в западном районе Российской Арктики;
 3 – в западной части Карского моря;
 4 – в юго-восточной части Баренцева моря.

тельного плавания в Арктическом бассейне, так и определения потребности в ледокольном сопровождении судна в зависимости от его ледовых качеств.

Поскольку ледопроеходимость является комплексным показателем, суда ледового плавания должны иметь не только достаточную мощность

энергетической установки и специально приспособленный для ледовых условий винторулевой комплекс, но и обводы корпуса, обеспечивающие снижение сопротивления льда движению судна. Это указывает на необходимость предъявления требований также к форме обводов корпуса судов ледового плавания.

ТАБЛИЦА 3. ТРЕБОВАНИЯ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ОБЩЕСТВ И МОРСКИХ АДМИНИСТРАЦИЙ К ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ

Ледовый класс	Существующие требования			Российские проекты требований				Предложение для ИМО	
	CASPPR-1995/1972	ХЕЛКОМ-2004		РМРС		Правила плавания по СМП		Полярный класс	Ледопроеходимость, см
	Исходная для расчета мощности толщина льда*, фут (см)	Ледовый класс Финско-Шведских правил	Ледопроеходимость, см	Ледовый класс	Ледопроеходимость, см	Ледовый класс	Ледопроеходимость, см		
CAC 1 10	10 (305)							PC1	300
CAC 2 8	8 (244)			Arc9		Arc9	240	PC2	240
CAC 3 6	6 (183)			Arc8		Arc8	180	PC3	180
CAC 4 4-3	4 (122)			Arc7	130	Arc7	130	PC4	130
				Arc6	100	Arc6	100	PC5	100
Туре А		1A Super		Arc5	70	Arc5	70	PC6	70
Туре В		1A	>50	Arc4	50	Arc4	50	PC7	50
Туре С		1B	30-50	Ice3	35				
Туре D		1C	15-30	Ice2	25				
Туре E		Category II	10-15	Ice1					

* Примечание: ледопроеходимость при скорости 3 уз.

Требования к форме обводов корпуса судов ледового плавания

При ознакомлении с требованиями РМРС к форме обводов корпуса транспортных судов ледового плавания представляется очевидным недостаточно обоснованный подход к назначению угла заострения КВЛ α_0 в зависимости от ледовой категории судна (таблица 3.10.1.2.2 новых Правил). Чем ниже ледовый класс, тем в меньшей степени требуется приспособлять судно к плаванию во льдах и в большей степени — к эксплуатации на чистой воде. Иными словами, суда высших ледовых категорий должны иметь форму корпуса, приближенную к ледакольной, а суда сезонного, эпизодического ледового плавания — более мореходные обводы. Это подтверждается данными по построенным судам классов Л2, Л1, УЛ и УЛА Правил 1995 г. У многочисленных лесовозов и универсальных сухогрузных судов с ледовыми усилениями категорий Л2 и Л1 угол заострения КВЛ выбран исходя из условия обеспечения ходкости на чистой воде, то есть согласно существующим рекомендациям в зависимости от числа Фруда. Соответственно, у этих судов угол α_0 принят равным в среднем около 21° . У наиболее характерных из построенных судов классов УЛ и УЛА угол заострения КВЛ при практически тех же числах Фруда увеличен с целью повышения их ледопроеходимости и в среднем составляет около 30° . Поэтому следует признать ошибочным назначение угла заострения КВЛ, допускающее уменьшение (вместо увеличения) этого угла при переходе от судов низших ледовых категорий к высшим. Значение угла α_0 в новых Правилах для судов категорий Ice3 (Л2), Arc4 (Л1) и Arc5 (УЛ) необоснованно завышено, в то время как для судов категории Arc7 (УЛА) этот угол следует увеличить (см. таблицу 4).

С учетом изложенного предлагается принимать значение угла α_0 для судов класса Arc4 (Л1) равным около 25° , для судов класса Arc5 (УЛ) — около 30° и для судов классов Arc7 (УЛА) и Arc8 — около $35-40^\circ$. При одновременном уменьшении угла наклона форштевня ϕ_0 до значений 40° для Arc4, 30° для Arc5 и 25° для Arc7 и Arc8 ле-

ТАБЛИЦА 4. ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМЕ ОБВОДОВ КОРПУСА ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ АРКТИЧЕСКОГО ПЛАВАНИЯ

Ледовый класс	Углы, град.		
	наклона форштевня, ϕ	заострения КВЛ, α_0	развала борта на миделе, β_0
По Правилам РС 1995 г.			
УЛА	25–30	30–40	0–8
УЛ	45	-	-
Л1	60	-	-
По Правилам РС 1999–2018 гг.			
Arc9, Arc8	≤ 25	≤ 30	≤ 15
Arc7, Arc6	≤ 30	≤ 30	-
Arc5	≤ 45	≤ 40	-
Arc4	≤ 60	≤ 40	-
По рекомендации ЦНИИМФ			
Arc8	около 20	около 40	≤ 8
Arc7	25–30	около 35	0–8
Arc5	30–35	около 30	0
Arc4	40–45	около 25	0
Российские суда для Арктики			
УЛА	т/х «Норильск», 1982 т/х «Иван Папанин», 1990	30 25	30 30
УЛ	т/х «Дмитрий Донской», 1977 т/х «Вентспилс», 1983	35 30	33 22
Л1	т/х «Вытергалес», 1963 т/х «Влас Ничков», 1974	43 50	23 26

допроеходимости судов классов Arc5 и Arc7 может быть повышена на 7-10%, а класса Arc4 — до 30% без заметного ущерба мореходным качествам. Либо при заданной ледопроеходимости это обеспечит экономию мощности до 20-30% для высших категорий и значительно больше для низших.

Рекомендуемые значения параметров формы обводов корпуса судов ледового плавания в большей степени отражают реальный опыт постройки судов арктических классов, нежели требования Правил РМРС, что свидетельствует о недостаточной обоснованности последних. Реализуемые на практике более оптимальные обводы корпуса транспортных судов обеспечивают лучшую эффективность их работы во льдах (повышение ледопроеходимости) при одновременном обеспечении энергосбережения. Кроме того, более обтекаемые обводы носовой оконечности способствуют также снижению ледовых нагрузок на корпус судна.

Вместе с тем выполненное изучение соответствия ледовых качеств построенных судов арктических классов требованиям Правил РМРС выявило невозможность с помощью существующих требований к мощности обеспечить заданную (необходимую) ледовую ходкость судна, в частности ледопроежимость, представляющую собой наиболее пред-

ставительный обобщенный критерий ледовой ходкости судна. Также, как показывает опыт постройки судов для Арктики, необходимо откорректировать требования к форме обводов их корпуса, что позволит наряду с энергосбережением повысить эффективность и безопасность работы судов во льдах.

Нужна корректировка Правил

Таким образом, с учетом изложенного выше предлагается выполнить следующую корректировку ныне действующих Правил классификации и постройки морских судов касательно требований к транспортным судам арктических классов:

1. Дополнить Правила РМРС требованием к ледопроежимости судов ледовых классов с использованием обоснованных выше численных значений основного критерия ледовой ходкости.

2. Исключить из Правил РМРС как не оправдывающие своего назначения требования к минимальной мощности на гребных валах судов ледовых классов Arc 4 — Arc 9 (см. «Морской флот» № 4 за 2018 г.).

3. Откорректировать требования к форме обводов корпуса судов ледовых классов в соответствии с изложенными рекомендациями. **МФ**