

УДК 629.123 + 532.583.4  
EDN TBXALX

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ И ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКЦИИ ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА НОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

**Е.М. Апполонов**, д-р техн. наук, профессор, АО ЦКБ «Лазурит», 191036 Россия, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 6, корп. 2, лит. А, e-mail: em\_appolonov@cdb-lazurit.ru

**В.В. Платонов**, канд. физ.-мат. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 196158 Россия, Санкт-Петербург, Московское ш., 44, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

**В.Н. Тряскин**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», 190008 Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

Излагаются методика и алгоритм построения зависимостей для определения параметров расчетных ледовых нагрузок на бортовые конструкции судов ледового плавания, основанных на новой модели динамического разрушения льда (МДРЛ). Рассмотрены теоретические основы МДРЛ. Для построения расчетных зависимостей выполнены сбор и анализ представительной статистической информации по форме корпуса судов ледового плавания в широком диапазоне водоизмещения и для различных ледовых классов. На основе систематизации этой информации предложено разделение судов на несколько групп, отличающихся значениями параметров формы корпуса на уровне расчетной ватерлинии. Обоснованы исходные данные для выполнения расчетов ледовых нагрузок по новой модели. Структура исходных данных определяется матрицей планирования эксперимента — численного эксперимента с использованием специализированного программного обеспечения. Расчетные зависимости представлены в виде квадратичных регрессионных зависимостей. Настройка расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок выполнена на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов. Приведены результаты практической апробации расчетных зависимостей. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования требований Правил Российского морского регистра судоходства.

**Ключевые слова:** судно ледового плавания, районы ледовых усиления, модель динамического разрушения льда, расчетные зависимости для определения ледовых нагрузок, Правила Регистра.

**Для цитирования:** Апполонов Е.М. Методика разработки и практическая апробация расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усиления транспортных судов ледового плавания, основанных на новой модели динамического разрушения льда / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 74 — 95. — EDN TBXALX.

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT AND PRACTICAL TESTING OF CALCULATED DEPENDENCIES FOR DETERMINING ICE LOADS ON THE STRUCTURES OF ICE REINFORCEMENTS OF ICE-NAVIGATION TRANSPORT VESSELS BASED ON A NEW MODEL OF DYNAMIC ICE DESTRUCTION

**E.M. Appolonov**, DSc, Professor, Lazurit CDB, 191036 Russia, St. Petersburg, Ligovsky pr., 6/2A, e-mail: em\_appolonov@cdb-lazurit.ru

**V.V. Platonov**, PhD (Eng.), Krylov State Research Centre, 196158 Russia, St. Petersburg, Moskovskoe sh., 44, e-mail: viktorplatonov@yandex.ru

**V.N. Tryaskin**, DSc, Professor, St. Petersburg State Marine Technical University, 190008 Russia, St. Petersburg, Lotsmanskaya ul., 3, e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

A methodology and algorithm for constructing dependencies for determining the parameters of calculated ice loads on the on-board structures of ice navigation vessels based on a new model of dynamic ice destruction (MDRL) are described. The theoretical foundations of MDRL are considered. To construct the calculated dependencies, representative statistical information on the shape of the hull of ice navigation vessels was collected and analyzed in a wide range of displacement and for various ice classes. Based on the systematization of this information, it is proposed to divide ships into several groups, differing in the values of hull shape parameters at the level of the calculated waterline. The initial data for performing calculations of ice loads according to the new model are substantiated. The structure of the initial data is determined by the experiment design matrix — a numerical experiment using specialized software. The calculated dependencies are presented in the form of quadratic regression dependencies. The adjustment of the calculated dependencies for determining the parameters of ice loads is based on calculations of ice loads for

real ships. The results of practical testing of the calculated dependencies are presented. The results obtained can be used to improve the requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping.

**Key words:** ice navigation vessel, areas of ice reinforcement, model of dynamic ice destruction, calculated dependencies for determining ice loads, Rules of the Register.

**For citation:** Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodology for the development and practical testing of calculated dependencies for determining ice loads on the structures of ice reinforcements of ice-navigation transport vessels based on a new model of dynamic ice destruction. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 74 — 95. EDN TBXALX. (In Russ.)

## ВВЕДЕНИЕ

Действующие требования Правил Российского морского регистра судоходства к ледовым усилениям судов и ледоколов (Правила Регистра) [1] были разработаны в конце 90-х годов прошлого века и прошли почти 20-летнюю практическую апробацию. По требованиям действующих Правил построены и строятся современные российские суда ледового плавания и ледоколы, анализ опыта эксплуатации которых показывает, что данные о ледовой повреждаемости носят единичный характер и в целом уровень ледовой прочности, заложенный в действующие Правила, является удовлетворительным. Однако, с другой стороны, анализ научно-теоретической основы действующих Правил позволил сделать вывод, что гидродинамическая модель, используемая при определении расчетных ледовых нагрузок, переоценивает роль процесса динамического вытеснения разрушенного льда за пределы зоны контакта и игнорирует процесс разрушения льда непосредственно от смятия. Эта особенность обуславливает завышенное влияние на ледовую нагрузку скорости и массы судна, что, прежде всего, должно учитываться при экстраполяции накопленного опыта нормирования ледовой прочности судов малых и средних размерений и средних ледовых классов на перспективные крупнотоннажные суда, суда высоких арктических категорий и ледоколы нового типа.

Для исключения этого недостатка и совершенствования требований к ледовой прочности судов ледового плавания предлагается выполнить переход к новой модели динамического разрушения льда (МДРЛ), согласующейся с современными экспериментальными данными о разрушении льда при ударном воздействии. Для внедрения новой модели разрушения льда в практику проектирования судов ледового плавания и ледовой классификации Правил Регистра требуется разработка алгоритмов и программного обеспечения для определения параметров ледовых нагрузок на ее основе и построение расчетных зависимостей, предназначенных для использования в требованиях Правил Регистра. Поэтому целью настоящей работы является разработка системы расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на конструкции ледовых усиления судов ледового плавания, основанных на модели динамического разрушения льда и ориентированных на применение в Правилах Регистра.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МДРЛ

Как было указано выше, в отечественном судостроении с конца 1970-х годов при определении ледовых нагрузок используется гидродинамическая модель удара твердого тела о лед (далее ГДМ) [2]. Многочисленные эксперименты по сбрасыванию полусферических грузов на лед (Drop Ball Tests) с измерением давлений в нескольких точках полусферы [3, 4], эксперименты по внедрению в лед среднемасштабных инденторов [5] и натурные ледовые испытания судов, оснащенных специальной системой для измерения давлений в зоне контакта корпуса со льдом [6], проведенные в 1980-е — 1990-е годы, поставили под сомнение достоверность ГДМ. Анализ результатов этих экспериментов позволил установить следующую качественную картину разрушения льда при местном смятии применительно к случаю удара наклонным бортом о скругленную кромку льдины, при котором зона контакта значительно вытянута в продольном (вдоль судна) направлении (рис. 1), представляющему основной практический интерес:

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

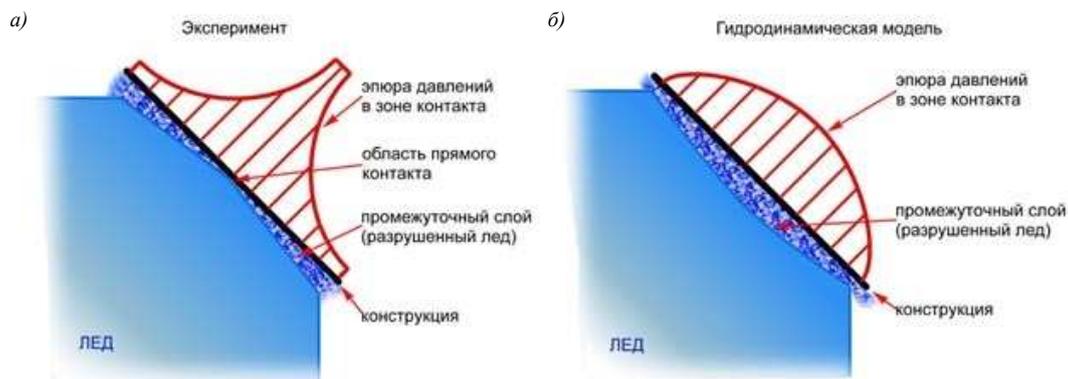


Рис. 1. Физическая картина разрушения льда при местном смятии: а — эксперимент; б — ГДМ

Таким образом, согласно изложенной физической картине, максимальные давления реализуются в области, где промежуточный слой отсутствует, а с увеличением толщины промежуточного слоя давления уменьшаются. В рамках ГДМ имеет место обратная ситуация, при которой максимальные давления возникают в области максимальной толщины промежуточного слоя в центре зоны контакта и распределение давлений по высоте зоны контакта имеет параболический характер.

Первым шагом к учету фактической картины разрушения льда при местном смятии была разработка модифицированной ГДМ, косвенно принимавшаяся во внимание при разработке действующих Правил Регистра [7]. Далее была сформулирована модель динамического разрушения льда при местном смятии (МДРЛ) [8], получившая свое развитие в работах [9, 10]. МДРЛ 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. 2):

- 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.

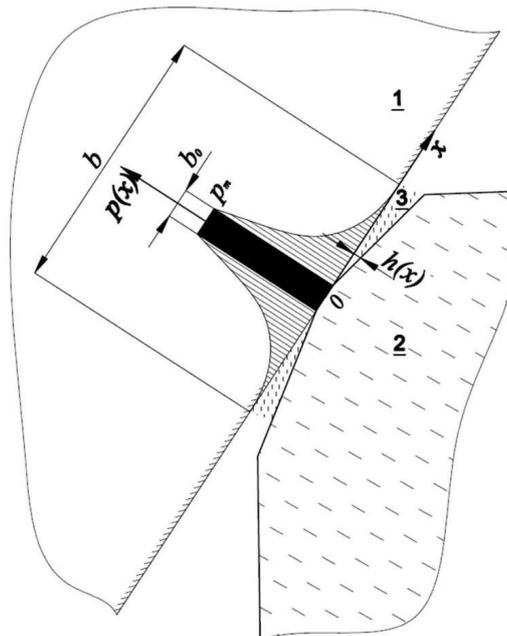


Рис. 2. Модель динамического разрушения льда (зона контакта вытянута вдоль борта судна): 1 — твердое тело (борт судна); 2 — ледовое поле; 3 — промежуточный слой разрушенного мелкодисперсного льда

В дальнейшем для внедрения МДРЛ в практику проектирования было выполнено ее совершенствование [10], на ее основе разработаны рекомендации по определению параметров ледовых нагрузок на ледоколы, предназначенные для использования в Правилах Регистра для определения размеров элементов конструкций ледовых усилений [11], и методика определения допустимых скоростей движения судна во льдах [12].

## 2. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМЫ КОРПУСА СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Для анализа формы корпуса традиционных и современных судов ледового плавания были выбраны существующие проекты, по которым имелась в наличии необходимая информация (табл. 1, 2). Под традиционными понимались суда ледового плавания, форма корпуса которых отвечает рекомендациям п. 3.10.1.2.2 Правил Регистра [1], а под современными — суда ледового плавания, форма корпуса которых отличается от рекомендуемой. Эти рекомендации регламентируют угол наклона форштевня, угол входа ватерлинии и углы наклона борта к ДП в некоторых сечениях по длине судна. В настоящей работе приводятся результаты анализа формы корпуса традиционных (табл. 1) и современных (табл. 2) судов ледового плавания в носовой, кормовой оконечностях и средней части.

Таблица 1

Проекты традиционных судов ледового плавания

№	Название	Год постройки	Тип	Водоизмещение, тыс. т	Ледовая категория
1	FSO Producer	1978	Танкер	145,780	—
2	Велта	1971	Танкер	2,285	ЛУ1 / Ice1
3	Delphin	1978	УСС <sup>1</sup>	14,672	Л3 / Ice1
4	Nancy	1980	Балкер	48,119	Л3 / Ice1
5	Tahoma Reefer	1980	Рефрижератор	6,629	ЛУ1 / Ice1
6	Марта Арендзее	1985	Рыболовное	2,449	ЛУ2 / Ice2
7	Corolina	—	УСС	19,915	ЛУ2 / Ice2
8	Maro	1981	УСС	4,868	Л3 / Ice2
9	Хатанга	1987	Танкер	30,059	Л2 / Ice3
10	Lee	1985	Накатное судно	10,606	Л2 / Ice3
11	Механик Ярцев	1990	Лесовоз	4,309	Л1 / Arc4
12	Breezy	1973	Лесовоз	6,757	Л1 / Arc4
13	Dream	1973	Лесовоз	6,745	Л1 / Arc4
14	Energy Annabelle	1980	Балкер	32,030	УЛ4 / Arc4
15	Surf	1978	Балкер	20,096	Л1 / Arc4
16	Варзуга	1977	Танкер	22,050	УЛ / Arc5
17	Йоганн Махмасталь	1990	Лесовоз	12,520	УЛ / Arc5
18	Севморпуть	1988	Контейнеровоз	54,324	УЛ / Arc5
19	Fifth	1977	Балкер	27,060	УЛ / Arc5
20	Норильск	1982	Ro-Lo	33,850	УЛА / Arc7
21	Яуза	1974	БМСТ <sup>2</sup>	11,062	УЛА / Arc7

<sup>1</sup>Универсальное сухогрузное судно.  
<sup>2</sup>Большой морской сухогрузный транспорт.

Таблица 2

Проекты современных судов ледового плавания

№	Название	Год постройки	Тип	Водоизмещение, тыс. т	Ледовая категория
1	Проект 22480	—	Пассажирское	2,134	Arc4
2	РН Сахалин	2018	Танкер	5,164	Arc4
3	Василий Динков	2008	Танкер	92,198	Arc6
4	Академик Трешников	2011	НИС <sup>1</sup>	16,750	Arc7
5	Енисей	2011	Танкер	25,555	Arc7
6	Штурман Альбанов	2016	Танкер	58,765	Arc7
7	Christophe de Margerie	2016	Газовоз	143,866	Arc7
8	IBSV 10022	—	Судно снабж.	11,674	Arc7
9	Проект 125	—	Танкер	162,176	Arc7
10	Проект 803	—	ПБКОВР <sup>2</sup>	44,972	Arc7

<sup>1</sup>Научно-исследовательское судно.  
<sup>2</sup>Плавучая база комплексного обеспечения буровых работ.

Анализ показал, что водоизмещение традиционных судов ледового плавания в среднем находится в диапазоне от 2,0 до 35,0 тыс. т. У современных судов ледового плавания водоизмещение может принимать значение в широком диапазоне — от 2,0 до 170,0 тыс. т.

Для традиционных судов ледового плавания характерны протяженные носовые и кормовые заострения, достигающие 35 — 40 % длины судна. Среднестатистические значения углов наклона ватерлинии и борта в носовом районе традиционных судов не превосходят  $30^\circ$  и  $40^\circ$  (рис. 3, 4), а в кормовом районе  $40^\circ$  и  $60^\circ$  соответственно (рис. 5, 6).

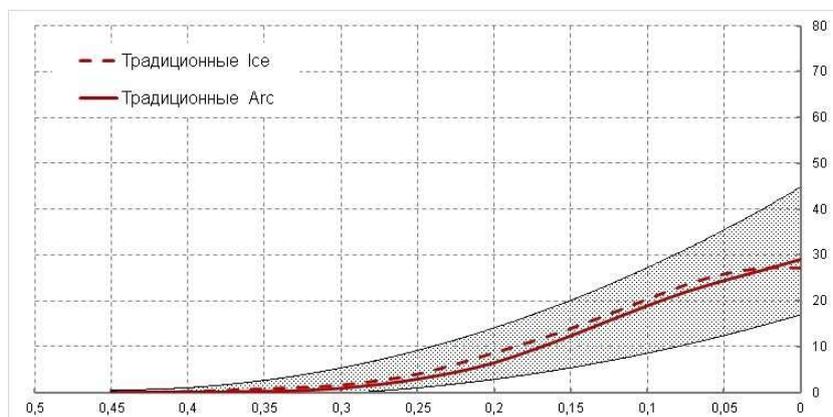


Рис. 3. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

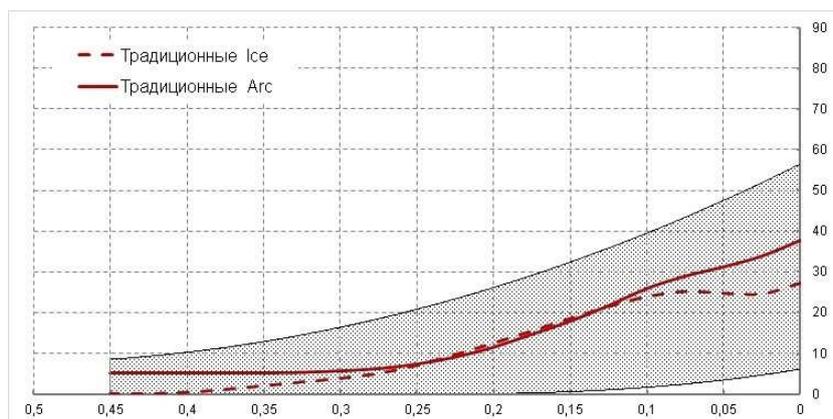


Рис. 4. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

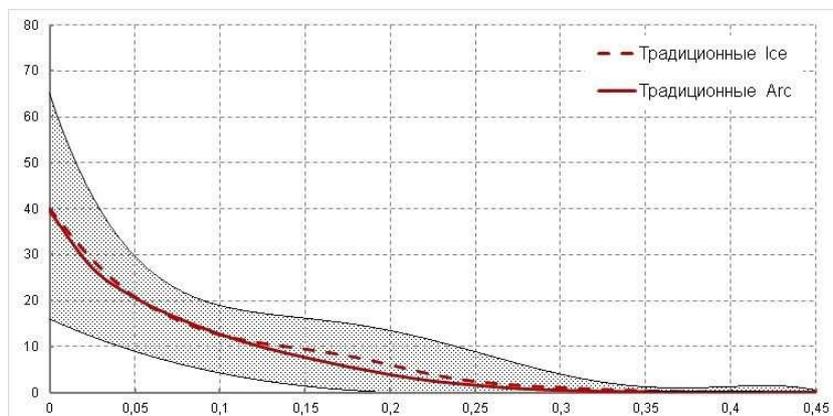


Рис. 5. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

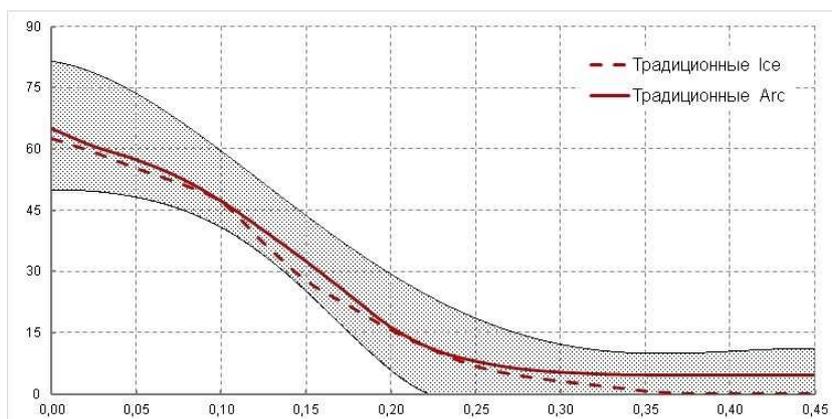


Рис. 6. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для традиционных судов ледового плавания

Для современных судов ледового плавания характерна значительно меньшая протяженность носового и кормового заострений, которые не превосходят 25 % длины судна для носовой оконечности и 15 % — для кормовой. Это приводит к формам корпуса в оконечностях со значительно большими среднестатистическими значениями углов наклона ватерлиний и шпангоутов, которые могут достигать  $55^{\circ}$  —  $70^{\circ}$  в носовой оконечности (рис. 7, 8) и  $65^{\circ}$  —  $75^{\circ}$  — в кормовой (рис. 9, 10).

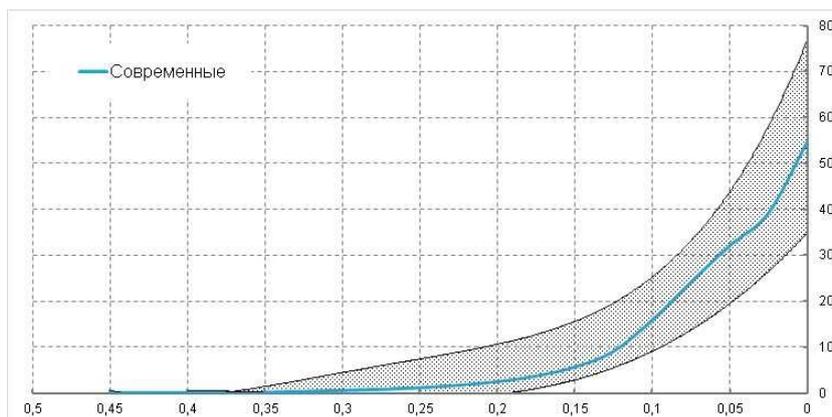


Рис. 7. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

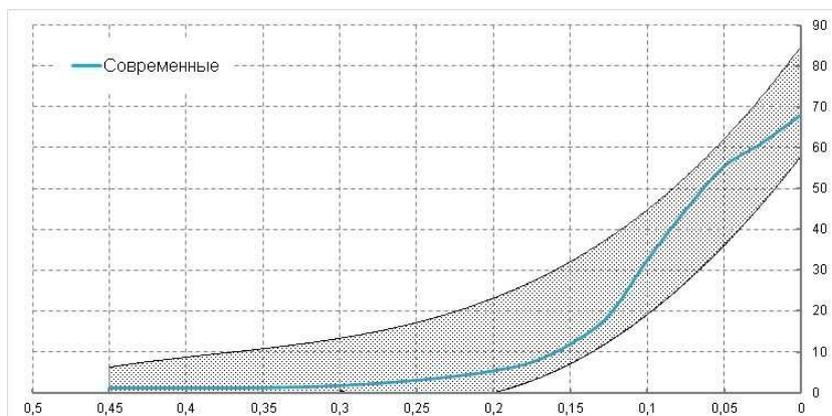


Рис. 8. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине носовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

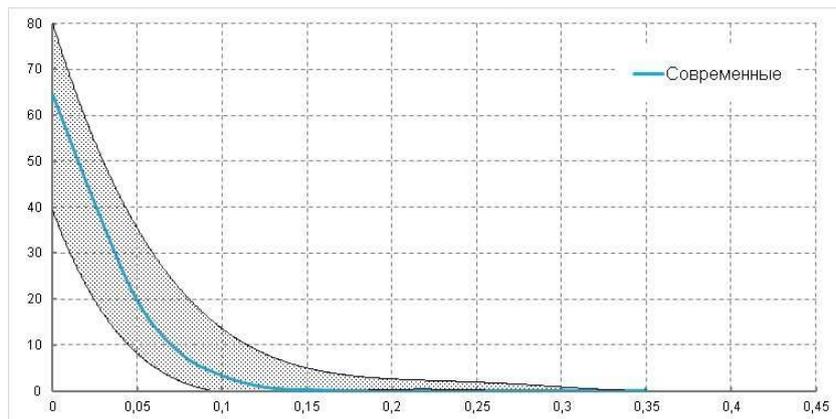


Рис. 9. Среднестатистическое распределение углов наклона ватерлинии по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

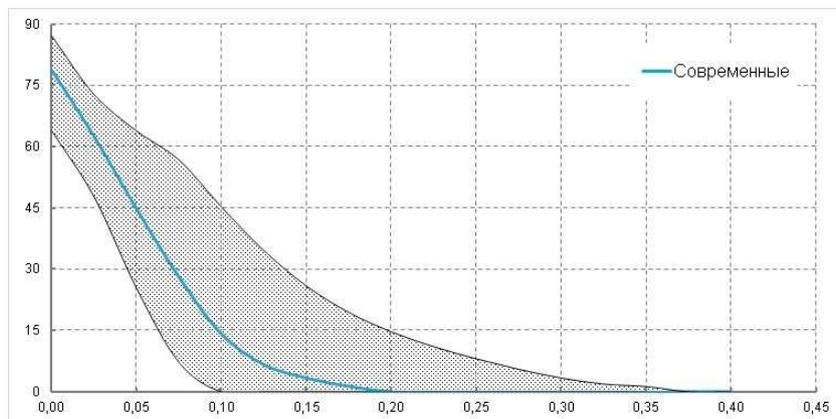


Рис. 10. Среднестатистическое распределение углов наклона шпангоута по длине кормовой оконечности на уровне расчетных осадок для современных судов ледового плавания

На основании обобщения информации по форме корпуса рассмотренных судов выделены две представительные группы судов ледового плавания:

**1) традиционные суда ледового плавания** (без носового бульба) с категориями ледовых усилений Ice1 — Ice3 и Arc4 — Arc7 в диапазоне водоизмещения 5,0 — 35,0 тыс. т;

**2) современные суда ледового плавания** (без носового бульба) с категориями ледовых усилений Ice1 — Ice3 и Arc4 — Arc9 в диапазоне водоизмещения 5 — 170,0 тыс. т.

Суда 2-й группы, учитывая слишком широкий диапазон водоизмещения, дополнительно были разделены на подгруппы: 5,0 — 35,0 тыс. т. и 30,0 — 170,0 тыс. т.

Суда с бульбовыми обводами носовой оконечности недостаточно представлены в статистике и поэтому в настоящем исследовании не рассматривались.

### 3. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

Как было описано выше, МДРЛ 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 (см. рис. 2). Для вытянутой в длину зоны контакта, реализуемой при ударе корпуса судна о лед, разрешающее уравнение ГДМ сводится к виду:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} h^3 + 3h^2 \left( \frac{dp}{dx} \frac{dh}{dx} \right) = -3\mu v, \quad (1)$$

где  $p(x)$  — давление в промежуточном слое;  
 $h(x)$  — толщина промежуточного слоя;  
 $\mu$  — коэффициент внутреннего трения;  
 $v$  — мгновенная скорость внедрения тела в лед;  
 $x$  — координата.

Уравнение (1) дополняется следующей системой допущений, вытекающей из анализа экспериментальных данных:

$$\begin{aligned} h &= kx; \\ p(x) &= p_m, \text{ при } x \leq 0,5b_0; \\ p(0,5b) &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

$$p(x) \leq p_m, \text{ при } 0,5b_0 < x \leq 0,5b_0;$$

$$b_0 \ll b,$$

где  $k$  — постоянный коэффициент, определяемый по экспериментальным данным;  
 $b$  — размер высоты зоны контакта судна со льдом;  
 $b_0$  — размер области прямого контакта 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.

С учетом условий (2), дифференциальное уравнение, описывающее мгновенное распределение давлений по зоне контакта, примет вид:

$$x \frac{d^2 p}{dx^2} + 3 \frac{dp}{dx} = -A v/x^2, \quad (3)$$

где  $A$  — параметр МДРЛ.

Решение дифференциального уравнения (3) применительно к случаю удара наклонного борта судна о скругленную кромку ледового поля позволяет получить следующие результаты:

— в области прямого контакта тела со льдом  $x \leq 0,5b_0$ , расположенной в центре зоны контакта, ледовое давление постоянно и равно  $p_m$ :

$$p(x) = p_m, \quad (4)$$

— ледовое давление в зоне вытеснения  $0,5b_0 < x \leq 0,5b_0$  монотонно убывает по закону:

$$p(x) = \left[ p_m - 2 \frac{Av}{b} (b/b_0 - 1) \right] \frac{(b/2x)^2 - 1}{(b/b_0)^2 - 1} + \frac{2Av}{b} (b/2x - 1), \quad (5)$$

— погонная ледовая нагрузка определяется по формуле:

$$p = p_m b \frac{1 + \bar{b}_0}{2\bar{b}_0} - 2 \left( \frac{2(1 - \bar{b}_0)}{1 + \bar{b}_0} + \ln(\bar{b}_0) \right) vA, \quad (6)$$

где  $\bar{b}_0 = b_0/b$ ,

— значение интегрального усилия взаимодействия со льдом определяется по формуле:

$$P = \frac{4q}{3} \sqrt{2Rb \sin \beta'}, \quad (7)$$

где  $R$  — радиус скругления кромки льда;  
 $\beta'$  — угол наклона к вертикали нормали к борту в центре зоны контакта,

— длина эпюры ледовой нагрузки  $l_z$  определяется по формуле:

$$l_z = \frac{4}{3} \sqrt{2Rb \sin \beta'}. \quad (8)$$

Рекомендации по выбору нормативных значений параметров МДРЛ, входящих в зависимости (1) — (8), приведены в работе [10].

Расчет параметров ледовой нагрузки на основании МДРЛ осуществляется по следующему алгоритму. На первом этапе определяются приведенные к направлению удара массы судна и льдины. Здесь применяются те же расчетные зависимости, что и при использовании ГДМ удара судна о лед. На втором этапе выполняется численное решение дифференциального уравнения движения судна в направлении удара:

$$\frac{M}{C} v \frac{dv}{d\zeta} + \int_F p dF = 0, \quad (9)$$

где  $C$  — коэффициент приведения массы судна;  
 $v$  — скорость внедрения борта судна в лед;  
 $\zeta$  — глубина внедрения;  
 $M$  — масса судна;  
 $p$  — контактное давление;  
 $F$  — площадь зоны контакта.

Начальные условия решения дифференциального уравнения следующие:

$$t = 0; x = 0; P = 0; v = v_0 = V_0 l,$$

где  $v_0$  — скорость движения судна, приведенная к направлению удара;  
 $V_0$  — скорость поступательного движения судна в момент удара;  
 $l$  — коэффициент приведения скорости к направлению удара.

При этом на каждом шаге численного интегрирования проверяется условие разрушения льда изгибом:

$$P = \frac{1,33 \sigma_u H^2}{\sin \beta'}, \quad (10)$$

где  $\sigma_u$  — предел прочности льда на изгиб;  
 $H$  — толщина льда;  
 $\beta'$  — угол наклона борта судна к вертикали.

Как только усилие взаимодействия со льдом достигает величины (10), расчет прекращается. Если этого не происходит, то расчет продолжается до тех пор, пока скорость судна в направлении удара не упадет до нуля.

При этом в процессе расчета необходимо фиксировать промежуточные параметры ледовой нагрузки: давление —  $p$ ; высоту зоны контакта —  $b_z$ ; погонную нагрузку —  $q$ ; длину зоны контакта —  $l_z$ ; суммарную силу —  $P_S$  для определения их максимальных значений.

#### 4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ МАССОВЫХ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ НОВОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА

На основании анализа особенностей формы корпуса судов ледового плавания, приведенного в разделе 2, были сформированы сетки традиционных и современных судов ледового плавания — таблицы, определяющие главные размерения судов, коэффициенты полноты и их водоизмещение, представленные в таблицах 3 и 4. В указанных таблицах  $L$  — длина между перпендикулярами;  $B$  — ширина судна;  $d$  — расчетная осадка;  $D$  — высота борта на миделе;  $\alpha_c$  — коэффициент полноты ватерлинии;  $\beta_c$  — коэффициент полноты мидель-шпангоута;  $\Delta$  — расчетное водоизмещение.

Таблица 3

Сетка традиционных судов (группа 1)

№ судна	$L$ , м	$B$ , м	$d$ , м	$D$ , м	$\alpha_c$	$\beta_c$	$\Delta$ , т	Относительная длина носового заострения
1	85,8	13,7	5,6	7,9	0,846	0,970	5000	0,4
2	121,2	18,7	7,3	10,6	0,853	0,971	12500	0,4
3	144,7	21,9	8,3	12,3	0,859	0,972	20000	0,4
4	163,2	24,4	9,1	13,7	0,866	0,973	27500	0,4
5	178,7	26,5	9,8	14,8	0,873	0,974	35000	0,4

Таблица 4

Сетка современных судов (группа 2)

№ судна	$L$ , м	$B$ , м	$d$ , м	$D$ , м	$\alpha_c$	$\beta_c$	$\Delta$ , т	Относительная длина носового заострения
1	85,8	13,7	5,6	7,9	0,846	0,970	5000	0,2
2	121,2	18,7	7,3	10,6	0,853	0,971	12500	0,2
3	144,7	21,9	8,3	12,3	0,859	0,972	20000	0,2
4	163,2	24,4	9,1	13,7	0,866	0,973	27500	0,2
5	164,0	25,7	9,3	14,3	0,860	0,977	30000	0,2
6	178,7	26,5	9,8	14,8	0,873	0,974	35000	0,2
7	215,3	32,9	11,7	17,9	0,878	0,983	65000	0,2
8	250,6	37,8	13,3	20,4	0,896	0,987	100000	0,2
9	278,6	41,6	14,5	22,3	0,915	0,989	135000	0,2
10	302,2	44,8	15,5	23,8	0,933	0,991	170000	0,2

Для каждой группы судов установлены диапазоны изменения углов наклона ватерлинии и шпангоутов в пределах носового и кормового заострения (см. 5.1).

## 5. МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК

### 5.1. Исходные положения методики.

#### 5.1.1. Нагрузки на носовой и кормовой районы ледового пояса.

Методика построения зависимостей для определения параметров расчетных ледовых нагрузок для конструкций судов ледового плавания, предназначенных для использования в нормативных документах Регистра, отличается от принятой при разработке аналогичных зависимостей для ледоколов [11]. Это связано с большим количеством ледовых классов и со значительно более широким диапазоном варьирования характеристик судов по массе (водоизмещению) и параметрам формы корпуса.

Для того чтобы получить достаточно точные зависимости параметров ледовых нагрузок от водоизмещения, расчеты ледовых нагрузок проводились для выделенных групп судов при пяти значениях водоизмещения:

- в диапазоне 5,0 — 35,0 тыс. т:  
5,0 12,5 20,0 27,5 35,0 тыс. т,  
среднее значение: 20,0 тыс. т;
- в диапазоне 5,0 — 170,0 тыс. т:  
5,0 12,5 20,0 27,5 35,0 тыс. т,  
среднее значение: 20,0 тыс. т;  
30,0 65,0 100,0 135,0 170,0 тыс. т,  
среднее значение: 100,0 тыс. т.

Для построения расчетных зависимостей, позволяющих определить параметры ледовых нагрузок, принято решение использовать аппарат планирования эксперимента. Под экспериментом понимается расчет параметров ледовой нагрузки на основе новой модели динамического разрушения льда с использованием специального программного обеспечения. Для выполнения расчетов (численных экспериментов) необходимо определить состав варьируемых параметров и диапазон их варьирования.

В качестве варьируемых параметров приняты те характеристики формы корпуса, которые определяют значения ледовых нагрузок для судна заданного водоизмещения: абсцисса точки контакта со льдом  $x/L$  относительно носового перпендикуляра, угол наклона ватерлинии  $\alpha$  и борта  $\beta$  в точке контакта. Другие исходные данные: расчетные характеристики ледяного покрова, скорость движения судна, масса судна, приведенная к направлению удара, и прочее — определялись по рекомендациям, принятым в МДРЛ (см. раздел 1).

На основе анализа статистики по существующим судам ледового плавания приняты следующие диапазоны варьирования параметров:

<b>для судов 1-й группы:</b>	<b>для судов 2-й группы:</b>
район носового заострения:	район носового заострения:
$x/L: 0,0 — 0,3; (x/L)_{cp} = 0,15;$	$x/L: 0,0 — 0,25; (x/L)_{cp} = 0,125;$
$\alpha: 5^\circ — 45^\circ; \alpha_{cp} = 25,0^\circ;$	$\alpha: 5^\circ — 75^\circ; \alpha_{cp} = 49,0^\circ;$
$\beta: 5^\circ — 55^\circ; \beta_{cp} = 30^\circ;$	$\beta: 5^\circ — 85^\circ; \beta_{cp} = 45,0^\circ;$
район кормового заострения:	район кормового заострения:
$x/L: 0,0 — 0,2; (x/L)_{cp} = 0,10;$	$x/L: 0,0 — 0,2; (x/L)_{cp} = 0,10;$
$\alpha: 5^\circ — 65^\circ; \alpha_{cp} = 35,0^\circ;$	$\alpha: 5^\circ — 75^\circ; \alpha_{cp} = 40,0^\circ;$
$\beta: 5^\circ — 75^\circ; \beta_{cp} = 40,0^\circ;$	$\beta: 5^\circ — 75^\circ; \beta_{cp} = 40,0^\circ.$

Количество экспериментов и, соответственно, комбинации значений варьируемых параметров в каждом эксперименте определялись матрицей центрального композиционного планирования (ЦКП), методика формирования которой рассмотрена в работе [13]. При трех варьируемых параметрах для построения квадратичных моделей достаточно выполнить 15 экспериментов. Ниже в качестве примера показаны матрицы планирования эксперимента для расчета нагрузок на носовой район традиционного и современного судна ледового плавания (табл. 5.1, 5.2 и 6.1, 6.2). Параметр «ALFA» — это так называемое звездное плечо, которое необходимо задать согласно методике ЦКП для построения квадратичных моделей. Матрица строится с использованием кодированных значений варьируемых параметров (факторов):  $-1, +1, -ALFA, +ALFA$ . Переход к натуральному значению варьируемого параметра осуществляется по формуле  $\tilde{x}_i = \tilde{x}_{0i} + \Delta x_i x_i$ .

Таблица 5.1

Традиционные суда ледового плавания

Варьируемые параметры (факторы)		$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
Номер фактора		1	2	3
Уровни фактора	+ ALFA	0,3000	45,000	55,000
	— ALFA	0,0000	5,000	5,000
	+ 1	0,2734	41,455	50,569
	— 1	0,0266	8,545	9,431
	0	0,1500	25,000	30,000
ALFA = 1,2154	$\Delta x$	0,1234	16,4553	20,5692

Таблица 5.2

Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Кодированные значения			Натуральные значения		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
1	—1	—1	—1	0,0266	8,545	9,431
2	1	—1	—1	0,2734	8,545	9,431
3	—1	1	—1	0,0266	41,455	9,431
4	1	1	—1	0,2734	41,455	9,431
5	—1	—1	1	0,0266	8,545	50,569
6	1	—1	1	0,2734	8,545	50,569
7	—1	1	1	0,0266	41,455	50,569
8	1	1	1	0,2734	41,455	50,569
9	—1,2154	0	0	0,0000	25,000	30,000
10	1,2154	0	0	0,3000	25,000	30,000
11	0	—1,2154	0	0,1500	5,000	30,000
12	0	1,2154	0	0,1500	45,000	30,000
13	0	0	—1,2154	0,1500	25,000	5,000
14	0	0	1,2154	0,1500	25,000	55,000
15	0	0	0	0,1500	25,000	30,000

Таблица 6.1

Современные суда ледового плавания

Варьируемые параметры (факторы)		$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
Номер фактора		1	2	3
Уровни фактора	+ ALFA	0,2500	75,000	85,000
	– ALFA	0,0000	5,000	5,000
	+1	0,2278	68,797	77,911
	–1	0,0222	11,203	12,089
	0	0,1250	40,000	45,000
ALFA = 1,2154	$\Delta x$	0,1028	28,7968	32,9107

Таблица 6.2

Матрица планирования эксперимента

№ эксперимента	Кодированные значения			Натуральные значения		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\tilde{x}_1 = x/L$	$\tilde{x}_2 = \alpha$	$\tilde{x}_3 = \beta$
1	–1	–1	–1	0,0222	11,203	12,089
2	1	–1	–1	0,2278	11,203	12,089
3	–1	1	–1	0,0222	68,797	12,089
4	1	1	–1	0,2278	68,797	12,089
5	–1	–1	1	0,0222	11,203	77,911
6	1	–1	1	0,2278	11,203	77,911
7	–1	1	1	0,0222	68,797	77,911
8	1	1	1	0,2278	68,797	77,911
9	–1,2154	0	0	0,0000	40,000	45,000
10	1,2154	0	0	0,2500	40,000	45,000
11	0	–1,2154	0	0,1250	5,000	45,000
12	0	1,2154	0	0,1250	75,000	45,000
13	0	0	–1,2154	0,1250	40,000	5,000
14	0	0	1,2154	0,1250	40,000	85,000
15	0	0	0	0,1250	40,000	45,000

При построении расчетных зависимостей принято решение учесть практически все допустимые расчетные режимы эксплуатации судов, определяемые кривыми базовых опасных режимов движения (БОРД). Принятые расчетные точки режимов движения показаны на рис. 11. Расчеты параметров ледовых нагрузок на район носового заострения выполнялись для режимов, регламентируемых 1, 6 и 10 точками кривых БОРД. Точка 1 определяет режим движения с наибольшей допустимой скоростью во льдах наименьшей для класса толщины. Точка 10 определяет режим движения с наименьшей допустимой скоростью во льдах наибольшей для класса толщины. Точка 6 определяет некоторый средний режим, который был принят в качестве нормативного при разработке требований к ледовым усилениям в действующих Правилах Регистра. Были выполнены специальные исследования, показавшие, что при этом режиме расчетные значения параметров ледовой нагрузки, определяемых по новой МДРЛ, достаточно хорошо согласуются с соответствующими величинами действующих Правил, определяемыми по гидродинамической модели (ГДМ) взаимодействия корпуса судна со льдом.

Дополнительная особенность предложенной методики связана с принципом учета разрушения льда от изгиба. Принято допущение, учитывающее определенную условность модели разрушения льда от изгиба [14, 15]: при толщине более  $\approx 3$  м лед считается не разрушаемым от изгиба; при меньших толщинах льда разрушение от изгиба учитывается. В соответствии с таким подходом учет разрушения льда определяется следующей матрицей признаков («+» — учитывается, «–» — не учитывается).

При построении расчетных зависимостей должно обеспечиваться соответствие расчетных значений погонной нагрузки, контактного давления и суммарной силы, определяемых по новой МДРЛ, и их значений, определяемых с использованием предлагаемых приближенных зависимостей для  $p$ ,  $b_z$ ,  $l_z$ .

Кроме того, параметры расчетных ледовых нагрузок для класса и района ледовых усиления должны коррелировать с соответствующими характеристиками, регламентируемыми действующими Правилами Регистра. Это удастся обеспечить за счет редуцирования значений (подбора соответствующих значений) высоты зоны контакта, а также средних базовых значений контактного давления, погонной нагрузки, суммарной силы с учетом результатов расчета параметров ледовой нагрузки для конкретных судов ледового плавания.

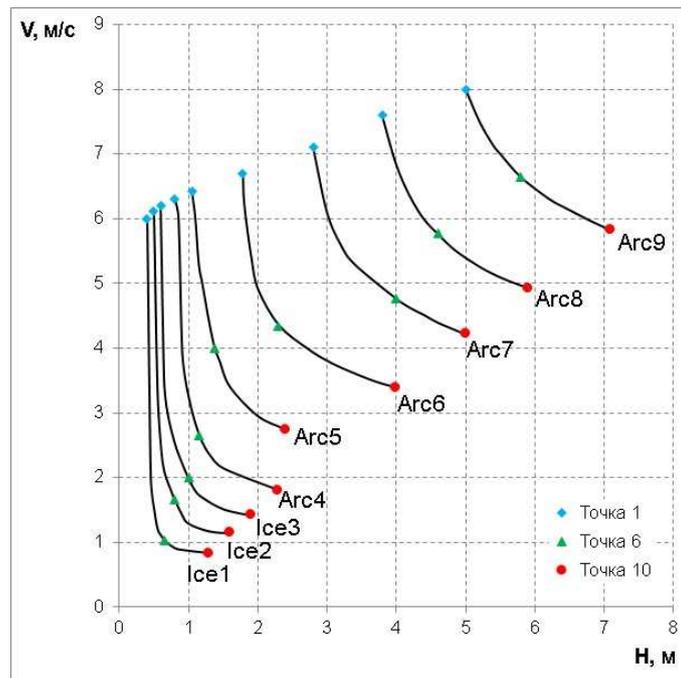


Рис. 11. Кривые базовых опасных режимов движения (БОРД)

Таблица 7

Матрица признаков учета разрушения льда от изгиба

Категория ледовых усилений	Номер точки кривой БОРД		
	1	6	10
Ice1	+	+	+
Ice2	+	+	+
Ice3	+	+	+
Arc4	+	+	+
Arc5	+	+	+
Arc6	+	—	—
Arc7	—	—	—
Arc8	—	—	—
Arc9	—	—	—

### 5.1.2. Нагрузки на средний район ледового пояса.

Структура расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений в среднем районе ледовых усилений, используемых в действующих Правилах Регистра [1], позволяет сделать вывод, что они основаны на гидродинамической модели ударного взаимодействия корпуса судна со льдом.

При разработке этих рекомендаций предполагалось, что ударное взаимодействие со льдом возможно при маневрировании и циркуляции судов во льдах. При этом рассматривался удар бортом в среднем районе ледовых усилений о льдину конечной массы при наличии дополнительных составляющих скорости от дрейфа и вращения судна. Крен судна, возникающий при этом, также учитывается при определении контактных усилий. При нормальных условиях эксплуатации циркуляция и маневрирование обычно выполняется при толщине льда порядка 50 — 75 % от максимальной по условиям ледовой ходкости. Скорость судна на циркуляции не превосходит 65 — 80% достижимой технической скорости на чистой воде, которая принимается (0,85 — 0,90) от спецификационной скорости судна [16]. Расчетные оценки с использованием программного комплекса IceStar<sup>1</sup> показывают, что расчетные нагрузки на конструкции ледового пояса в средней части судна составляют 0,5 — 0,6 от расчетных предельных нагрузок на обшивку и набор в среднем районе ледового пояса, принятых в действующих Правилах Регистра. Это соответствует соотношению между предельными нагрузками и нагрузками фибровой текучести.

<sup>1</sup>Программный комплекс IceStar разработан специалистами СПбГМТУ и «Бюро Веритас» и прошел достаточно обстоятельное тестирование применительно к реальным существующим и перспективным судам ледового плавания.

В рассматриваемой методике определения нагрузок на средний район ледового пояса предлагается сохранить уровень расчетных нагрузок с небольшими изменениями в плане учета влияния массы судна на ударные нагрузки при маневрировании и циркуляции судна. Степень влияния массы судна на величину расчетного давления может быть несколько снижена и предварительно принята на основе анализа результатов расчета нагрузок на носовой район ледового пояса с использованием новой модели:

$$p_{BI} = 1200a_3(\Delta/(1000))^{n_p},$$

где  $a_3$  — коэффициент, принимаемый согласно п. 3.10.3.2.3 требований Правил Регистра [1],

$n_p$  — показатель степенной зависимости от водоизмещения, соответствует значению для носового района.

Высоту распределения в среднем районе предлагается назначать с учетом особенностей эксплуатации судна при циркуляции и маневрировании и назначать как 0,75 от допускаемой для ледового класса, регламентируемой Правилами Регистра (Ч. I «Классификация» [17]).

## 5.2. Алгоритм построения расчетных зависимостей для определения расчетных ледовых нагрузок на носовой и кормовой районы ледового пояса.

Алгоритм построения расчетных зависимостей сводится к следующей последовательности действий.

1. Выполнение расчетов параметров ледовой нагрузки с использованием новой МДРЛ и разработанного программного обеспечения: контактного давления —  $p$ , погонной нагрузки —  $q$ ; высоты зоны контакта —  $b_z$ ; длины зоны контакта —  $l_z$ ; суммарной контактного усилия —  $P_S$ .

Расчеты выполняются для всех ледовых классов в соответствии с матрицей планирования, определяющей значения варьируемых параметров формы корпуса, для пяти значений водоизмещения и трех расчетных режимов (1, 6, 10), определяемых кривой БОРД (рис. 11).

2. Выполнение с использованием новой МДРЛ и разработанного программного обеспечения расчетов максимальных значений параметров ледовой нагрузки для каждого эксперимента и построение огибающих с учетом результатов расчета для каждого из трех режимов.

Ниже в табл. 8 в качестве примера приведены результаты расчета контактного давления для судна водоизмещением 20 тыс. т с традиционной формой корпуса и категорией усиления Arc7. Расчеты показывают, что в разных экспериментах максимальное давление может соответствовать как точке 10, так и точкам 1 и 6. Это подтверждает правильность принятого методического подхода. Огибающая  $p_{max}$  показана на рис. 12.

Таблица 8

№ эксперимента	Номер точки кривой БОРД			$p_{max}$
	1	6	10	
1	2,872	4,470	4,928	4,928
2	3,202	4,429	4,888	4,888
3	5,876	4,801	4,687	5,876
4	5,909	4,915	4,910	5,909
5	4,951	4,030	4,015	4,951
6	4,737	4,629	4,519	4,737
7	6,181	6,636	7,143	7,143
8	5,937	6,355	6,861	6,861
9	5,724	6,177	6,671	6,671
10	3,954	5,588	6,065	6,065
11	3,933	4,395	4,240	4,395
12	5,503	3,493	6,425	6,425
13	4,909	4,241	4,233	4,909
14	5,656	6,092	6,558	6,558
15	3,587	5,834	6,319	6,319
Среднее	4,862	5,072	5,498	5,776

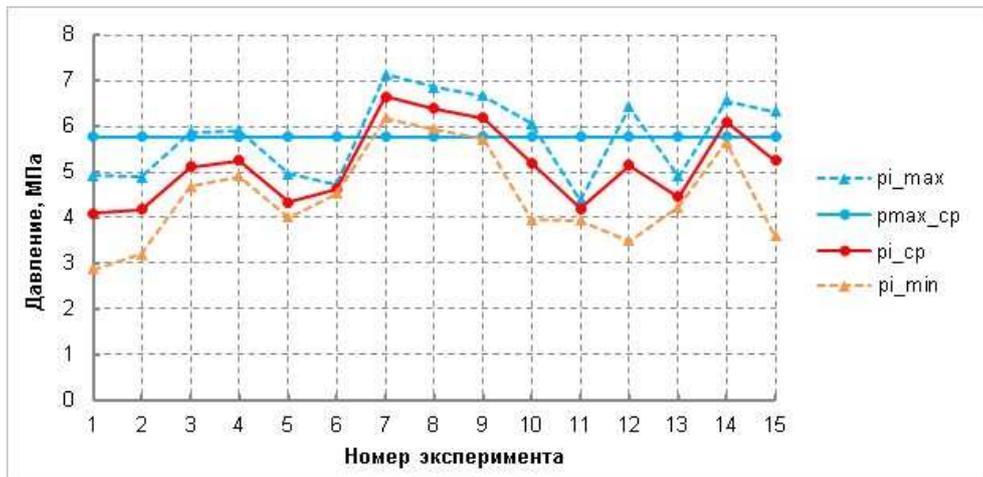


Рис. 12. Результаты расчетов контактного давления для судна водоизмещением 20 тыс. т с традиционной формой корпуса и категорией усиления Arc7:

$p_{i\_max}$  — максимальное давление для  $i$ -го эксперимента по результатам расчета для трех точек БОРД (огibaющая);

$p_{max\_cp}$  — среднее максимальное давление по всем экспериментам (среднее давление для носового заострения);

$p_{i\_cp}$  — среднее давление для  $i$ -го эксперимента по результатам расчета для трех точек БОРД;

$p_{i\_min}$  — минимальное давление для  $i$ -го эксперимента по результатам расчета для трех точек БОРД

Аналогичные расчеты выполняются для каждой группы судов, для каждого ледового класса в пределах группы, для пяти значений водоизмещения, для всех параметров ледовой нагрузки: контактного давления —  $p$ , погонной нагрузки —  $q$ ; высоты зоны контакта —  $b_z$ ; длины зоны контакта —  $l_z$ ; суммарной контактного усилия —  $P_S$ .

### 3. Обработка результатов расчетов (предварительная).

#### 3.1. Согласование значений погонной нагрузки, контактного давления и высоты зоны контакта.

Для каждого  $i$ -го эксперимента определяются значения высоты зоны контакта из условия  $b_i = q_{i\_max}/p_{i\_max}$ . Таким образом обеспечивается согласование максимальных значений погонной нагрузки и давлений, определенных по трем точкам кривой БОРД (огibaющих) для каждого эксперимента. Эти значения несколько отличаются от максимальных значений  $b_{i\_max} = \max\{b_{ij}\}$ ;  $j = 1, \dots, 3$ , определенных по результатам расчетов для трех точек БОРД.

#### 3.2. Корректировка расчетных значений высоты зоны контакта.

Корректировка значений расчетной высоты зоны контакта осуществляется для исключения влияния несовершенства упрощенной эмпирической модели «кривая давление — площадь» (pressure — area curve)  $p = f(A)$ , используемой в алгоритме МДРЛ. В рамках корректировки зависимость  $b_{z\_i}(\Delta)$  «поворачивается» относительно среднего (базового) значения водоизмещения  $\Delta_0$  для заданной группы судов. В качестве примера в табл. 9 и на рис. 13, 14 представлены результаты корректировки расчетных значений высоты зоны контакта и контактных давлений применительно к средним значениям по всем экспериментам для судна водоизмещением 20 тыс. т с традиционной формой корпуса и категорией усиления Arc7.

Таблица 9

Исходные и скорректированные значения высоты зоны контакта и контактных давлений

$\Delta$	5000	12500	20000	27500	35000
$b_{z\_i} = q/p$	0,867	1,210	1,376	1,493	1,601
$b_{z\_corr} = 0,5(b_{z\_i}(\Delta)/b_{z\_i}(20))$	1,122	1,293	1,376	1,435	1,489
$p_{max}$ (сред)	6,516	5,962	5,776	5,697	5,602
$p_{max\_corr} = q/b_{z\_corr}$	4,759	5,443	5,776	5,997	6,129

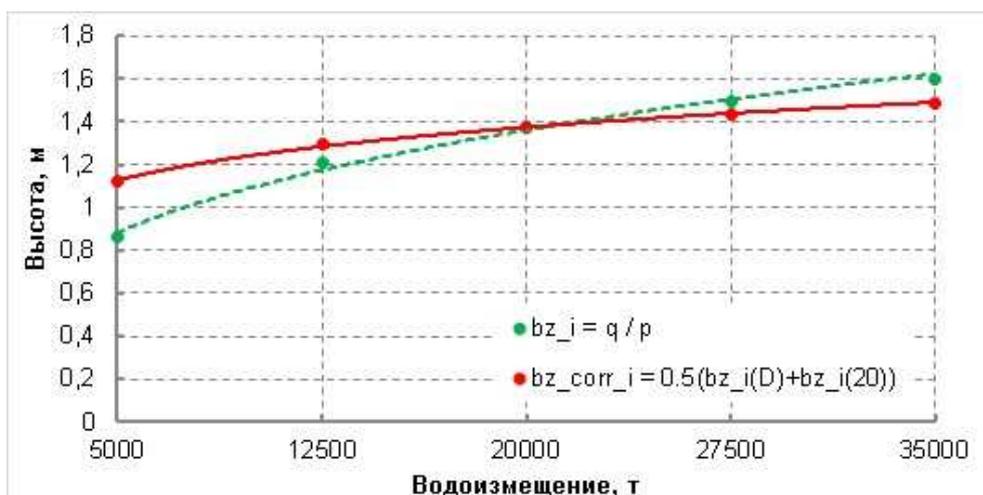


Рис. 13. Исходные и скорректированные значения высоты зоны контакта

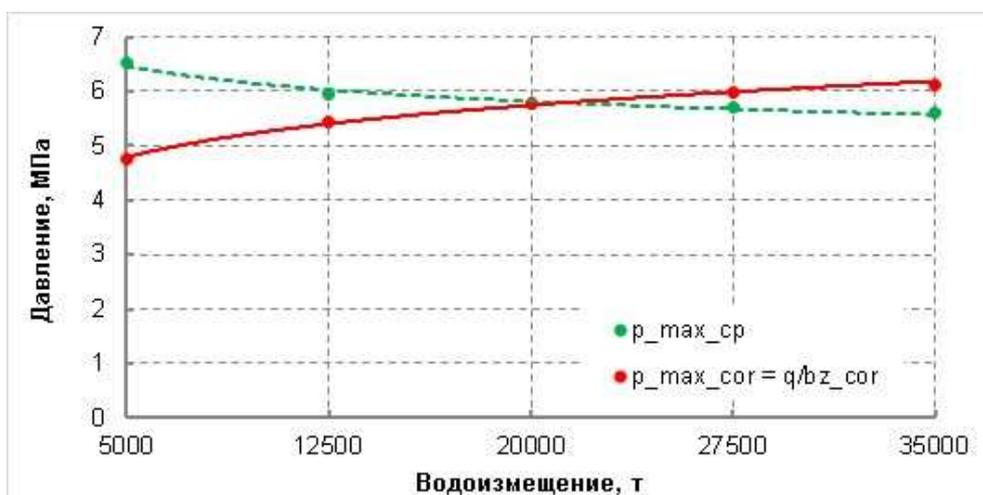


Рис. 14. Исходные и скорректированные значения контактного давления

### 3.3. Построение регрессионных зависимостей, определяющих среднестатистическую связь параметров ледовых нагрузок с параметрами формы корпуса судна.

Для построения регрессионных зависимостей используется аппарат аппроксимации метода планирования эксперимента (см. выше). Для решения этой задачи используется программный комплекс «Полином», разработанный на кафедре конструкции судов СПбГМТУ [18].

В качестве анализируемых величин, для которых строятся регрессионные формулы, приняты относительные значения:

погонной нагрузки  $\bar{q}_i(\Delta) = q_i(\Delta)/q_{cp}(\Delta)$ ;

давления  $\bar{p}_{corr\_i}(\Delta) = p_{corr\_i}(\Delta)/p_{corr\_cp}(\Delta)$ ;

высоты зоны контакта  $\bar{b}_{z\_corr\_i}(\Delta) = b_{z\_corr\_i}(\Delta)/b_{z\_corr\_cp}(\Delta)$ .

В результате обработки этих величин при помощи ПК «Полином» строятся регрессионные зависимости вида:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{i=k} b_{ii} x_i^2 + \sum_{j>i=1}^{i=k} b_{ij} x_i x_j,$$

где  $x_i$  — варьируемые переменные;

$i = 1, \dots, k$ ;

$b_0, b_i$  — коэффициенты регрессии.

Анализ показывает, что коэффициенты регрессии для разных значений водоизмещения несколько различаются, но с достаточной точностью можно принимать их значения для среднего базового значения водоизмещения. Кроме того, для дальнейшего построения расчетных зависимостей можно усреднять значения коэффициентов регрессии в пределах выделенных групп классов: Ice1 — Ice3; Arc4 — Arc5; Arc6; Arc7 — Arc9.

#### 3.4. Построение среднестатистических зависимостей для референсного (базового) значения параметров ледовой нагрузки.

Пример построения таких зависимостей показан ниже в табл. 10 и на рис. 15 для судов с категорией ледовых усилений Arc6 — Arc9.

Таблица 10

Определение коэффициентов аппроксимирующих функций (Arc6 — Arc9)

$\Delta$ тыс. т	$c(\Delta)$				$c(\Delta)$ среднее
	Arc6	Arc7	Arc8	Arc9	
5	0,815	0,824	0,840	0,843	0,830
12,5	0,935	0,942	0,939	0,943	0,940
20	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
27,5	1,054	1,038	1,041	1,036	1,042
35	1,091	1,061	1,066	1,071	1,072
Коэффициенты аппроксимирующей функции		$a = 0,672$ $n = 0,132$			

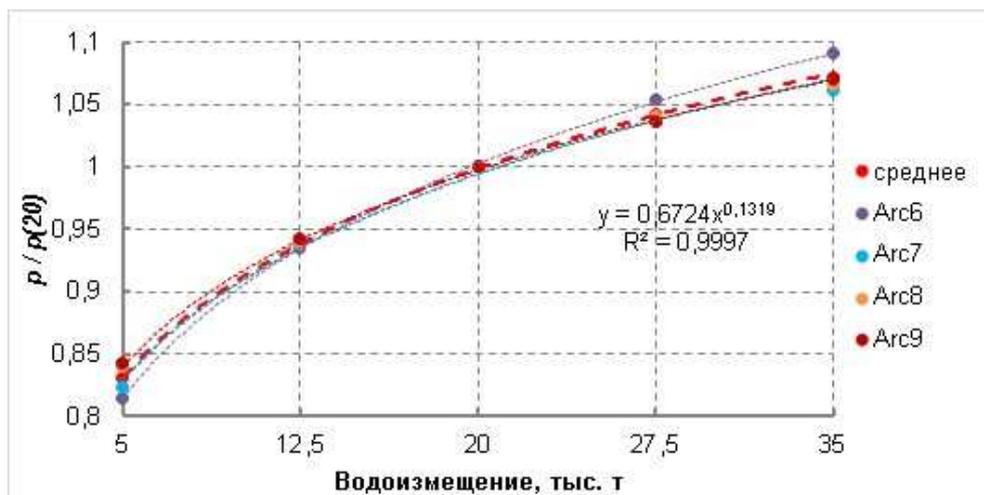


Рис. 15. Построение среднестатистических зависимостей для референсного (базового) значения параметров ледовой нагрузки (к табл. 10)

#### 3.5. Построение расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок.

Расчетные зависимости для определения параметров ледовых нагрузок представляются в следующей общей форме:

$$Y = Y_{ref}(IC) C_Y(\Delta) f_Y(x/L, \alpha, \beta), \quad (11)$$

где:  $Y_{ref}(IC)$  — референсное (базовое) значение соответствующего параметра нагрузки, зависящее от ледового класса судна;  
 $C_Y(\Delta) = a_Y (\Delta/1000)^{n_Y}$  — функция, определяющая влияние водоизмещения; коэффициенты аппроксимирующей функции  $a_Y$  и  $n_Y$  для разных групп судов;  
 $f_Y(x/L, \alpha, \beta)$  — функции, определяющие влияние формы корпуса в расчетном сечении по длине судна (функции формы), представленные в виде квадратичных регрессий.

### 3.6. Настройка расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов.

Расчетные зависимости (формулы) для определения параметров ледовых нагрузок включают составляющие, определяемые с той или иной степенью точности. Это может приводить к некоторым отклонениям величин, определяемых по формуле и прямым расчетом с использованием разработанного программного обеспечения.

Результаты исследования показывают, что аппроксимация функций формы квадратичными регрессиями в диапазонах изменения параметров существующих и перспективных судов обеспечивает достаточную точность предсказания истинного значения параметра ледовой нагрузки, определяемого с использованием программного комплекса.

В связи с этим оценка адекватности построенных расчетных зависимостей выполняется на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов.

Настройка расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок на основе расчетов ледовых нагрузок для реальных судов выполнялась в соответствии со следующим алгоритмом:

- расчет параметров ледовых нагрузок по требованиям действующих Правил и с использованием расчетных зависимостей, построенных на основе новой МДРЛ. При этом рассматривается несколько реальных проектов судов ледового плавания, попадающих в рассматриваемую группу по классу и по водоизмещению;
- построение и сглаживание кривых, характеризующих изменение базисных значений погонной нагрузки и расчетного давления. Для этого осуществляется диалоговый подбор базисных значений в общем случае для каждого класса.

Для упрощения согласования полезно построить кривую относительных значений базовых величин, которые могут рассматриваться как классификационные кривые. На рис. 16 показаны примеры соответствующих классификационных кривых — кривых относительных значений базовых величин погонной нагрузки (синие диаграммы) и кривых относительных значений базовых величин контактного давления (красные диаграммы) для судов арктических классов.

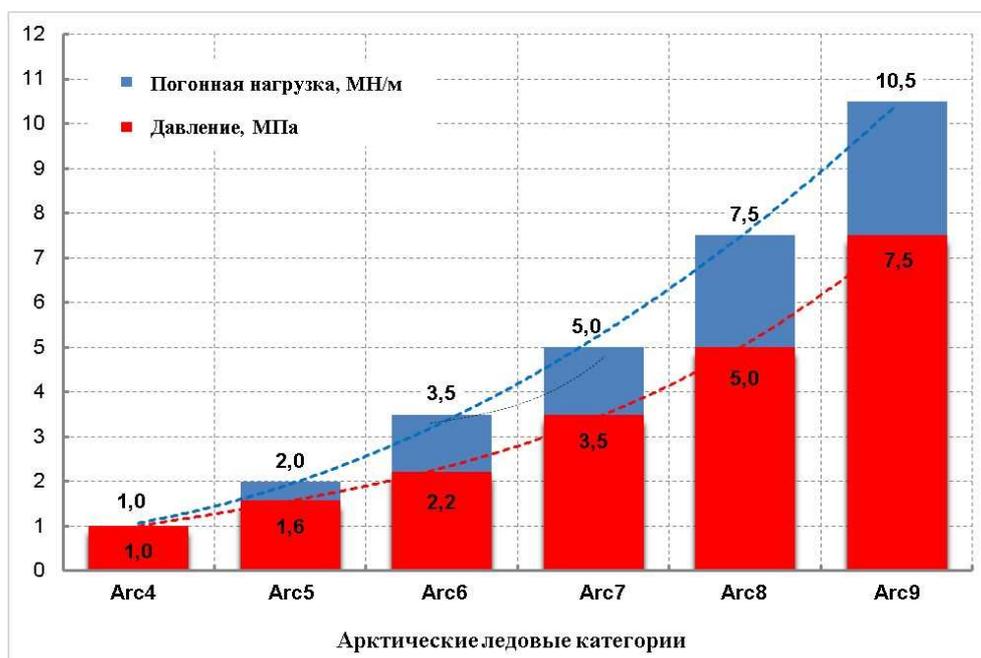


Рис. 16. Классификационные кривые погонной нагрузки и контактного давления

Классификационная кривая контактного давления характеризует соотношение прочности конструкций ледовых усилениях наружной обшивки, а классификационная кривая погонной нагрузки характеризует соотношение прочности конструкций ледовых усилениях набора ледового пояса. За базовые классификационные значения приняты относительные базовые величины погонной нагрузки и давления для класса Arc4.

## 6. ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК

Практическая апробация построенных зависимостей для определения ледовых нагрузок выполнена на примере танкера ледового класса проекта 125. Судно проекта 125 является челночным танкером дедвейтом 120 тыс. т, предназначенным для самостоятельной эксплуатации в арктических условиях. Корпус судна имеет категорию ледовых усилений Arc7.

На рис. 17 — 20 приведено сопоставление ледового давления, погонной нагрузки, высоты и длины распределения для танкера проекта 125 на основании требований действующих Правил Регистра и разработанных предложений. Графики, представленные на указанных рисунках, показывают, что разработанные предложения приводят к снижению расчетного ледового давления в носовом районе на 28 %, в промежуточном на 2 %, в среднем на 19 %, а в кормовом районе на 30 % относительно требований действующих Правил. Значения расчетной высоты распределения в носовом и среднем районах снизятся на 7 % и 11 % соответственно, а в промежуточном и кормовом увеличатся на 9 % и 5 % соответственно. Такие изменения давления и высоты распределения приведут к тому, что погонная нагрузка в носовом, среднем и кормовом районах снизится на 38 %, 32 % и 24 % соответственно, а в промежуточном районе увеличится на 7 %.

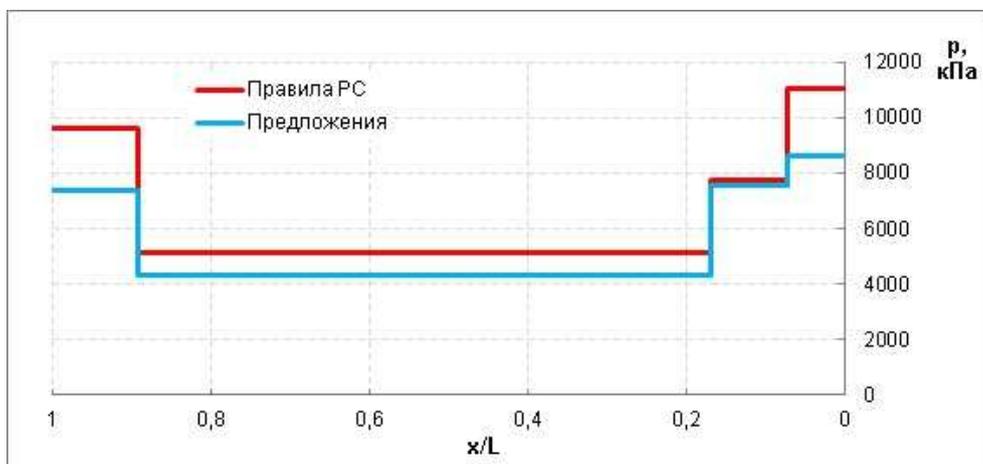


Рис. 17. Сопоставление ледового давления, кПа, по действующим Правилам и разработанным предложениям

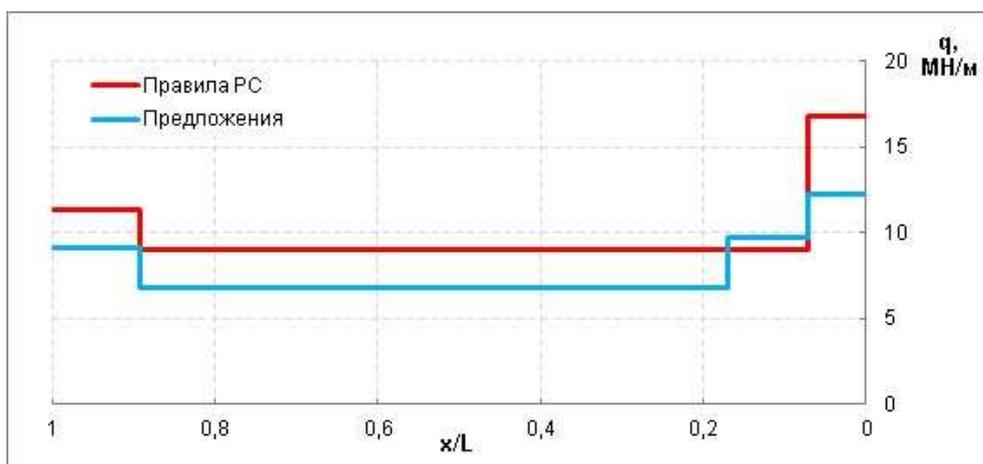


Рис. 18. Сопоставление погонной нагрузки, МН/м, по действующим Правилам и разработанным предложениям

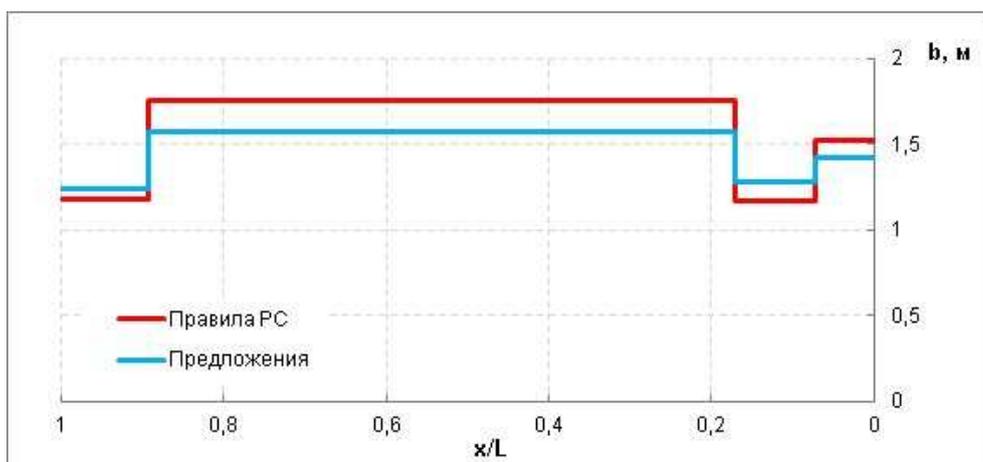


Рис. 19. Сопоставление высоты распределения, м, по действующим Правилам и разработанным предложениям

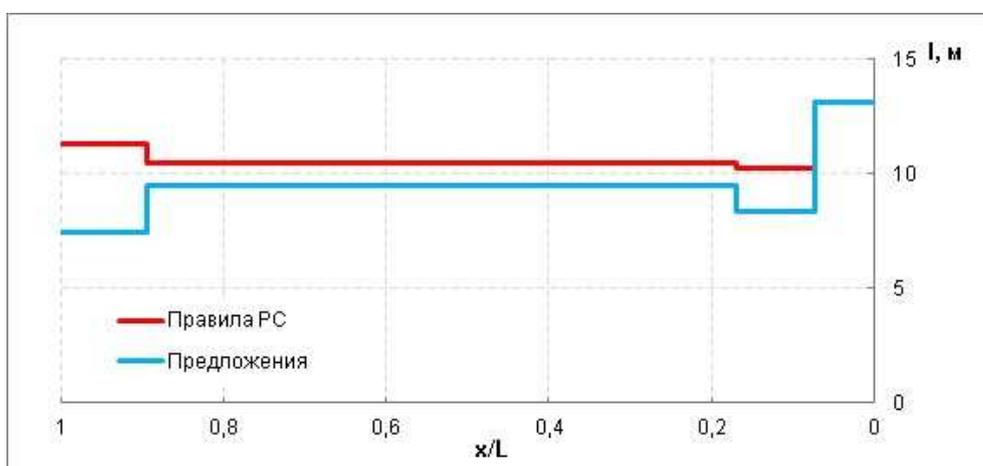


Рис. 20. Сопоставление длины распределения, м, по действующим Правилам и разработанным предложениям

В табл. 11 и 12 соответственно приведено сравнение толщины наружной обшивки и профилей балок основного набора для трех зон района А ледовых усиления танкера проекта 125 для ледовых нагрузок по действующим Правилам Регистра и разработанным предложениям.

Таблица 11

Толщина наружной обшивки, мм, в районе А ледовых усиления

	Нос — шп. 230, Z=14,16 м	Нос — шп. 230, Z=12,14 м	Нос — шп. 230, Z=10,12 м
Правила РС	42	44	40
Предложения	38	39	36

Таблица 12

Балки основного набора в районе А ледовых усиления

		Нос — шп. 230, Z=14,16 м	Нос — шп. 230, Z=12,14 м	Нос — шп. 230, Z=10,12 м
Правила РС	№ профиля	350 × 38	350 × 38	320 × 36
	Прис. пояска	42/580	44/612	40/52
Предложения	№ профиля	320 × 28	320 × 30	300 × 28
	Прис. пояска	38/580	39/612	36/520

Полученные оценки для танкера проекта 125 и судов других проектов, рассмотренных при разработке новых зависимостей, позволяют сделать вывод, что переход на новую МДРЛ для определения расчетных ледовых нагрузок обеспечивает снижение металлоемкости конструкций ледовых усилений до 10 — 15 % для перспективных крупнотоннажных транспортных судов и судов высших ледовых категорий.

На основе результатов исследований, которые представлены в настоящей статье, разработаны предложения по корректировке требований 3.10.3.2 Правил Регистра [1]. Предложения сводятся к изменениям расчетных зависимостей для определения параметров ледовых нагрузок. Предлагается их определять по формулам типа (11), в которых функции, определяющие влияние формы корпуса в расчетном сечении по длине судна (функции формы), представляются в виде квадратичных регрессий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны методика и алгоритм построения расчетных зависимостей для определения параметров расчетной ледовой нагрузки на конструкции корпуса судов ледового плавания, основанные на результатах массовых расчетов в рамках представительной совокупности (сетки) судов с использованием новой модели динамического разрушения льда.

Выполнены сопоставительные расчеты параметров ледовой нагрузки, полученных с использованием разработанной системы зависимостей и требований п. 3.10.3.2 действующих Правил Регистра.

Разработаны предложения по корректировке требований Правил Регистра в части определения параметров ледовой нагрузки для судов ледового плавания (п. 3.10.3.2) на основании построенных зависимостей с использованием разработанного алгоритма и результатов прямых расчетов для реальных проектов судов на основании новой модели динамического разрушения льда.

При переходе к новой системе расчетных зависимостей при сохранении общего уровня требований к ледовой прочности транспортных судов достигается снижение ледовых нагрузок и соответственно металлоемкости ледовых усилений для перспективных крупнотоннажных судов и судов высших ледовых категорий.

В процессе выполнения работы также подготовлено специализированное программное обеспечение, которое может быть использовано в практике Регистра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II «Корпус» / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
2. Курдюмов В.А. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед / В.А. Курдюмов, Д.Е. Хейсин // Прикладная механика. — 1976. — Т. 12. — № 10. — С. 103 — 109.
3. Timco G.W. Drop impact tests on freshwater ice: spherical head / G.W. Timco, R.M.W. Frederking // Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium. Vol. 11. Espoo, Finland, Aug. 20 — 23, 1990. — P. 776 — 787.
4. Timco G.W. Laboratory impact tests on freshwater ice / G.W. Timco, R.M.W. Frederking // Cold Region Science and Technology. — 1993. — Vol. 22. — P. 77 — 97.
5. Frederking R.M.W. Field tests of ice indentation of medium scale Hobson's choice ice island / R.M.W. Frederking, I.J. Jordaan, J.S. McCallum // Proceeding of the 10th IAHR Ice Symposium. Vol. 11. Espoo, Finland, Aug. 20 — 23, 1990. — P. 931 — 944.
6. Ritch R. Ice load impact measurements on the CCGS Louis S. St. Laurent during the 1994 Arctic Ocean crossing / R. Ritch, J. St. John, R. Browne, R. Sheinberg // Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. July 11 — 16, 1999, St. John's Newfoundland. — Paper OMAE99/P&A-1141.
7. Апполонов Е.М. Ледовая прочность судов, предназначенных для круглогодичной арктической навигации / Е.М. Апполонов. СПб.: СПбГМТУ, 2016. — 288 с.
8. Апполонов Е.М. Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок / Е.М. Апполонов, А.В. Дидковский, М.А. Кутейников, А.Б. Нестеров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2022. — № 25. — С. 83 — 100.
9. Апполонов Е.М. Совершенствование требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Т. 3, № 385. — С. 18 — 28.
10. Апполонов Е.М. Новая модель динамического разрушения льда как основа для совершенствования требований Правил Регистра к ледовым усилениям судов и ледоколов / Е.М. Апполонов, В.В. Платонов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — Т. 4, № 390. — С. 99 — 116.
11. Платонов В.В. Методические основы разработки расчетных зависимостей для определения ледовых нагрузок на конструкции ледовых усилений ледоколов, основанных на новой модели динамического разрушения льда / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 62/63. — С. 78 — 88.

12. Платонов В.В. Методика расчета допустимых скоростей движения судна во льдах на основе новой модели динамического разрушения льда / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин, В.С. Мороз // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 52 — 62.
13. Платонов В.В. Методические основы определения расчетных ледовых нагрузок на корпус современных судов ледового плавания в носовом и кормовом районах / В.В. Платонов, В.Н. Тряскин // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 4 (36). — С. 83 — 98.
14. Каштелян В.И. Приближенное определение усилий, разрушающих ледяной покров / В.И. Каштелян // Проблемы Арктики и Антарктики: сб. ст. — Л.: Морской транспорт, 1960. — Вып. 5. — С. 31 — 38.
15. Хейсин Д.Е. Прочность ледяного поля под действием нагрузки, приложенной к его кромке / Д.Е. Хейсин // Современные вопросы ледоколостроения: сб. ст. Л.: Морской транспорт, 1960. — С. 133 — 152. (Труды ААНИИ. Т. 237.)
16. Рылин А.Я. Испытание судов во льдах / А.Я. Рылин, Д.Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
17. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. I «Классификация» / Российский морской регистр судоходства. — СПб., 2025.
18. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна: дис. ... д-ра техн. наук. Разд. 3.2. Применение аппарата планирования эксперимента при автоматизированном проектировании конструкций корпуса судна / В.Н. Тряскин. — 2007. — С. 143 — 179.

## REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull / Russian Maritime Register of Shipping. 2024.
2. Kurdyumov V.A., Kheisin D.E. Hydrodynamic model of the impact of a solid on ice. *Soviet Applied Mechanics*. 1976. Vol. 12. № 10. P. 1063 — 1068.
3. 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. P. 776 — 787.
4. Timco G.W., Frederking R.M.W. Laboratory impact tests on freshwater ice. *Cold Region Science and Technology*. 1993. Vol. 22. P. 77 — 97.
5. 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. P. 931 — 944.
6. Ritch R, St. John J., Browne R., Sheinberg R. Ice load impact measurements on the CCGS Louis S. St. Laurent during the 1994 Arctic Ocean crossing. *Proceedings of the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. July 11 — 16, 1999, St. John's Newfoundland. Paper OMAE99/P&A-1141.
7. Appolonov E.M. Ledovaya prochnost' sudov, prednaznachennykh dlya kruglogodichnoi arkticheskoi navigatsii [Ice strength of ships designed for year-round Arctic navigation]. St. Petersburg: SPbGMTU, 2016. 288 p.
8. Appolonov E.M., Didkovskii A.V., Kuteinikov M.A., Nesterov A.B. Sovershenstvovanie metodologii opredeleniya ledovykh nagruzok [Improving the methodology for determining ice loads]. *Transactions of Russian Maritime Register of Shipping*. 2002. No. 25 P. 83 — 100.
9. Appolonov E.M., Platonov V.V., Tryaskin V.N. Improvement of RMRS ice strengthening requirements for ice class vessels and icebreakers. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2018. Vol. 3. No. 385. — P. 18 — 28. (In Russ.)
10. Appolonov E.M., Platonov V.V. New model of dynamic ice failure as basis for improvement of RS requirements to ice belts of ice-going ships and icebreakers. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2019. Vol. 4. No. 390. P. 99 — 116. (In Russ.)
11. Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodological basis for the calculation of ice loads acting on the icebreaker hull based on a new model of ice dynamic fracture. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2021. No. 62/63. P. 78 — 88. (In Russ.)
12. Platonov V.V., Tryaskin V.N., Moroz V.S. The method for determination of permissible speeds of ice-going ships based on a new model of dynamic ice destruction. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 76. P. 52 — 62. (In Russ.)
13. Platonov V.V., Tryaskin V.N. Methodological basis for determining the design ice loads on the hull of modern ice vessels in the bow and stern areas. *The Arctic: Ecology and Economics*. 2019. No. 4 (36). P. 83 — 98. (In Russ.)
14. Kашtelyan V.I. Priblizhennoe opredelenie usilii, razrushayushchikh ledyanoi pokrov [An approximate definition of the forces that destroy the ice sheet]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of the Arctic and Antarctic: collection of articles]*. Leningrad: Morskoi transport, 1960. Issue 5. P. 31 — 38.
15. Kheisin D.E. Prochnost' ledyanogo polya pod deistviem nagruzki, prilozhennoi k ego kromke [The strength of the ice field under the action of a load applied at the edge]. *Modern Issues of Icebreaking*. Leningrad: Morskoi transport, 1960. P. 133 — 152. (Transactions of the Arctic Research Institute. T. 237.)
16. Rylin A.Ya., Kheisin D.E. Ispytanie sudov vo l'dah [Ice trials of ships]. Leningrad: Sudostroenie, 1980. 208 p.
17. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part I. Classification. / Russian Maritime Register of Shipping. 2025.
18. Tryaskin V.N. Metodologiya avtomatizirovannogo proektirovaniya konstruktivnykh korpusa sudna. Razdel 3.2 [Methodology of computer-aided design of ship hull structures. Part 3.2.: DSc thesis]. St. Petersburg, 2007.