РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

Электронный аналог печатного издания, утвержденного 03.10.17

СБОРНИК

НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Книга двадцать пятая

НД № 2-139902-030

Санкт-Петербург
2017

gost.e-ecolog.ru

В настоящем Сборнике нормативно-методических материалов публикуется Методика расчета ледовых нагрузок на суда и плавучие сооружения, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС.

ISBN 978-5-89331-341-3 © Российский морской регистр судоходства, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА СУДА И ПЛАВУЧИЕ СООРУЖЕНИЯ, ФОРМА КОРПУСА КОТОРЫХ ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ РЕГЛАМЕНТИРУЕМОЙ ПРАВИЛАМИ РС

1 Введение 5
2 Методика расчета локальных ледовых нагрузок на район ледовых усилений AI для судов, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС 6
2.1 Общее описание Методики расчета локальных ледовых нагрузок на район ледовых усилений AI для судов, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС 7
2.2 Исходные данные для расчета и общие рекомендации по его выполнению 7
2.2.1 Данные судна 7
2.2.2 Данные по эксплуатационным режимам, включающие информацию по ледовым условиям, толщинам льдов и температурам эксплуатации 8
2.2.3 Методика расчета локальной ледовой нагрузки 8
3 Методика расчета прочностных характеристик ледовых образований 12
3.1 Общее описание методики расчета прочностных характеристик ледовых образований 12
3.1.1 Методика расчета распределения температуры поперек ледового покрова 12
3.1.2 Снежный покров и высота паруса торосов 13
3.1.3 Определение распределения температуры 13
3.2 Методика расчета прочностных характеристик ровного однолетнего и многолетнего льдов 15
3.2.1 Соленость 15
3.2.2 Пористость однолетнего и многолетнего льдов 16
3.2.3 Прочность на одноосное сжатие ровного однолетнего и многолетнего льдов 18
3.2.4 Прочность ледового покрова на изгиб 19
3.2.5 Прочность на смятие ровного однолетнего и многолетнего льдов . . 20
3.2.6 Методика расчета прочностных характеристик однолетних и многолетних торосистых образований 21

3.2.7 Пористость однолетних и многолетних торосистых образований. . 22
3.2.8 Прочность на смятие для однолетних и многолетних торосистых образований 22
3.2.9 Модуль Юнга и характерная длина ледового покрова 22
3.3 Примеры расчетов прочностных характеристик ледового покрова. . 23
3.3.1 Расчет прочностных характеристик ровного однолетнего ледового покрова толщиной 1,45 м (толстый однолетний лед), март, Карское море 23
3.3.2 Расчет прочностных характеристик консолидированной части многолетнего тороса толщиной 6 м, март 29
4 Методика расчета ледовых нагрузок на район ледовых усилений AI 35
4.1 Основные сценарии взаимодействия носовой и кормовой частей судов двойного действия с ледовым покровом 35
4.2 Основные расчетные формулы, подходы и последовательность расчетной процедуры для назначения параметров ледовых нагрузок на произвольно ориентированный элемент носовой или кормовой скулы 37
4.3 Уточнение методологии определения ледовых нагрузок на прямостенный борт 43
5 Примеры применения методики 48
5.1 *Пример 1.* Определение ледовой нагрузки 48
5.2 *Пример 2.* Определение расчётной схемы разрушения льда 54
5.3 *Пример 3.* Расчет параметров взаимодействия прямостенного борта со льдом 56
Список литературы 60

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая Методика позволяет определять ледовые нагрузки на суда и плавучие сооружения, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС [1]. Предлагается прямой метод определения локальных ледовых нагрузок на носовую часть ледокольных судов (район ледовых усилений AI), включая корму судов двойного действия, с целью обеспечения прочности корпуса и проверки ледовых усилений на соответствие требованиям РС.

Метод определения локальных ледовых нагрузок был верифицирован с использованием данных натурных замеров ледовых нагрузок и при помощи численных методов.

2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА РАЙОН ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ AI ДЛЯ СУДОВ, ФОРМА КОРПУСА КОТОРЫХ ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ РЕГЛАМЕНТИРУЕМОЙ ПРАВИЛАМИ РС

2.1 Общее описание методики расчета локальных ледовых нагрузок на район ледовых усилений AI для судов, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС

Методика предназначена для определения параметров локальной ледовой нагрузки на элемент корпуса носовой части (кормовой части судна двойного действия) по ледовой ватерлинии района ледовых усилений AI (ледовый пояс).

Определяются следующие параметры локальной нагрузки, необходимые для проверки прочности корпуса:

значение ледовой силы, действующей по нормали к поверхности корпуса;

размеры зоны контакта корпуса со льдом, т.е. высота и длина приложения ледовой нагрузки;

среднее ледовое давление по зоне контакта;

параметры ледовой нагрузки на элемент корпуса, соответствующий шпации (ледовая сила, среднее контактное давление);

уточненное распределение ледового давления в зоне контакта.

В качестве основного сценария для определения параметров ледового воздействия принят навал носовой (кормовой) части корпуса судна на кромку ледового поля (канала). Ледовая нагрузка определяется из условия разрушения кромки ледового покрова изгибом.

В качестве дополнительного принят сценарий взаимодействия прямостенного борта с ледовым покровом без разрушения последнего изгибом. Последний сценарий является определяющим для назначения параметров ледового воздействия на прямостенную скулу бульбообразной носовой части судов ледовых классов.

Ледовая нагрузка определяется в зависимости от скорости судна, характеристик ледового покрова (однолетний, многолетний лед; ровный ледовый покров, торос).

Результаты определения параметров локальной нагрузки могут быть непосредственно использованы для определения требуемой толщины наружной обшивки, t_{net} (см. **1.2.6**) [3].

2.2 Исходные данные для расчета и общие рекомендации по его выполнению

Для расчета локальных нагрузок на элемент скулы ледового пояса (район ледовых усилений AI) необходимы следующие группы данных:

данные судна;

данные по эксплуатационным режимам, включающие информацию по ледовым условиям, толщинам льдов и температурам эксплуатации.

2.2.1 Данные судна.

Основные размерения:

водоизмещение, т, но не менее 5000;

длина судна, м;

ширина судна, м;

высота борта, м;

расчетная (ледовая) осадка.

Параметрами расчетной точки скулы носового района ледовых усилений AI («кормового» района ледовых усилений AI для судов двойного действия) для ватерлинии, соответствующей ледовой осадке, являются относительное расстояние от форштевня, углы наклона батокса (форштевня, ахтерштевня), ватерлинии, шпангоута (см. рис. 2.2.1-1) [2].

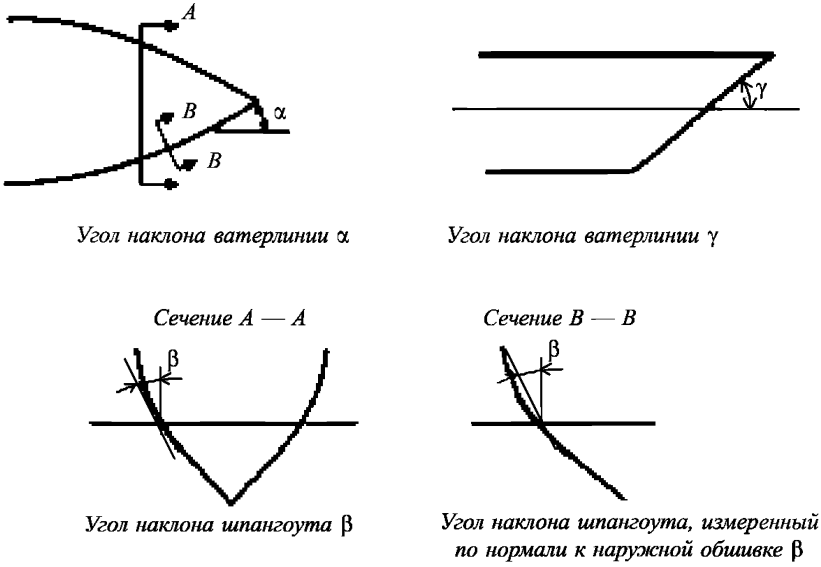


Рис. 2.2.1-1

Расчетные углы наклона борта [2]:

β' — угол наклона шпангоута, измеренный по нормали к наружной обшивке, град.;
α — угол наклона верхней ледовой ватерлинии (ВЛВЛ), град.; γ — угол наклона форштевня, град.

2.2.2 Данные по эксплуатационным режимам, включающие информацию по ледовым условиям, толщинам льдов и температурам эксплуатации:

скорость движения судна, уз.;

тип ледового покрова (тип льда) для заданного района эксплуатации судна:

однолетний;

многолетний;

распресненный однолетний (распресненный лед устьев сибирских рек: Обская губа, Енисейский залив);

торосистый однолетний;

торосистый многолетний;

толщина ровного (термического) льда для района эксплуатации, м;

температура воздуха для заданного периода и района эксплуатации, °С:

минимальная температура за 5 дней;

средняя температура за предыдущий месяц;

средняя температура за два предыдущих месяца.

2.2.3 Методика расчета локальной ледовой нагрузки.

Методика представлена ниже и состоит из двух разделов:

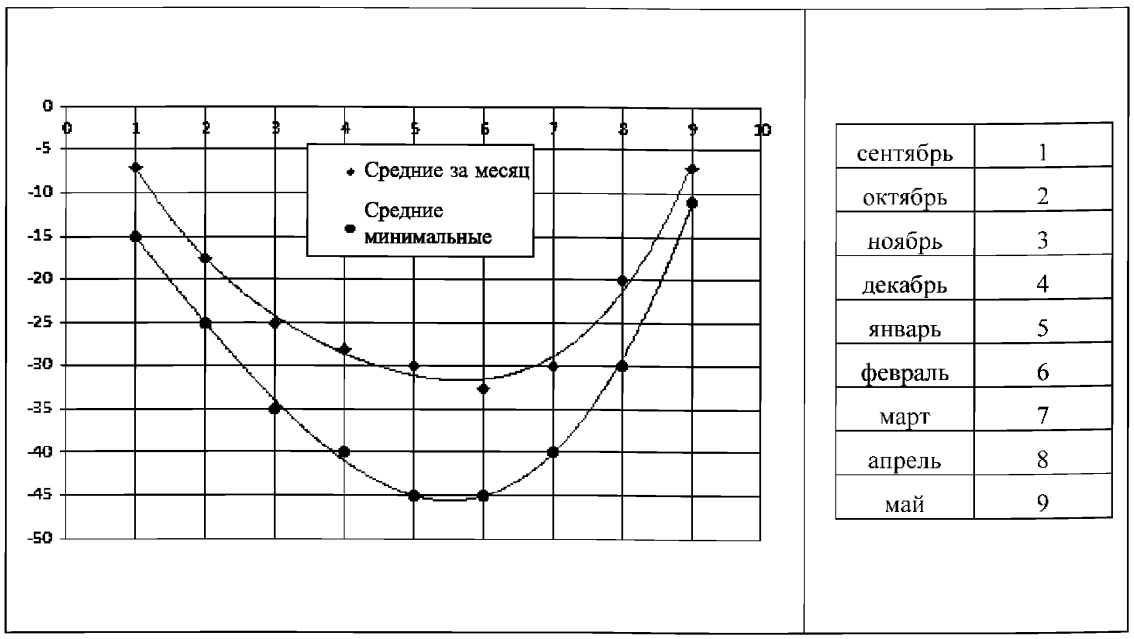
расчет прочностных характеристик ледового образования, определяющих силовое воздействие льда на корпус;

назначение ледовой нагрузки применительно к заданным параметрам эксплуатации.

Для определения ледовых нагрузок с целью верификации ледовых усилений корпуса на соответствие заданного ледового класса рекомендуется использовать параметры эксплуатационных условий, представленных в [3]. В табл. **2.2.3-1** представлены рекомендуемые расчетные параметры ледовых образований, режимы и скорости движения для назначения ледовых нагрузок в зависимости от ледового класса судна.

Для судов ледовых классов **Arc8** и **Arc9** определяющими для назначения ледовых нагрузок являются режимы самостоятельного плавания в многолетних торошенных льдах (торосах) с толщиной консолидированной части 6 м.

Для судов ледовых классов **Arc5** — **Arc9** расчетные температуры представлены на рис. **2.2.3**. Для зимне-весенней навигации в качестве расчетного месяца рекомендуется принимать февраль или март месяц, а для летне-осенней — ноябрь.



сентябрь	1
октябрь	2
ноябрь	3
декабрь	4
январь	5
февраль	6
март	7
апрель	8
май	9

Рис. 2.2.3
Расчетное распределение температур воздуха для судов ледовых классов **Arc5** – **Arc9** и арктических ледоколов

Таблица 2.2.3-1

Рекомендуемые расчетные параметры ледовых образований, режимы и скорость движения для назначения ледовых нагрузок судам ледовых классов Arc4 – Arc9

Ледовый класс	Движение в канале						Самостоятельное плавание					
	Зимне-весенняя навигация			Летне-осенняя навигация			Зимне-весенняя навигация			Летне-осенняя навигация		
	Скорость, уз.	Тип и толщина ровного льда, м	Тип торoса, толщина конс. части, м	Скорость, уз.	Тип и толщина ровного льда, м	Тип торoса, толщина конс. части, м	Скорость, уз.	Тип и толщина ровного льда, м	Тип торoса, толщина конс. части, м	Скорость, уз.	Тип и толщина ровного льда, м	Тип торoса, толщина конс. части, м
Arc4	3 – 5	FY, 0,7	FY, 1,4	3 – 5	FY, 0,9	FY, 1,8	6 – 8	FY, 0,6	FY, 1,2	6 – 8	FY, 0,8	FY, 1,6
Arc5	3 – 5	FY, 0,8	FY, 1,6	3 – 5	FY, 1,2	FY, 2,4	6 – 8	FY, 0,8	FY, 1,6	6 – 8	FY, 1,0	FY, 2,0
Arc6	3 – 5	FY, 1,2	FY, 2,4	3 – 5	FY, 1,5	FY, 3	6 – 8	FY, 1,1	FY, 2,2	6 – 8	FY, 1,3	FY, 2,6
Arc7	3 – 5	FY, 1,8	FY, 3,6	3 – 5	MY (SY) 2,8	MY, 6	6 – 8	FY, 1,4	FY, 2,8	6 – 8	FY, 1,7	FY, 3,4
Arc8	3 – 5	MY, 3,4	MY, 6	3 – 5	MY	MY, 6	10	MY (SY), 2,1	MY (SY), 6	10	MY (SY), 3,0	MY (SY), 6
Arc	3 – 5	MY	MY, 6	3 – 5	MY	MY, 6	12	MY	MY (SY), 6	12	MY	MY (SY), 6

Условные обозначения:
FY – однолетний лед; MY – многолетний лед; SY – двухлетний лед.

Для судов ледового класса **Arc4** расчетные температуры рекомендуется принимать в соответствии с табл. 2.2.3-2, которые получены для типичных районов эксплуатации (Печорское море, Белое море, средняя зимне-весенняя навигация; Карское море, летне-осенняя навигация).

Таблица 2.2.3-2

Расчетные температуры для судов ледового класса Arc4 и ледоколов ледового класса Icebreaker 6

Температура, °С	Печорское море (февраль)	Карское море (ноябрь)
Минимальная	– 35	– 30
Средняя за предыдущий месяц	– 15	– 8
Средняя за два предыдущих месяца	– 15	– 4

В случае, если для судов ледовых классов **Arc4** – **Arc9** минимальная температура выше соответствующей по спецификации, то в качестве расчетной минимальной температуры принимается последняя.

Для судов ледовых классов **Ice1** – **Ice3** рекомендуемые расчетные параметры ледовых образований, режимы и скорость движения для назначения ледовых нагрузок представлены в табл. 2.2.3-3. Для указанных судов минимальная расчетная температура определяется спецификацией. В этом случае средние температуры за предыдущий месяц и за два предыдущих месяца принимаются в два раза меньше, чем минимальная.

Для ледоколов рекомендуемые расчетные параметры ледовых образований, режимы и скорость движения для назначения ледовых нагрузок представлены в табл. 2.2.3-4.

Для ледоколов расчетная скорость определяется как $0{,}6V_0$, где V_0 – скорость на чистой воде при полной мощности (задается спецификацией). Для ледоколов ледового класса **Icebreaker 6** расчетные температуры представлены в табл. 2.2.3-2. Для ледоколов, работающих в устьях Сибирских рек, расчетная минимальная температура не должна превышать -50 °С (см. 1.2) [3]. В случае, если минимальная температура выше соответствующей по спецификации, то в качестве расчетной минимальной температуры принимается последняя.

Таблица 2.2.3-3

Рекомендуемые расчетные параметры ледовых образований, режимы и скорость движения для назначения ледовых нагрузок судам ледовых классов Ice1 — Ice3

Ледовый класс	Движение в канале (зимне-весенняя навигация)		
	Скорость, уз.	Тип и толщина ровного льда, м	Тип тороса, толщина коне. части, м
Ice 1	3	FY, 0,35	FY, 0,70
Ice 2	3	FY, 0,5	FY, 1,0
Ice 3	3	FY, 0,65	FY, 1,3

Условное обозначение:
FY. – однолетний лед.

Таблица 2.2.3-4

Рекомендуемые расчетные параметры ледовых образований, режимы и скорость движения для назначения ледовых нагрузок ледоколам ледовых классов Icebreaker 6 и Icebreaker7

Ледовый класс	Скорость	Зимне-весенняя навигация		Летне-осенняя навигация	
		Тип и толщина ровного льда, м	Тип тороса, толщина коне. части, м	Тип и толщина ровного льда, м	Тип тороса, толщина коне. части, м
Icebreaker 6	$0,6V_0$	FY, 1,5	FY, 3,0	MY.(SY.), 2,5	FY, 5
Icebreaker 7	$0,6V_0$	FY, 2; MY(SY), 2 Fresh, 2	FY, 4		
Icebreaker 8	$0,6V_0$	MY, 3	MY, 6		
Icebreaker 9	$0,6V_0$		MY, 6		

Условные обозначения:
V_0 – скорость на чистой воде при полной мощности;
FY. – однолетний лед;
Fresh – распресненный лед в устьях Сибирских рек;
MY. – многолетний лед;
SY. – двухлетний лед.

3 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

3.1 ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

В зависимости от типа льда (однолетний, многолетний, распресненный однолетний для устьев Сибирских рек: Обская губа, Енисейский залив) и температуры окружающего воздуха и ее предыдущего тренда (значения температур за два предыдущих месяца) определяются значения следующих величин:

прочности льда на одноосное сжатие поперек ровного ледового покрова и консолидированной части торосистого образования;

значения прочности льда на изгиб;

модуля Юнга;

характерной длины ледового покрова;

распределений температуры, солености и пористости ледяного покрова.

Важнейшим элементом методики является определение прочности льда на смятие или контактного ледового давления. Прочность льда на смятие (контактное ледовое давление) определяется на основе гидродинамической модели вытеснения ледового порошка при взаимодействии кромки ледового поля с элементом корпуса судна, предложенной Д.Е. Хейсиным и В.А. Курдюмовым [4]. В последние годы указанный подход был усовершенствован и использован при определении ледовых нагрузок, воздействующих на борт судна, гребные винты (Е.М. Апполонов, H. Soininen, А.В. Андрюшин [5], [6], [7]).

Значение прочности льда на смятие определяется в функции от прочности на одноосное сжатие.

Такой подход позволяет определять прочностные характеристики ледового покрова и параметры ледовой нагрузки в зависимости от типа льда, его толщины, периода эксплуатации (типа навигации) и соответственно от ледового класса судна.

3.1.1 Методика расчета распределения температуры поперек ледового покрова.

Распределение температуры поперек ледового покрова имеет решающее значение для определения прочностных характеристик льда.

3.1.2 Снежный покров н высота паруса торосов.

Для определения распределения температуры поперек ровного льда и консолидированной части торосов необходимо учитывать снежный покров. Для ровного льда рекомендуется принимать толщину снежного покрова:

$$h_{snow} \cong 0{,}2 \text{ м при } h_{ice} \geqslant 1{,}4 \text{ м;}$$
$$h_{snow} \cong 0{,}14 \text{ м при } h_{ice} \leqslant 1{,}4 \text{ м,} \tag{3.1}$$

где h_{ice} — толщина ровного (термического) льда.

Для торосистого льда толщина снежного покрова может быть определена по формуле

$$h_{snow} = 0{,}11 H_{sail}, \tag{3.2}$$

где H_{sail} — высота паруса тороса.

Высота паруса H_{sail}.

$$H_{sail} = b h_{ice}^{a}, \tag{3.3}$$

рекомендуется $a = 0{,}5$; $b = 3{,}71$.

Для оценки высоты паруса однолетних торосов в качестве h_{ice} может быть использована толщина ровного (термического) льда. Для многолетних арктических торосов $h_{ice} \cong 1{,}8$ м.

3.1.3 Определение распределения температуры.

Распределение температуры по толщине ледового покрова (консолидированной части тороса) определяется изменением среднемесячных и минимальных температур окружающего воздуха и, в общем случае, не является линейным по толщине ледового покрова (ледового образования). Для определения распределения температуры рекомендуется использовать положения методики, разработанной в [8].

Приведенная толщина эквивалентного ледового (снежно-ледового) покрова определяется по формуле

$$(h_{ice})_{eq} = h_{ice} + 5 h_{snow}. \tag{3.4}$$

Температура $T_{\min}$ на верхней границе снежно-ледового покрова $(\xi_{ice} = 0)$ определяется как минимальная температура воздуха за последние 5 дней (см. табл. 2.2.3-2 и рис. 2.2.3).

Температура в середине приведенной толщины льда для $\bar{\xi}_{ice}= 0,5$ определяется по формуле

$$T(\bar{\xi}_{ice}= 0,5) = (T_{averadge} + 0,5T_o)/2 \cong 0,5T_{averadge}, \quad (3.5)$$

где $\bar{\xi}_{ice}=\frac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}}$ — нормированное расстояние от поверхности снежно-ледового покрова;

ξ_{ice} — расстояние от поверхности снежно-ледового покрова, $0 \leqslant \xi_{ice} \leqslant (h_{ice})_{eq}$;

$\bar{\xi}_{ice}= 0$ — верхняя граница снежно-ледового покрова, $\bar{\xi}_{ice}= 1$ — нижняя граница;

$T_{averadge}$ — среднемесячная температура воздуха за предыдущий месяц для льда термического нарастания, для слоеных льдов и консолидированной части торосов среднемесячная температура принимается за предыдущие два месяца (см. табл. 2.2.3 3 и рис. 2.2.3);

T_o — температура замерзания воды, (– 1 °С).

При $abc(0,5T_{averadge}) < abs((T_{\min}+T_0)/2)$ распределение температуры с необходимой точностью описывается гиперболой

$$T(\bar{\xi}_{ice}) = d + b(\bar{\xi}_{ice}) + a(\bar{\xi}^2_{ice}) + c(\bar{\xi}^{\frac{1}{2}}_{ice});$$

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 1) = T_0,\ T(\bar{\xi}_{ice} = 0,5) \cong 0,5T_{averadge},\ T(\bar{\xi}_{ice} = 0,5) = T_{\min} \quad (3.6)$$

где $\bar{\xi}_{ice}= \frac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}}$, $0 \leqslant \xi_{ice} \leqslant 1$;

$T(\bar{\xi}_{ice} = 0,75) = 0,4(0,5T_{averadge} + (-1))$ — вспомогательная точка для построения гиперболы.

При $abc(0,5T_{averadge}) \geqslant abs((T_{\min}+T_0)/2)$ для распределения температуры рекомендуется использовать параболу

$$T(\bar{\xi}_{ice}) = d + b(\bar{\xi}_{ice}) + a(\bar{\xi}^2_{ice});$$

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 1) = T_0 \quad (3.7)$$

Коэффициенты для уравнений (3.6) и (3.7) определяются при помощи стандартных средств Excel как уравнение к линии тренда диаграммы.

3.2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РОВНОГО ОДНОЛЕТНЕГО И МНОГОЛЕТНЕГО ЛЬДОВ

3.2.1 Соленость.

3.2.1.1 Средняя соленость однолетнего морского льда.

Средняя соленость однолетнего морского льда по его толщине, $^0/_{00}$, определяется по формуле

$$(S_I^{FY})_{averadge} = 4{,}606 + \frac{91{,}603}{h_{ice}}, \qquad (3.8)$$

где $h_{ice} \leqslant 2{,}0$ м — толщина ровного (термического) однолетнего льда, см.

3.2.1.2 Распределение солености для однолетнего морского льда в зимне-весеннюю навигацию.

Распределение солености, $^0/_{00}$, поперек ледового покрова для однолетнего морского льда в зимне-весеннюю навигацию определяется по формуле

$$\frac{S_I^{FY}}{(S_I^{FY})_{averadge}} = -0{,}2239(\bar{\xi}_{ice})^4 + 3{,}1592(\bar{\xi}_{ice})^3 - 1{,}6035(\bar{\xi}_{ice})^2 - 1{,}3336\bar{\xi}_{ice} + 1{,}45, \qquad (3.9)$$

где $\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$ — нормированное расстояние от поверхности снежно-ледового покрова;

$0 \leqslant \xi_{ice} \leqslant 1$ — нормированное расстояние от поверхности льда;

ξ_{ice} — расстояние от поверхности льда;

при этом $\xi_{ice} = 0 (\bar{\xi}_{ice} = 10$ — поверхность льда, $\bar{\xi}_{ice} = 1 (\xi_{ice} = h_{ice})$;

h_{ice} — толщина льда;

$(S_I^{FY})_{averadge}$ — средняя соленость по толщине ледового покрова (см. формулу (3.8)).

3.2.1.3 Распределение солености для однолетнего морского льда в летне-осеннюю навигацию.

Распределение солености, $^0/_{00}$, поперек ледового покрова для однолетнего морского льда в летне-осеннюю навигацию определяется по формуле

$$\frac{S_I^{FY}}{(S_I^{FY})_{averadge}} = 10{,}146(\bar{\xi}_{ice})^3 - 14{,}105(\bar{\xi}_{ice})^2 + 5{,}44\bar{\xi}_{ice} + 0{,}42, \qquad (3.10)$$

где $(S_I^{FY})_{averadge}$ — средняя соленость по толщине ледового покрова (см. формулу (3.8));

$\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$, $0 \leqslant \xi_{ice} \leqslant 1$ — нормированное расстояние от поверхности льда.

3.2.1.4 Средняя соленость многолетнего морского льда.

Средняя соленость многолетнего морского льда по его толщине, $^0/_{00}$, определяется по формуле

$$(S_I^{FY})_{averadge} = 1{,}8 + \frac{99810{,}5}{h_{ice}}, \qquad (3.11)$$

где $h_{ice} \geqslant 2{,}0$ м — толщина ровного многолетнего льда.

3.2.1.5 Распределение солености для многолетнего морского льда в зимне-весеннюю и летне-осеннюю навигации.

Распределение солености, $^0/_{00}$, по толщине многолетнего льда определяется по формуле

$$\frac{S_I^{FY}}{(S_I^{FY})_{averadge}} = -0{,}5244(\bar{\xi}_{ice})^2 + 1{,}835\bar{\xi}_{ice} + 0{,}262, \qquad (3.12)$$

где $(S_I^{FY})_{averadge}$ — средняя соленость по толщине ледового покрова (см. формулу (3.11));

$\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$ — нормированное расстояние от поверхности льда, $0 \leqslant \xi_{ice} \leqslant 1$.

3.2.1.6 Распределение солености для распресненного льда в устьях Сибирских рек.

Отличительной особенностью устьев сибирских рек (Обская губа, Енисейский залив) является пониженная соленость воды и льда. Распределение солености, $^0/_{00}$, определяется по формуле

$$\frac{S_I^{fresh}}{(S_I^{fresh})_{averadge}} = 11{,}144(\bar{\xi}_{ice})^3 - 22{,}348(\bar{\xi}_{ice})^2 + 11{,}13\bar{\xi}_{ice} + 0{,}1223, \qquad (3.13)$$

где $(S_I^{fresh})_{averadge} \cong 1\,^0/_{00}$ — средняя соленость по толщине ледового покрова;

$\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$ — нормированное расстояние от поверхности льда, $0 \leqslant \xi_{ice} \leqslant 1$.

3.2.2 Пористость однолетнего и многолетнего льдов.

Прочностные характеристики ледового покрова определяются суммарной пористостью льда (объемом жидкой и газовой фаз).

Относительная суммарная пористость льда:

$$v = v_a + v_b, \qquad (3.14)$$

где v_a — относительный объем газовой фазы;
v_b — относительный объем жидкой фазы.

3.2.2.1 Относительный объем жидкой фазы.

Относительный объем жидкой фазы определяется по формуле

$$v_b = (\rho S_i)/F_1/(T), \tag{3.15}$$

где ρ = 0,92 — плотность льда, т/м^3;
S_i — соленость льда, $^0/_{00}$;
$F_1/(T)$ — функция от температуры T, °С.

Для температуры $0 \geqslant T \geqslant -2$, °С.

$$F_1/(T) = -4{,}1221\cdot10^{-2} - 1{,}8407\cdot10\cdot T + 5{,}8402\cdot10^{-1}\cdot T^2 + 2{,}1454\cdot10^{-1}\cdot T^3. \tag{3.16}$$

Для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$ °С.

$$F_1/(T) = -4{,}732 - (2{,}245\cdot10)\cdot T - (6{,}397\cdot10^{-1})\cdot T^2 - (1{,}074\cdot10^{-2})\cdot T^3. \tag{3.17}$$

Для температуры $-22{,}9 \geqslant T \geqslant -30$, °С.

$$F_1/(T) = (9{,}899\cdot10^3) + (1{,}309\cdot10^3)\cdot T + (5{,}527\cdot10)\cdot T^2 + (7{,}160\cdot10^{-1})\cdot T^3. \tag{3.18}$$

3.2.2.2 Относительный объем газовой фазы.

$$v_a = \rho S_i\left(F_2(T)/F_1(T)\right), \tag{3.19}$$

где ρ = 0,92 — плотность льда, т/м^3;
ρ_i — плотность чистого льда;
S_i — соленость льда, $^0/_{00}$;
$F_2/(T)$ — функция от температуры T, °С.

Для температуры $0 \geqslant T \geqslant -2$, °С.

$$F_2/(T) = 9{,}0312\cdot10^{-2} - (1{,}6111\cdot10^{-2})\cdot T + (1{,}2291\cdot10^{-4})\cdot T^2 + (1{,}3603\cdot10^{-4})\cdot T^3. \tag{3.20}$$

Для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$ °С.

$$F_2/(T) = 8{,}903\cdot10^{-2} - (1{,}763\cdot10^{-2})\cdot T - (5{,}330\cdot10^{-4})\cdot T^2 - (8{,}801\cdot10^{-6})\cdot T^3. \tag{3.21}$$

Для температуры $-22{,}9 \geqslant T \geqslant -30$, °С.

$$F_2/(T) = 8{,}547 + (1{,}089)\cdot T + (4{,}518\cdot10^{-2})\cdot T^2 + (5{,}819\cdot10^{-4})\cdot T^3. \tag{3.22}$$

3.2.3 Прочность на одноосное сжатие ровного однолетнего и многолетнего льдов.

3.2.3.1 Однолетний ледовый покров.

Максимальные значения прочности однолетнего льда на одноосное сжатие при вертикальном нагружении $(\sigma_{compr})_V$, МПа (см. рис. 3.2.3.1-1), определяются по формуле

$$(\sigma_{compr}^{FV})_V = 17{,}5\exp(-0{,}007v), \tag{3.23}$$

где v — суммарная пористость льда, $^0/_{00}$.

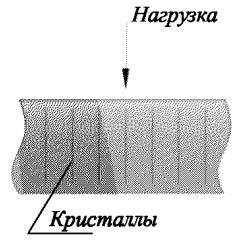


Рис. 3.2.3.1 1
Схема вертикального нагружения однолетнего льда

Максимальные значения прочности однолетнего льда на одноосное сжатие при горизонтальном нагружении $(\sigma_{compr}^{FY})_H$, МПа (см. рис. 3.2.3.1-2), определяются по формуле

$$(\sigma_{compr}^{FY})_H = 10{,}1\exp(-0{,}008v) \tag{3.24}$$

где v — суммарная пористость льда, $^0/_{00}$.

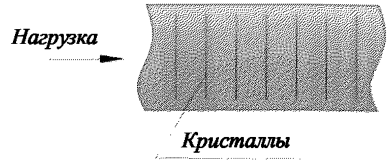


Рис. 3.2.3.1-2
Схема горизонтального нагружения однолетнего льда

Прочность однолетнего льда на одноосное сжатие при косом нагружении определяется в зависимости от угла приложения нагрузки γ^0 (угол между вектором нагрузки и вектором горизонтального нагружения однолетнего льда, при горизонтальном нагружении γ^0= 0,0 град, при вертикальном нагружении γ^0= 90,0 град) (см. рис. 3.2.3.1-3).

$$(\sigma_{compr}^{FY})_{mix} = \left(\frac{(\sigma_{compr}^{FY})_V - (\sigma_{compr}^{FY})_H}{90}\right)\cdot\gamma^0 + (\sigma_{compr}^{FY})_H; \quad (3.25)$$

$$\gamma^0 = 90 - \beta',$$

где γ^0 — угол нагрузки на ледовое поле (угол между вектором нагрузки и вектором горизонтального нагружения), град. Угол нагрузки равен углу наклона (развала) шпангоута в плоскости, перпендикулярной ватерлинии.

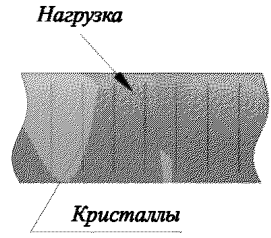


Рис. 3.2.3.1-3
Схема косого нагружения однолетнего льда

3.2.3.2 Многолетний ледовый покров.

Многолетний лед является практически анизотропным, поэтому его прочность для вертикального и горизонтального нагружений принимается одинаковой. Прочность многолетнего льда на одноосное сжатие, МПа, определяется по формуле

$$(\sigma_{compr}^{FY}) = \exp(-0{,}6593\cdot\ln(\nu + 25) + 4{,}838), \quad (3.26)$$

где ν — суммарная пористость льда, $^0/_{00}$.

3.2.4 Прочность ледового покрова на изгиб.

Расчетная прочность однолетнего и многолетнего ледового покровов на изгиб, МПа, определяется по формуле

$$(\sigma_{bend})_{FY,\ MY} = 1{,}76\exp(-5{,}88\cdot\nu_b^{0,5}). \quad (3.27)$$

Расчетное значение прочности ледового покрова на изгиб определяется

для $\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{h_{ice}} = 0{,}1.$

Значение относительного объема жидкой фазы V_b определяется согласно 3.3.2.1 для средней солености по толщине ледового покрова и температуры на уровне

$$\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}} = 0{,}1.$$

3.2.5 Прочность на смятие ровного однолетнего и многолетнего льдов.

Прочность льда на смятие (контактное ледовое давление) определяется на основе гидродинамической теории вытеснения ледового порошка при взаимодействии борта судна с ледовым покровом. Сценарий взаимодействия для наклонного и прямостенного борта представлены на рис. 3.2.5-1 и 3.2.5-2.

Прочность льда на смятие σ_{crush} или среднее значение локального контактного ледового давления ρ_0 определяется по формуле

$$\rho_0 = \sigma_{crush} = 2{,}4\sigma^{0,6}_{compr}, \qquad (3.28)$$

где σ_{compr} — прочность льда на одноосное сжатие, для многолетнего льда $\left(\sigma^{MY}_{compr}\right)$, для однолетнего льда $\left(\sigma^{FY}_{compr}\right)_{mix}$.

В качестве расчетных для назначения прочных размеров корпуса принимаются средние значения давления $p_0(b)$ по высоте зоны контакта b обшивки с ледовым покровом (см. рис. 3.2.5-1 и 3.2.5-2).

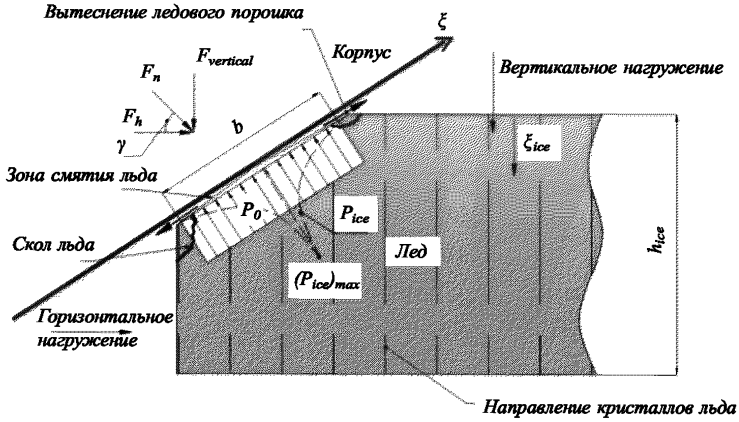


Рис. 3.2.5-1
Базовый сценарии взаимодействия наклонного борта с ледовым покровом

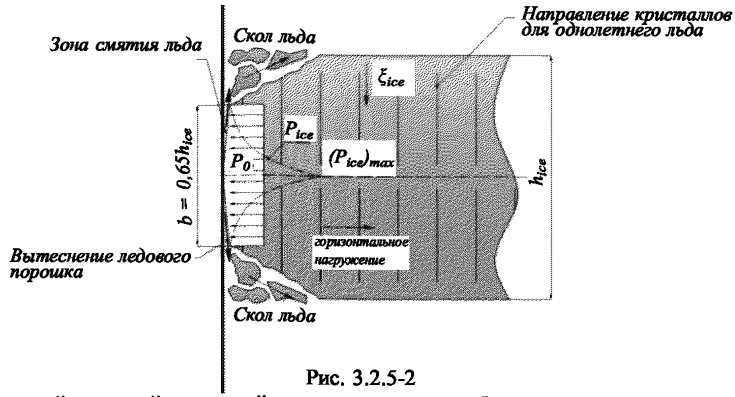


Рис. 3.2.5-2
Базовый сценарий взаимодействия прямостенного борта с ледовым покровом

$$p_0(b) = \frac{1}{b}\int p_0(\xi)d\xi, \tag{3.29}$$

где b — протяженность (высота) зоны контакта обшивки с ледовым покровом вдоль ξ.

Давление p_0 необходимо рассматривать как локальное давление, соответствующее площади контакта $S \cong (0{,}1-0{,}15)\text{м}^2$.

3.2.6 Методика расчета прочностных характеристик однолетних и многолетних торосистых образований.

3.2.6.1 Толщина консолидированной части торосистого образования.

Оценка толщины консолидированной части однолетнего тороса h_{cons}^{FY} определяется по формуле

$$h_{cons}^{FY} = 2h_{ice}, \tag{3.30}$$

где h_{ice} — толщина термического льда.

Для многолетнего тороса расчетное значение толщины консолидированной части принимается равным

$$\begin{aligned}(h_{cons}^{MY})_{averadg} &= 4 \text{ м};\\ (h_{cons}^{MY})_{\max} &= 6 \text{ м}.\end{aligned} \tag{3.31}$$

3.2.6.2 Соленость однолетних и многолетних торосистых образований.

Для консолидированной части однолетнего тороса распределение солености принимается равномерным, значение солености равно средней солености для ровного ледового покрова при толщине h_{ice} (см. 3.2.1).

Для многолетних торосов распределение солености поперек консолидированной части аналогично распределению солености для многолетнего льда (см. 3.2.1).

3.2.7 Пористость однолетних и многолетних торосистых образований.

Пористость определяется согласно 3.2.2.

3.2.7.1 Прочность на одноосное сжатие однолетних и многолетних торосистых образований.

Для консолидированной части многолетнего и однолетнего торосов прочность льда на одноосное сжатие, МПа, для вертикального $(\sigma^{FY}_{compr})_{cons,\,V}$ и горизонтального $(\sigma^{FY}_{compr})_{cons,\,H}$ нагружений определяется по следующим формулам:

$$(\sigma^{FY}_{compr})_{cons,\,V} = 0{,}8(\sigma^{FY}_{compr})_{V} = 14\exp(-0{,}007\nu); \tag{3.32}$$

$$(\sigma^{FY}_{compr})_{cons,\,H} = 0{,}8(\sigma^{FY}_{compr})_{cons,\,V} = 12{,}6\exp(-0{,}007\nu), \tag{3.33}$$

где ν — суммарная пористость льда, $^0/_{00}$.

3.2.8 Прочность на смятие для однолетних и многолетних торосистых образований.

Для торосистых образований прочность льда на смятие определяется согласно 3.2.5.

3.2.9 Модуль Юнга и характерная длина ледового покрова.

3.2.9.1 Модуль Юнга.

Расчетное значение модуля Юнга $E = E(\nu_b)$, кг/м^2, определяется для 10 % заглубления от поверхности льда и средней по толщине льда солености по формуле

$$E = 10^8 \cdot 8{,}1663\exp(-0{,}21\nu_b^{0{,}5}), \tag{3.34}$$

где ν_b — относительный объем жидкой фазы, $^0/_{00}$;

расчетная температура принимается для $\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{h_{ice}} = 0{,}1$.

3.2.9.2 Характерная длина ледового покрова.

Характерная длина ледового покрова определяется по формуле

$$L_{typical} = \left[\frac{Eh^3_{ice}}{12\gamma(1-\nu^2)}\right]^{1/4}, \tag{3.35}$$

где $\nu \cong 0{,}35$ — коэффициент Пуассона;

$\gamma \cong 1040$ — удельный вес воды, кг/м^3.

Величина $L_{typlcal}$ характеризует распространение напряженного состояния ледового покрова под действием статической нагрузки. Расчетное значение $L_{typical}$ определяется для 10 % заглубления от поверхности льда и средней по толщине ледового покрова солености.

Расчетная температура принимается для $\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{h_{ice}} = 0{,}1$.

3.3 ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

3.3.1 Расчет прочностных характеристик ровного однолетнего ледового покрова толщиной 1,45 м (толстый однолетний лед), март, Карское море [9].

3.3.1.1 Распределение температуры.

Исходные данные:

толщина льда — 1,45 м;

толщина снега — 0,2 м.

Приведенная толщина эквивалентного ледового покрова (см. формулу (3.4))

$$(h_{ice})_{eq} = h_{ice} + 5h_{snow} = 2{,}45 \text{ (снежно-ледовый покров).} \qquad (3.36)$$

Минимальная температура воздуха и на поверхности эквивалентного ледового покрова (на поверхности снега)

$$T_{\min} = (-40) = T\left(\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}} = 0\right) = -40, \text{ °C (см. рис. 2.2.3).} \qquad (3.37)$$

Среднемесячная температура воздуха за предыдущий месяц для льда термического нарастания

$$T_{averadge} = -32{,}5, \text{ °C (см. рис. 2.2.3).} \qquad (3.38)$$

Температура в середине приведенной толщины льда (см. формулу (3.5))

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 0{,}5) = (T_{averadge} + 0{,}5T_0)/2 \cong 0{,}5T_{averadge} = -16{,}25, \text{ °C}. \qquad (3.39)$$

Температура на нижней поверхности льда (см. формулу (3.6))

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 1) = -1, \text{ °C}. \qquad (3.40)$$

Температура во вспомогательной точке

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 0{,}75) = 0{,}4(T_{averadge} + (-1)) = -6{,}9,\ ^{\circ}\text{C}. \tag{3.41}$$

Распределение температуры поперек снежно-ледового покрова определяется численно при помощи стандартных средств Excel как уравнение к линии тренда диаграммы.

Поперек эквивалентного ледового покрова с толщиной $(h_{ice})_{eq} = h_{ice} + 5h_{snow} = 2{,}45$ м:

$$T(\bar{\xi}_{ice}) = -(14{,}133\bar{\xi}^3_{ice} - 4{,}2\bar{\xi}^2_{ice} - 48{,}933\bar{\xi}^3_{ice} + 40), \tag{3.42}$$

при этом $\left(\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}}\right) = [0,1]$,

где $\xi_{ice} = 0$ — поверхность льда;

$\xi_{ice} = 1$ — нижняя граница льда.

Распределение температуры поперек ледового покрова толщиной 1,45 м имеет вид

$$T(\bar{\xi}_{ice}) = -0{,}657\bar{\xi}^3_{ice} - 8{,}7865\bar{\xi}^3_{ice} + 29{,}09\bar{\xi}_{ice} - 20{,}628, \tag{3.43}$$

при этом $\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}} = [0,1]$, $\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{h_{ice} = 1{,}45}$,

где $\xi_{ice} = 0$ — поверхность льда;

$\xi_{ice} = 1$ — нижняя граница льда.

3.3.1.2 Распределение солености.

Средняя соленость, $^0/_{00}$, определяется по формуле (3.8).

$$(S_I^{FY})_{averadge} = 4{,}606 + \frac{91{,}603}{h_{iee}} = 5{,}23. \tag{3.44}$$

3.3.1.3 Прочностные характеристики.

Подробные результаты расчетов прочностных характеристик льда приведены в табл. 3.3.1-1 — 3.3.1-3. Как указывалось выше, расчетные значения статического модуля Юнга, характерной длины ледового покрова $L_{typieal}$ и прочности на изгиб ледового покрова определяются для 10 % заглубления от поверхности льда и средней по толщине льда солености, что обеспечивает наилучшее согласование расчетных значений с результатами натурных измерений.

Таблица 3.3.1-1

Расчет прочностных характеристик поперек ледового покрова. Март. Карское море. Толстый однолетний лед. Толщина льда — 1,45 м. Толщина снега — 0,2 м

Расстояние от верхней поверхности льда, м	Нормированное расстояние от верхней поверхности льда $\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$	Температура, °С (см. формулу (3.47))	Соленость, ‰ (см. формулу (3.9))	Фуикция F1 (см. формулы (3.16) и (3.17))	Отн. объем жидкой фазы ν_b, ‰ (см. формулу (3.15))	Фуикция F2 (см. формулы (3.20) и (3.21))	Отн. объем газовой фазы, ν_a, ‰ (см. формулу (3.19))	Суммарная пористоть, ‰ $\nu = \nu_a + \nu_b$ (см. формулу (3.14))	Макс. прочность на сжатие горизонт. нагруженне, МПа (см. формулу (3.34)) (прямой борт)	Макс. прочность на сжатие верт. нагружение, МПа (см. формулу (3.33))	Макс. прочность на сжатие косое нагружение, МПа (наклонный борт) (см. формулу (3.35))	Средная прочноть на емятие для косого нагружения (наклонный борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))	Средная прочноть на емятие для горизонтального нагружения (прямой борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))
0	0	-20,628	7,5835	280,43551	24,87852	0,303153	7,542006	32,42052	7,809548	13,9469	12,86563	11,11399	8,237336
-0,145	0,1	-17,8075	6,81857	252,84074	24,81042	0,283657	7,037637	31,84805	7,845396	14,0029	12,91808	11,12759	8,24869
-0,29	0,2	-15,1667	5,98341	226,08064	24,34855	0,264518	6,440641	30,7892	7,912135	14,10708	13,01566	11,14697	8,264862
-0,435	0,3	-12,7095	5,17294	199,31396	23,87743	0,245071	5,851659	29,72909	7,979523	14,21215	13,11409	11,17028	8,284322
-0,58	0,4	-10,4399	4,47927	172,14236	23,93907	0,225007	5,386463	29,32554	8,005325	14,25235	13,15176	11,19071	8,301379
-0,725	0,5	-8,36175	3,991699	144,54127	25,40702	0,204326	5,191325	30,59835	7,924225	14,12593	13,03332	11,19879	8,308138
-0,87	0,6	-6,47905	3,796717	116,79037	29,90812	0,183275	5,481411	35,38953	7,626241	13,66003	12,59701	11,18023	8,292655
-1,015	0,7	-4,79574	3,978002	89,404355	40,93494	0,162291	6,643374	47,57831	6,91771	12,54287	11,55184	11,11109	8,235133
-1,16	0,8	-3,31574	4,616421	63,065004	67,34492	0,141948	9,559444	76,90437	5,471082	10,21513	9,379332	10,948	8,100302
-1,305	0,9	-2,04302	5,790034	38,55528	138,1609	0,122899	16,9798	155,1407	2,925853	5,907461	5,382165	10,60837	7,823824
-1,45	1	-0,9815	7,574086	17,665491	394,4504	0,106115[1]	41,85699	436,3074	0,308588	0,825348	0,734306	9,976662	7,329234

Таблица 3.3.1-2

Расчет прочностных характеристик поперек ледового покрова. Март. Карское море. Толстый однолетний лед. Толщина льда — 1,45 м. Толщина снега — 0,2 м. Нормированное расстояние от поверхности льда — 0,5

1	Расстояние от верхней поверхности льда, м		0,725
2	Нормированное расстояние от верхней поверхности льда	$\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$	0,5
3	Температура, °С.	Формула (3.47) $T(\bar{\xi}_{ice}) = -0{,}657\bar{\xi}_{ice}^3 - 8{,}7865\bar{\xi}_{ice}^2 + 29{,}09\bar{\xi}_{ice} - 20{,}628$	−8,362
4	Соленость, ‰	Формула (3.9) $\frac{S_I^{FY}}{(S_I^{FY})_{averadge}} = -0{,}2239(\bar{\xi}_{ice})^4 + 3{,}1592(\bar{\xi}_{ice})^3 - 1{,}6035(\bar{\xi}_{ice})^2 - 1{,}3336\bar{\xi}_{ice} + 1{,}45,$ где средняя соленость, ‰, определяется по формуле (3.8) $(S_I^{FY})_{averadge} = 4{,}606 + \frac{91{,}603}{h_{ice}} = 5{,}23$	3,992
5	Функция F1 (см. формулы (3.16) и (3.17))	Формула (3.17) для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$, °С $F_1/(T) = -4{,}732 - (2{,}245 \cdot 10) \cdot T - (6{,}397 \cdot 10^{-1}) \cdot T^2 - (1{,}074 \cdot 10^{-2}) \cdot T^3$	144,541
6	Отн. объем жидкой фазы v_b, ‰ (см. формулу (3.15))	$v_b = (\rho S_i)/F_1/(T)$, где $\rho \cong 0{,}92 Mg/m^3 (g/cm^3)$ — плотность льда, Мг/м^3; S_i — соленость льда, ‰.	25,407
7	Функция F2, (см. формулы (3.20) и (3.21))	Формула (3.21) для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$, °С $F_2/(T) = 8{,}903 \cdot 10^{-2} - (1{,}763 \cdot 10^{-2}) \cdot T - (5{,}330 \cdot 10^{-4}) \cdot T^2 - (8{,}801 \cdot 10^{-6}) \cdot T^3$	0,204
8	Отн. объем газовой фазы, v_a, ‰ (см. формулу (3.19))	$v_a = \rho S_i \left(F_2(T)/F_1(T)\right)$	5,191
9	Суммарная пористость, ‰ (см. формулу (3.15))	$v = v_a + v_b = 5{,}191 + 25{,}407 = 30{,}598$	30,598
10	Макс. прочность на сжатие, гориз. нагружение, МПа (см. формулу (3.34)), (прямой борт)	$\left(\sigma_{compr}^{FY}\right)_H = 10{,}1 \exp(-0{,}008v)$, где v — суммарная пористость льда, ‰	7,924

Продолжение табл. 3.3.1-2

11	Макс. прочность на сжатие верт. нагружение, МПа (см. формулу (3.33))	$\left(\sigma_{compr}^{FY}\right)_Y = 17{,}5\exp(-0{,}007\nu)$, где ν — суммарная пористость льда, ‰	14,126
12	Макс. прочность на сжатие косое нагружение, МПа (наклонный борт) (см. формулу (3.35))	$(\sigma_{compr}^{FY})_{mix} = \left(\frac{(\sigma_{compr}^{FY})_V - (\sigma_{compr}^{FY})_H}{90}\right)\cdot\gamma^0 + (\sigma_{compr}^{FY})_H$	13,033
13	Средняя прочность на смятие для косого нагружения (наклонный борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))	$\rho_0 = \overline{\sigma}_{crush} = 2{,}4\sigma_{compr}^{0,6}(\bar{\xi}_{ice})$; $\sigma_{comr} = {}^{def}(\sigma_{compr}^{FY})_H$ $p_0(\bar{\xi}_{ice}) = \frac{1}{\bar{\xi}_{ice}}\int p_0(\bar{\xi}_{ice})d\bar{\xi}_{ice}$	11,199
14	Средняя прочность на смятие для горизонтального нагружения (прямой борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))	$\rho_0 = \overline{\sigma}_{crush} = 2{,}4\sigma_{compr}^{0,6}(\bar{\xi}_{ice})$; $\sigma_{comr} = {}^{def}(\sigma_{compr}^{FY})_H$ $p_0(\bar{\xi}_{ice}) = \frac{1}{\bar{\xi}_{ice}}\int p_0(\bar{\xi}_{ice})d\bar{\xi}_{ice}$	8,308

Таблица 3.3.1-3

Модуль Юнга, прочность льда на изгиб, характерная длина ледового покрова (10 % заглубления от поверхности), т.е. 0,1

1	Расстояние от верхней поверхности льда, м		0,145
2	Нормированное расстояние от верхней поверхности льда	$\bar{\xi}_{ice} = \dfrac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$	0,1
3	Температура, °С. (см. табл. 3.3.1-1)	Формула (3.47) $T(\bar{\xi}_{ice}) = -0{,}657\bar{\xi}^3_{ice} - 8{,}7865\bar{\xi}^2_{ice} + 29{,}09\bar{\xi}_{ice} - 20{,}628$	– 17,8
4	Соленость, ‰	Средняя соленость, ‰, определяется по формуле (3.8) $(S_I^{FY})_{averadge} = 4{,}606 + \dfrac{91{,}603}{h_{ice}} = 5{,}23$	5,23
5	Функция F1 (см. формулы (3.16) и (3.17))	Формула (3.17) для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$, °С $F_1/(T) = -4{,}732 - (2{,}245 \cdot 10) \cdot T - (6{,}397 \cdot 10^{-1}) \cdot T^2 - -(1{,}074 \cdot 10^{-2}) \cdot T^3$	262,82
6	Отн. объем жидкой фазы v_b, ‰ (см. формулу (3.15))	$v_b = (\rho S_i)/F_1/(T)$, где $\rho \cong 0{,}92 Mg/m^3 (g/cm^3)$ — плотность льда, Мг/м^3; S_i — соленость льда, ‰.	19,03
7	Прочность льда на изгиб, МПа (см. формулу (3.37))	$(\sigma_{bend})_{FY,\ MY} = 1{,}76\exp(-5{,}88 v_b^{0,5})$ $v_b = 0{,}01903$	0,780
8	Модуль Юнга, кг/м^2 (см. формулу (3.44))	$E = 1{,}0^8 \cdot 8{,}1663\exp(-0{,}21 v_b^{0,5})$ $v_b = 19{,}03‰$	$3{,}3 \cdot 10^8$
9	Характерная длина ледового покрова, м (см. формулу (3.45))	$L_{typical} = \left[\dfrac{E h_{ice}^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{1/4}$, где $V \cong 0{,}35$ — коэффициент Пуассона; $\gamma \cong 920$ кг/м^3 — удельный вес воды.	17,43

3.3.2 Расчет прочностных характеристик консолидированной части многолетнего тороса толщиной 6 м, март.

3.3.2.1 Распределение температуры.

Толщина консолидированной части тороса принимается [11, стр. 364]:

$$h_{ice} = 6 \text{ м}. \tag{3.45}$$

Толщина снега определяется по формуле (3.2):

$$h_{snow} = 0{,}11H_{sail}^{1,3} = 0{,}9 \text{ м}, \tag{3.46}$$

где $H_{sail} = 5$ м при толщине блоков льда около 2 м (см. формулу (2.2)) [10, стр. 361, рис. 12.37].

Приведенная толщина эквивалентного ледового покрова (см. формулу (2.3)) [10, стр. 361, рис. 12.37]:

$$(h_{sce})_{eq} = h_{ice} + 5h_{snow} = 10{,}5 \text{ м}. \tag{3.47}$$

Минимальная температура $T_{\min}$ воздуха и на поверхности эквивалентного ледового покрова (на поверхности снега) определяется по формуле

$$T_{\min} = (-40) = T.\left(\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}} = 0\right) = -40, \text{ °C (см. рис. 2.2.3).} \tag{3.48}$$

Среднемесячная температура воздуха за два предыдущих месяца (февраль, январь):

$$(-32{,}5 \text{ °C} + (-30 \text{ °C}))/2 = -31{,}25 \text{ °C (см. рис. 2.2.3).} \tag{3.49}$$

Температура в середине приведенной толщины льда (см. формулу (3.5)):

$$\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{(h_{ice})_{eq}} = 0{,}5, \tag{3.50}$$

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 0{,}5) = (T_{averadge} + 0{,}5T_0)/2 \cong 0{,}5T_{averadge} \cong -16 \text{ °C}. \tag{3.51}$$

Температура на нижней поверхности льда (снежно-ледового покрова):

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 1) = -1, \text{ °C}. \tag{3.52}$$

Температура во вспомогательной точке:

$$T(\bar{\xi}_{ice} = 0{,}75) = 0{,}4(T_{averadge} + (-1)) = -6{,}9 \text{ °C}. \tag{3.53}$$

Распределение температуры поперек снежно-ледового покрова определяется численно в соответствии с разд. 2 при заданных выше данных.

$$T(\bar{\xi}_{ice}) = -(10{,}133\bar{\xi}^3_{ice} - 2{,}8\bar{\xi}^3_{ice} - 51{,}933\bar{\xi}^3_{ice} + 40). \quad (3.54)$$

Распределение температуры поперек консолидированной части толщиной 6 м в функции $\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}} = [0,1]$, $\bar{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice} = 6\text{ м}}$,

где 0 — поверхность льда, 1 — нижняя граница льда, имеет вид:

$$T(\bar{\xi}_{ice}) = -1{,}8907\bar{\xi}^3_{ice} - 5{,}1684\bar{\xi}^2_{ice} + 25{,}114\bar{\xi}_{ice} - 19{,}055\ ^\circ\text{C}. \quad (3.55)$$

3.3.2.2 Распределение солености.

Средняя соленость, $^0/_{00}$, в соответствии с 3.2.1, для многолетнего льда при толщине 6 м:

$$(S_I^{MY})_{averadge} = 1{,}8 + \frac{99810{,}5}{h_{ice}^2} = 2{,}07. \quad (3.56)$$

Распределение солености для многолетнего льда по толщине определяется в соответствии с 3.2.1:

$$\frac{S_I^{MY}}{(S_I^{MY})_{averadge}} = -0{,}5244(\bar{\xi}_{ice})^2 + 1{,}835\bar{\xi}_{ice} + 0{,}262. \quad (3.57)$$

3.3.2.3 Прочностные характеристики.

Подробные результаты расчетов прочностных характеристик консолидированной части многолетнего тороса представлены в табл. 3.3.2-1 — 3.3.2-3. Как указывалось выше, расчетные значения статического модуля Юнга, характерной длины ледового покрова L_{static} и прочности на изгиб определяются для 10 % заглубления от поверхности льда и средней солености по толщине льда.

Таблица 3.3.2-1

Расчет прочностных характеристик консолидированной части многолетнего тороса.
Март. Толщина консолидированной части тороса — 6 м

Расстояние от верхней поверхности льда, м	Нормированное расстояние от верхней поверхности льда	Температура, °С	Соленость, ‰ (см. формулы (3.11) и (3.12))	Функция F1 (см. формулы (3.16) и (3.17))	Отн. объем жидкой фазы ν_b, ‰ (см. формулу (3.15))	Функция F2 (см. формулы (3.20) и (3.21))	Отн. объем газовой фазы ν_a, ‰ (см. формулу (3.19))	Суммарная пористость ‰ $\nu = \nu_a + \nu_b$ (см. формулу (3.15))	Макс. прочность на сжатие гориз. нагружение, МПа (см. формулу (3.43)) (прямой борт)	Макс. прочность на сжатие верт. нагружение, МПа (см. формулу (3.42))	Макс. прочность на сжатие косое нагружение, МПа (наклонный борт) (см. формулу (3.35))	Средняя прочность на смятие для косого нагружения (наклонный борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))	Средняя прочность на смятие для горизонтального нагружения (прямой борт) МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))
0	0	-19,055	0,54234	265,08938	1,882206	0,292333	0,550231	2,432437	12,38728	13,76364	13,52115	11,45037	10,86417
0,6	0,1	-16,5972	0,91133	240,76166	3,48238	0,275052	0,957837	4,440217	12,2144	13,57155	13,33245	11,4023	10,81857
1,2	0,2	-14,254	1,25861	216,40265	5,35077	0,257524	1,37795	6,72872	12,02029	13,35587	13,12057	11,3511	10,76999
1,8	0,3	-12,037	1,584179	191,54347	7,608951	0,239365	1,821318	9,43027	11,79511	13,10568	12,87478	11,29479	10,71656
2,4	0,4	-9,95728	1,888039	165,98733	10,46463	0,22042	2,306613	12,77124	11,52246	12,80273	12,57718	11,23141	10,65643
3	0,5	-8,02634	2,170188	139,80183	14,28145	0,200748	2,866974	17,14842	11,17476	12,4164	12,19765	11,15792	10,58669
3,6	0,6	-6,25547	2,430627	113,30024	19,73674	0,180612	3,564682	23,30142	10,70367	11,89297	11,68344	11,06939	10,5027
4,2	0,7	-4,65603	2,669356	87,012121	28,22374	0,160449	4,528484	32,75223	10,01848	11,13164	10,93553	10,95739	10,39643
4,8	0,8	-3,23936	2,886375	61,644015	43,07742	0,140846	6,067284	49,1447	8,932389	9,924877	9,750022	10,80595	10,25275
5,4	0,9	-2,0168	3,081684	38,031301	74,54777	0,12249	9,131388	83,67916	7,014242	7,793602	7,656296	10,58032	10,03867
6	1	-0,9997	3,255282	17,990934[1]	166,4649	0,106405[1]	17,71271	184,1776	3,471037	3,856708	3,788761	10,19614	9,674158

Таблица 3.3.2-2

Расчет прочностных характеристик консолидированной части многолетнего тороса. Март. Толщина консолидированной части тороса 6 м. Нормированное расстояние от верхней поверхности консолидированной части — 0,5

1	Расстояние от верхней поверхности коне. слоя, м.		3
2	Нормированное расстояние от верхней поверхности льда	$\bar{\xi}_{ice}=\frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$	0,5
3	Температура, °С	Формула (3.59) $T(\bar{\xi}_{ice}) = -1{,}8907\bar{\xi}^3_{ice} - 5{,}1684\bar{\xi}^3_{ice} + 25{,}114\bar{\xi}_{ice} - 19{,}055$	−8,02
4	Соленость, ‰	Формула (3.12) $\frac{S_I^{MY}}{(S_I^{MY})_{averadge}} = -0{,}5244(\bar{\xi}_{ice})^2 + 71\ 1{,}835\bar{\xi}_{ice} + 0{,}262$ где средняя соленость, ‰, определяется по формуле (3.11) $(S_I^{MY})_{averadge} = 1{,}8 + \frac{99810{,}5}{h_{ice}^2} = 2{,}07$	2,17
5	Функция F1 (см. формулы (3.16) и (3.17))	Формула (3.16) для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$ °С $F_1/(T) = -4{,}732 - (2{,}245\cdot 10)\cdot T - (6{,}397\cdot 10^{-1})\cdot T^2 - -(1{,}074\cdot 10^{-2})\cdot T^3$	139,8
6	Отн. объем жидкой фазы, ν_b, ‰ (см. формулу (3.8))	$\nu_b = (\rho S_i)/F_1/(T)$, где $\rho \cong 0{,}92 Mg/m^3 (g/cm^3)$ — плотность льда, Мг/м^3; S_i — соленость льда, ‰.	14,28
7	Функция F2 (см. формулы (3.20) и (3.21))	Формула (3.21) для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$, °С $F_2/(T) = 8{,}903\cdot 10^{-2} - (1{,}763\cdot 10^{-2})\cdot T - (5{,}330\cdot 10^{-4})\cdot T^2 - -(8{,}801\cdot 10^{-6})\cdot T^3$	0,20007
8	Отн. объем газовой фазы, ν_a, ‰ (см. формулу (3.19))	$\nu_a = \rho S_i\left(F_2(T)/F_1(T)\right)$	2,86
9	Суммарная пористость, $\nu = \nu_a + \nu_b$ (см. формулу (3.14))	Формула (3.14): $\nu = \nu_a + \nu_b$	17,148
10	Макс. прочность на сжатие, гориз. нагружение, МПа формула (3.43), (прямой борт)	$\left(\sigma^{MY}_{compr.}\right)_{cons,H} = 12{,}6\exp(-0{,}007\nu)$, где ν — суммарная пористость льда, ‰.	11,17

Продолжение табл. 3.3.1-2

11	Макс. прочность на сжатие верт. нагружение, МПа (см. формулу (3.42))	$\left(\sigma_{compr}^{MY}\right)_{cons,V} = 14\exp(-0{,}007\nu)$, где ν — суммарная пористость льда, ‰	12,41
12	Макс. прочность на сжатие косое нагружение, МПа (наклонный борт) (см. формулу (3.35))	$(\sigma_{compr}^{FY})_{mix} = \left(\frac{(\sigma_{compr}^{FY})_V - (\sigma_{compr}^{FY})_H}{90}\right)\cdot\gamma^0 + (\sigma_{compr}^{FY})_H$	12,197
13	Средняя прочность на смятие для косого нагружения (наклонный борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))	$\rho_0 = \overline{\sigma}_{crush} = 2{,}4\sigma_{compr}^{0,6}(\overline{\xi}_{ice})$; $\sigma_{comr} = \text{def}(\sigma_{compr}^{FY})_{mix}$ $p_0(\overline{\xi}_{ice}) = \frac{1}{\overline{\xi}_{ice}}\int p_0(\overline{\xi}_{ice})d\overline{\xi}_{ice}$	11,159
14	Средняя прочность на смятие для горизонтального нагружения (прямой борт), МПа (см. формулы (3.38) и (3.39))	$\rho_0 = \overline{\sigma}_{crush} = 2{,}4\sigma_{compr}^{0,6}(\overline{\xi}_{ice})$; $\sigma_{comr} \overset{def}{=} (\sigma_{compr}^{FY})_H$ $p_0(\overline{\xi}_{ice}) = \frac{1}{\overline{\xi}_{ice}}\int p_0(\overline{\xi}_{ice})d\overline{\xi}_{ice}$	10,58

Таблица 3.3.2-3

Модуль Юнга, прочность льда на изгиб, характерная длина ледового покрова (10 % заглубления от поверхности)

1	Расстояние от верхней поверхности льда, м		0,6
2	Нормированное расстояние от верхней поверхности льда	$\overline{\xi}_{ice} = \frac{\xi_{ice}}{h_{ice}}$	0,1
3	Температура, °С	Формула (3.59) $T(\xi_{ice}) = -1{,}8907\xi_{ice}^3 - 5{,}1684\xi_{ice}^3 + 25{,}114\xi_{ice} - 19{,}055$	−16,59
4	Соленость, ‰	Средняя соленость, $^0/_{00}$, определяется по формуле (3.12) $(S_I^{MY})_{averadge} = 1{,}8 + \frac{99810{,}5}{h_{ice}^2} = 2{,}07$	2,07
5	Функция F1 (см. формулы (3.16) и (3.17))	Формула (3.16) для температуры $-2 \geqslant T \geqslant -22{,}9$ °С $F_1/(T) = -4{,}732 - (2{,}245 \cdot 10) \cdot T - (6{,}397 \cdot 10^{-1}) \cdot T^2 - -(1{,}074 \cdot 10^{-2}) \cdot T^3$	240,76
6	Отн. объем жидкой фазы v_b, ‰ (см. формулу (3.15))	$v_b = (\rho S_i)/F_1/(T)$, где $\rho \cong 0{,}92 Mg/m^3 (g/cm^3)$ — плотность льда, Мг/м^3; S_i — соленость льда, ‰.	7,9
7	Прочность льда на изгиб, МПа (см. формулу (3.37))	$(\sigma_{bend})_{FY,MY} = 1{,}76 \cdot \exp(-5{,}88 v_b^{0,5})$ $v_b = 0{,}0079$	1,04
8	Модуль Юнга, кг/м^2 (см. формулу (3.44))	$E = 1{,}0^8 \cdot 8{,}1663 \cdot \exp(-0{,}21 v_b^{0,5})$ $v_b = 7{,}9$ ‰	$4{,}52 \cdot 10^8$
9	Характерная длина ледового покрова, м (см. формулу (3.45))	$L_{typical} = \left[\frac{E h_{ice}^3}{12\gamma(1-\nu^2)}\right]^{1/4}$, где $\nu \cong 0{,}35$ — коэффициент Пуассона; $\gamma \cong 920$ кг/м^3 — удельный вес воды.	56,356

4 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА РАЙОН ЛЕДОВЫХ УСИЛЕНИЙ AI

4.1 ОСНОВНЫЕ СЦЕНАРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОСОВОЙ И КОРМОВОЙ ЧАСТЕЙ СУДОВ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

В качестве основного сценария для определения ледовых нагрузок принимается удар «скулой» носа о кромку ледового поля (торосистого образования) (см. рис. 4.1-1) [12]. Для судов двойного действия аналогичный сценарий рассматривается для кормы (см. рис. 4.1-2). Указанные сценарии могут быть реализованы как при самостоятельном плавании, так и при движении в канале под проводкой ледокола, и принимаются в качестве основных при назначении ледовых нагрузок на корпус для проверки и назначения прочных размеров обшивки и набора.

Дополнительно для судов двойного действия необходимо рассматривать прямой удар кормы о лед как один из основных сценариев (см. рис. 4.1-3) при самостоятельной эксплуатации на режимах заднего хода.

На рис. 4.1-1 — 4.1-3: F_h, F_n, $(F_{vertical})_{hull}$ — горизонтальная, нормальная, вертикальная составляющие нагрузки на корпус; w, b — длина и высота зоны контакта; β' — угол наклона шпангоута в плоскости, перпендикулярной ледовой ватерлинии; φ — угол раствора кромки ледового покрова; α — угол наклона ватерлинии в расчетной точке контакта.

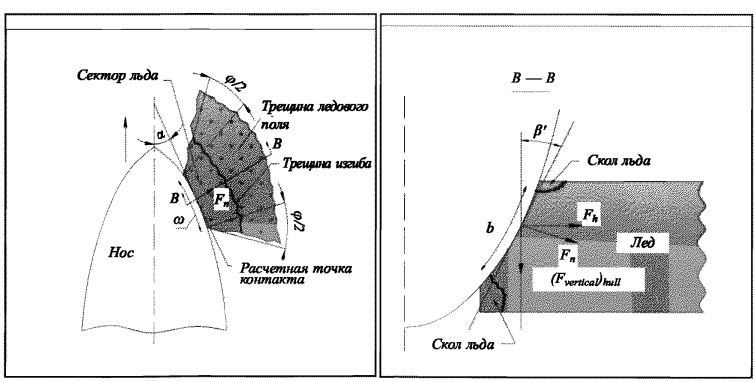


Рис. 4.1-1
Удар «скулой» носа о кромку ледового поля (торосистого образования)

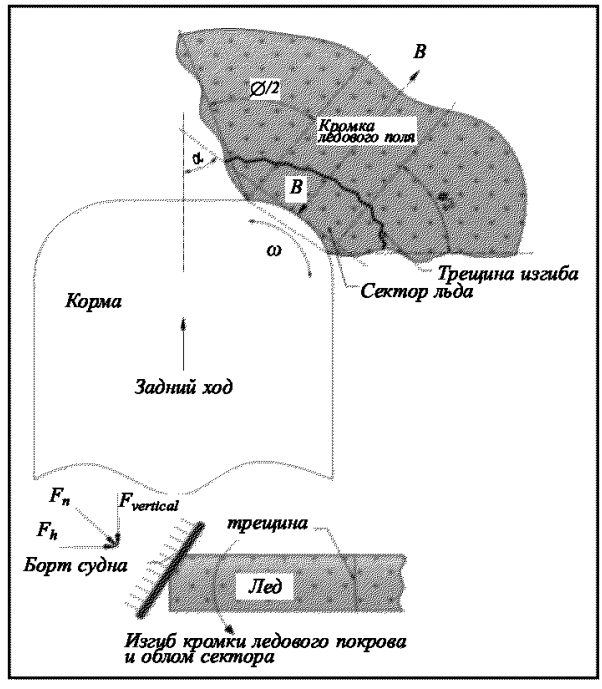


Рис. 4.1 2
Удар «скулой» кормы о кромку ледового поля (торосистого образования)

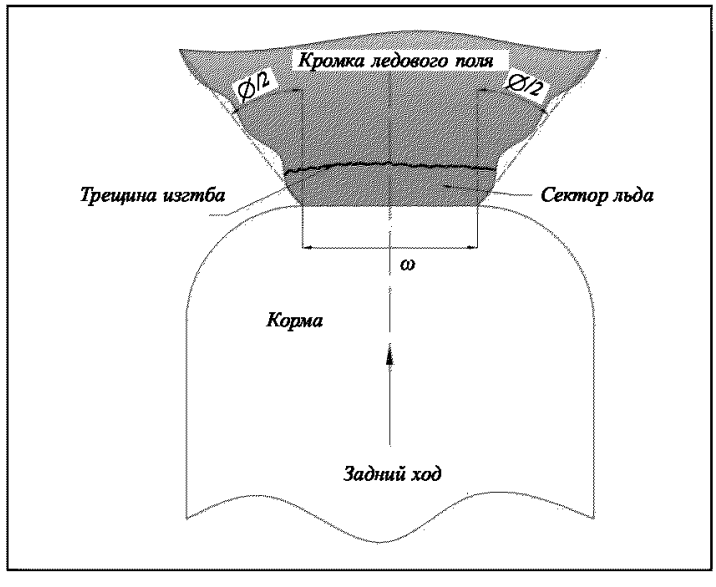


Рис. 4.1-3
Прямой удар кормы судна двойного действия о кромку ледового поля (торосистого образования)

В общем случае уровень ледовой нагрузки на корпус определяется разрушением кромки ледового покрова изгибом от силы, которая возникает при взаимодействии борта со льдом.

При малых углах β' в сочетании с большой скоростью взаимодействия борта со льдом разрушения ледового покрова может происходить без изгиба, т.е. может реализоваться так называемый сценарий разрушения льда смятием как при взаимодействии с прямостенным бортом (см. также 3.3.5).

4.2 ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ, ПОДХОДЫ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТНОЙ ПРОЦЕДУРЫ ДЛЯ НАЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ЭЛЕМЕНТ НОСОВОЙ ИЛИ КОРМОВОЙ СКУЛЫ

4.2.1 Определение ледовых нагрузок на наклонный борт при разрушении ледового поля изгибом.

На рис. 4.2.1-1 представлена схема локального разрушения льда при взаимодействии наклонного борта со льдом (ровный лед или консолидированная часть тороса) [12].

Ледовое давление в зоне контакта (см. рис. 4.2.1-1) определяется на основе гидродинамической теории выдавливания ледового порошка в тонком слое между поверхностью тела и неразрушенным льдом [12, 13].

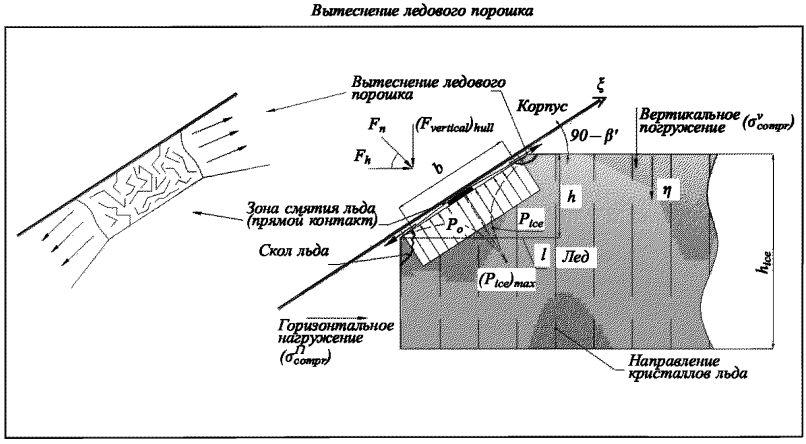


Рис. 4.2.1-1
Схема взаимодействия ледового покрова с наклонным бортом носовой (кормовой) оконечности судна [2]

Прочность льда на смятие σ_{crush} или среднее локальное ледовое давление $p_0(b)$ в зоне контакта высотой b определяется по формуле (3.28) (см. 3.2.5).

Прочность льда на смятие σ_{crush} или среднее значение локального контактного ледового давления p_0:

$$p_0^{def} = \sigma_{crush} = 2{,}4 p_{compr}^{0{,}6}, \tag{4.1}$$

где σ_{compr} — прочность льда на одноосное сжатие, для многолетнего льда (σ_{compr}^{MY}), для однолетнего льда $(\sigma_{compr}^{FY})_{mix}(\gamma)$.

Принимая во внимание масштабный эффект прочности льда на смятие (контактное ледовое давление) от площади взаимодействия со льдом, давление p_0 необходимо рассматривать как локальное ледовое давление, соответствующее относительно малой площади контакта корпуса со льдом.

Для учета анизотропии прочностных характеристик ледового покрова значение σ_{compr} при заданном угле наклона борта по нормали к наружной обшивке β' (для «косого» нагружения) задается в функции от прочности льда на одноосное сжатие при вертикальном и горизонтальном нагружениях, $\sigma_{compr}(\beta') = f(\sigma_{compr}^{Y}, \sigma_{compr}^{H}, \beta')$ [13].

В качестве основных расчетных для назначения прочных размеров корпуса принимаются среднеинтегральные значения давления $p_0(b) = p_0(h)$ по высоте зоны контакта b обшивки с ледовым покровом (см. рис. 4.2.1-1).

$$p_0(b) = \frac{1}{b}\int p_0(\xi)d\xi = p_0(h) = \frac{1}{h}\int_0^h p_0(\eta)d\eta, \tag{4.2}$$

где b — протяженность (высота) зоны контакта обшивки с ледовым покровом, $h = b \cdot \sin(90 - \beta')$.

Вертикальная сила, воздействующая на кромку поля со стороны корпуса, определяется выражением

$$(F_{vertical})_{hull} = F_n \cdot \cos(90 - \beta') - f_d F_n sin(90 - \beta'), \tag{4.3}$$

где F_n — ледовая сила, нормальная к поверхности борта судна;
β' — угол наклона борта по нормали к наружной обшивке (см. рис. 4.1-1);
f_d — коэффициент динамического трения льда о поверхность корпуса. Для корпуса, покрытого краской типа «Инерта» $f_d \cong 0{,}8$, если состояние корпуса неизвестно, то рекомендуется принимать $f_d \cong 0{,}1$;

$$F_n = f_n \cdot w, \tag{4.4}$$

где f_n — удельная ледовая сила на единицу длины;
w — длина контакта по ватерлинии.

Удельная ледовая сила f_n определяется по формуле

$$f_n = f_n^0 k_{scale}, \tag{4.5}$$

где f_n^0 — локальная удельная ледовая сила;
k_{scale} — масштабный фактор удельной ледовой силы f_n;

$$f_n^0 = \lim_{l \to 0} f_n = bp_0(b). \tag{4.6}$$

Масштабный фактор удельной ледовой силы определяется по формуле

$$k_{scale}(w) = c \cdot \exp[-w/\theta] + k, \tag{4.7}$$

где c = 0,7853, 0 =1,99, k = 0,2146 — коэффициенты.

С другой стороны, максимальная вертикальная сила $F_{verticai}$ соответствует моменту облома сектора льда. Значение вертикальной силы облома кромки поля, может быть определено по формуле полученной на основе известного решения Папковича (см. отчет по второму этапу, [12]).

$$(F_{vertical})_{ice} = k_{dyn}(Fr_{ice}) k_{Ver}\left[0{,}77\frac{w}{(L_{typical})} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)\right]\sigma_{bend} h_{ice}^2, \tag{4.8}$$

где w(l) — длина приложения распределенной нагрузки (длина зоны контакта корпуса с ледовым полем);
φ_{design} = 160° — расчетный угол раскрытия кромки ледового поля;
k_{dyn} — динамический коэффициент усиления нагрузки в зависимости от скорости нагружения ледового покрова;
σ_{bend} — прочность льда на изгиб (определенная на предыдущем этапе расчетов);
$L_{typicai}$ — характерная длина ледового покрова (определенная на предыдущем этапе расчетов);
k_{Ver} — коэффициент.

Динамический коэффициент усиления k_{dyn} нагрузки определяет увеличение силы поломки ледового покрова в зависимости от его скорости нагружения [2]:

$$k_{dyn} = 1/\left[0{,}925\exp\left[-\frac{Fr_{ice}}{0{,}4}\right] + 0{,}075\right], \tag{4.9}$$

где $Fr_{ice} = V_{typicai}/\sqrt{gh_{ice}}$ — число Фруда по толщине льда;
$V_{typical} = V_n = V \cdot \cos(90 - \alpha)$ — скорость, нормальная к линии ватерлинии в расчетной точке контакта;
α — угол наклона ватерлинии в расчетной точке контакта (см. рис. 4.1 1);
h_{ice} — толщина льда, м;
V, — скорость судна, м/с.

Параметры ледовой нагрузки определяются из решения уравнения:

$$(F_{vertical})_{hull} = (F_{vertical})_{ice}. \quad (4.10)$$

Вышеприведенное уравнение решается относительно переменной l, которая является длиной внедрения корпуса в лед (см. рис. 4.1-1).

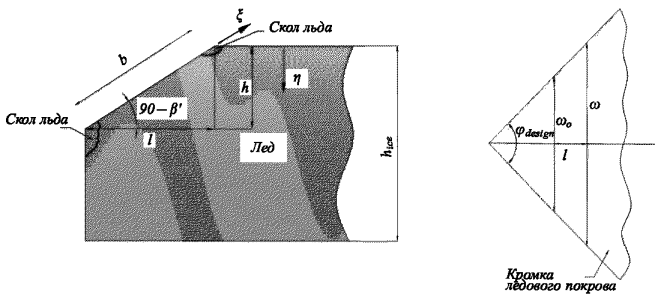


Рис. 4.2.1-2
Геометрические характеристики зоны контакта наклонного борта со льдом

При решении уравнения (4.11) длина и высота контакта определяются выражениями (см. рис. 4.2.1-2):

$$w = w_0 + 2l \cdot \mathrm{tg}(\varphi_{design}/2) \text{ — длина контакта;} \quad (4.11)$$

$$b = 0{,}65(l^2 + h^2)^{0{,}5}, \quad (4.12)$$

где $h = l \cdot \mathrm{tg}(90 - \beta')$ — высота контакта; (4.13)

$\varphi_{design} = 160°$ — расчетный угол раскрытия сектора льда;

w_0 — зона контакта в начале взаимодействия.

В первом приближении в качестве значения w_0 предлагается использовать характерный размер обломка льда, который образуется при ломке ледового покрова корпусом судна. Значение $w_0 = w_0(Fr''_{ice})$, м, определяется на основе методики, предложенной Ю.Н. Алексеевым и К.Е. Сазоновым по результатам прямых измерений обломков льда в натурных условиях [12]:

$$w_0 = \max(w_1, w_2), \quad (4.14)$$

где $w_1(Fr''_{ice}) = \left(7{,}31\exp\left[-\frac{Fr''_{ice}}{0{,}4}\right] + 0{,}6\right)$, м; (4.15)

$w_2 = 0{,}5w_1(Fr''_{ice})/(\mathrm{tg}\alpha)$, м; (4.16)

$Fr_{ice} = \frac{V\mathrm{tg}\gamma}{\sqrt{gh_{ice}}}$;

γ — угол наклона батокса в расчетной точке, V, м/с;

α — угол наклона ватерлинии в расчетной точке, град;

h_{ice} — толщина ровного льда или консолидированной части тороса, м.

На следующем этапе уточняется длина контакта $w = w_0(Fr''_{ice}) + 2l\cdot\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)$ (см. формулу (4.11)), определяются высота и ледовая нагрузка.

По результатам решения определяются значения локальной силы $F_n(w, b)$, длина w и высота зоны контакта b, значение локального давления $p_0(b)$, а также среднее ледовое давление $p_{averadge}(w,b) = F_n/(w\cdot b)$ по зоне контакта (ω, b).

Подробное описание решения уравнения (4.11) приведено в разд. 5.

Для расчета прочности элемента корпуса с размерами (s, d), s — шпация, d — пролет шпангоута, сила $F_n(s,d)$, действующая по нормали к поверхности элемента корпуса и среднее контактное давление $p_{averadge}(s,d)$, определяются по следующим формулам с учетом масштабного фактора прочностных характеристик льда в зависимости от характерных размеров набора:

$$\begin{aligned} F_n(s,d=b) &= p_0(b)\cdot b\cdot s\cdot k_{scale}(s),\ b < d \\ F_n(s,d) &= p_0(b)\cdot b\cdot s\cdot k_{scale}(s),\ b \geqslant d \end{aligned}, \quad (4.17)$$

где $k_{scale}(s)$ — масштабный фактор, определяется по формуле (4.7) для s.

Среднее нормальное давление по площади контакта для элемента корпуса с размерами (s,d):

$$\begin{aligned} p_{averadge}(s,d=b) &= F_n(s,d)/(b\cdot a) = p_0(b)\cdot k_{scale}(s),\ b < d \\ p_{averadge}(s,d) &= F_n(s,d)\cdot(d\cdot s) = p_0(b)\cdot k_{scale}(s),\ b \geqslant d \end{aligned}, \quad (4.18)$$

Среднее нормальное давление на элемент корпуса можно использовать для определения t_{net} для судов полярных классов [2].

В этом случае $p_{averadge}(s,d)$ подставляется в формулу для определения t_{net} вместо ($AF*PPF_p*P_{avg}$), в качестве b — высота расчетного участка берется b — протяженность (высота) зоны контакта обшивки с ледовым покровом, определенную в результате расчетов.

Представленная методология полностью применима для оценки ледовых нагрузок на «плоские» носовые и кормовые обводы (удар кормы судна двойного действия о кромку льда (см. рис. 4.1-3). Для данного случая угол развала шпангоута принимается равным $\beta = \beta' = (90-\gamma)$, где γ — угол наклона батокса. Угол входа ватерлинии составляет $\alpha = 90°$.

Выше указывалось, что при малых углах развала шпангоута β' может быть реализован сценарий взаимодействия ледового покрова с прямостенным бортом, когда разрушение кромки ледового покрова не происходит. Методика определения ледовой нагрузки для этого случая представлена в 4.2.2.

4.2.2 Определение ледовых нагрузок на прямостенный борт.

Методика определения ледовых нагрузок на прямостенный борт заключается в следующем. При выполнении условия $(F_{vertical})_{hull} < (F_{vertical})_{ice}$, когда вертикальной силы воздействия корпуса на кромку ледового поля не хватает для разрушения последней изгибом, реализуется так называемый сценарий взаимодействия прямостенного борта со льдом (см. рис. 4.2.2).

Указанный сценарий характерен для относительно малых углов наклона борта β', когда $b > 0{,}65 \dfrac{h_{ice}}{\cos\beta'}$, где b — расчетная высота контакта, определенная из условия разрушения ледового поля изгибом. В последнем случае высота зоны контакта определяется как $b > 0{,}65 \dfrac{h_{ice}}{\cos\beta}$.

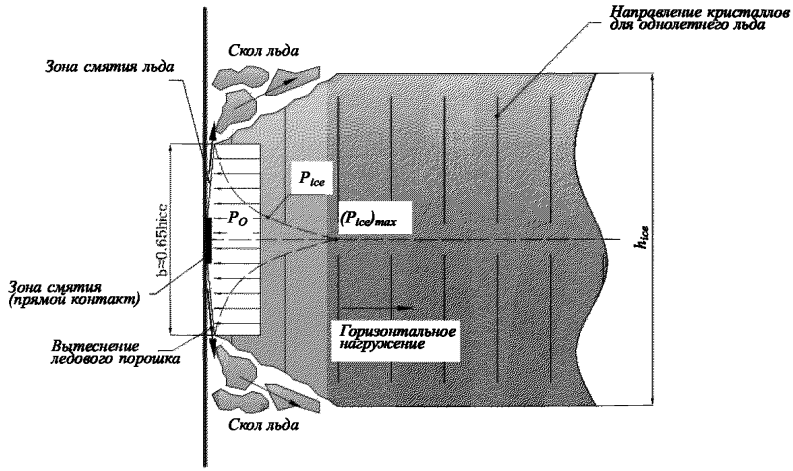


Рис. 4.2.2
Взаимодействие кромки ледового покрова с прямостенным бортом

Для рассматриваемого сценария параметры ледовой нагрузки определяются уравнением

$$\frac{m(V\cdot 0{,}5144\cdot\sin(\alpha))^2}{2} = \int_0^{\xi} F d\xi, \qquad (4.19)$$

где m — масса судна, кт (с учетом присоединенных масс);
V — скорость судна, уз.;
α — угол входа ватерлинии, рад;
ξ — локальная координата глубины внедрения борта в ледовое образование, м;
F —ледовая сила, КН.

$$F = p_0 \cdot w \cdot b \cdot k_{scale}(w), \qquad (4.20)$$

где p_0 — среднее локальное ледовое давление в зоне контакта;
w, b — ширина и высота зоны контакта.

Искомая глубина внедрения корпуса в лед ξ определяется уравнением, которое решается численно:

$$\frac{C_1}{C_2^2} = [e^{C_2\xi}\cdot(C_2\xi - 1) + 1] + C_3\xi^2 - \frac{m(V\cdot 0{,}5144\cdot\sin(\alpha))^2}{2} = 0, \qquad (4.21)$$

где $C_1 = 1{,}0209p\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)\cdot\dfrac{h_{ice}}{\cos(\beta')}$;

$C_2 = -1{,}005p\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)$;

$C_3 = 0{,}1395p\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)\cdot\dfrac{h_{ice}}{\cos(\beta')}$,

где φ — угол раствора кромки ледового поля, принимаемый равным φ=160°.

По найденной глубине внедрения определяются остальные параметры ледового воздействия — величина ледовой контактной силы, высота и ширина зоны контакта, а также параметры нагрузки на шпацию.

4.3 УТОЧНЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ПРЯМОСТЕННЫЙ БОРТ

При малых углах наклона борта по нормали к наружной обшивке величина развиваемой вертикальной силы может оказаться недостаточной для разрушения ледового поля изгибом [12]. В этом случае реализуется сценарий взаимодействия прямостенного борта со льдом. Для этого сценария с оценкой в безопасную сторону принимается схема

разрушения льда без изгиба, т.е. смятием, см. также [12]. В этом случае (аналогично подходу в Правилах DNV [14]) зона контакта борта со льдом принимается постоянной, не зависящей от скорости (см. отчет по второму этапу [12]). Для носовой и кормовой частей судов двойного действия зона контакта по глубине льда h принимается соответствующей $h/h_{ice} = 0{,}65$. В этом случае для определения допустимых значений угла наклона борта по нормали к обшивке следует исходить из двух предположений:

вертикальная сила, развиваемая корпусом должна быть положительной;

проекция высоты зоны контакта на вертикальную ось h должна удовлетворять следующему условию:

$$h/h_{ice} < 0{,}65, \tag{4.22}$$

где h_{ice} — толщина льда.

Из статического решения задачи [12] можно получить, что глубина внедрения корпуса судна в лед 1 определяется следующим образом:

$$l = \frac{k_{ver}\left[0{,}77\,\frac{w_0}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}^2}{\frac{0{,}65}{\sin(\beta')}\,p_0(h_{ice})k_{scale}(w_0)w_0(\sin(\beta' - fd\cdot\cos(\beta'))} . \tag{4.23}$$

В то же время из геометрических построений следует:

$$l = h\cdot\mathrm{tg}(\beta'). \tag{4.24}$$

Тогда, используя формулы (4.22), (4.23) и (4.24), можно найти:

$$h/h_{ice} = \frac{k_{ver}\left[0{,}77\,\frac{w_0}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{\frac{0{,}65}{\cos(\beta')}\,p_0(h_{ice})k_{scale}(w_0)w_0(\sin(\beta' - fd\cdot\cos(\beta'))} . \tag{4.25}$$

Из формулы (4.25) получаем условия по углу β' для облома ледового сектора изгибом с учетом физико-механических параметров, толщины льда, а также характерной скорости.

При эксплуатации судна в многолетнем льду:

$$\beta' > \mathrm{arctg}(fd + A), \tag{4.26}$$

где $A = \dfrac{k_{ver}\left[0{,}77\,\dfrac{w_0}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{0{,}4225p_0(h_{ice})k_{scale}(w_0)w_0}$. (4.27)

При эксплуатации судна в однолетнем льду:

$$(\mathrm{tg}(\beta') - fd)\cdot p_0(h_{ice}) > B, \tag{4.28}$$

где $B = \dfrac{k_{ver}\left[0{,}77\,\dfrac{w_0}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{0{,}4225k_{scale}(w_0)w_0}$. (4.29)

При уточнении характерной длины контакта проводится проверка по аналогичному критерию, который имеет следующий вид:

многолетний лед:

$$\beta' > \mathrm{arctg}(fd + A1), \tag{4.30}$$

где $A1 = \dfrac{k_{dyn}k_{ver}\left[0{,}77\,\dfrac{w_1}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{0{,}65p_0(h_{ice})k_{scale}(w_1)c_1}$. (4.31)

однолетний лед:

$$(\mathrm{tg}(\beta') - fd)\cdot p_0(h_{ice}) > B1, \tag{4.32}$$

где $B1 = \dfrac{k_{dyn}k_{ver}\left[0{,}77\,\dfrac{w_1}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{0{,}65p_0(h_{ice})(w_1)w_1}$. (4.33)

В случае невыполнения условий (4.26), (4.27), (4.28), (4.29) реализуется сценарий взаимодействия прямостенного борта со льдом. Для определения параметров зоны контакта и определения интегральной ледовой нагрузки необходимо использовать энергетическое уравнение

$$\frac{m(V\cdot 0{,}5144\cdot\sin(\alpha))^2}{2} = \int_0^{\xi} F d\xi, \tag{4.34}$$

где m — масса судна, кт;
V — скорость судна, уз.;
α — угол входа ватерлинии, рад.;
ξ — локальная координата глубины внедрения борта в ледовое образование.

Выражение для силы записывается следующим образом:

$$F = pwbk_{scale}(w), \tag{4.35}$$

где p — среднеинтегральное давление по высоте зоны контакта, которая определяется по формуле

$$h = 0{,}65h_{ice}. \tag{4.36}$$

Высота ледовой нагрузки по элементу корпуса b определяется по формуле

$$b = \frac{0{,}65\mathrm{h}_{ice}}{\cos(\beta')}. \tag{4.37}$$

Характерная длина контакта является функцией от локальной координаты глубины внедрения борта в ледовое образование и определяется по формуле

$$w = 2\xi \cdot \mathrm{tg}(\varphi/2). \tag{4.38}$$

Масштабный коэффициент так же выражается через локальную координату глубины внедрения ξ:

$$k_{scale}(\xi) = 0{,}7853\exp\left(-\frac{2\xi\mathrm{tg}(\varphi/2)}{1{,}99}\right) + 0{,}2146. \tag{4.39}$$

В результате нахождения первообразной правой части равенства (4.34) получим выражение следующего вида, одним из корней которой и является истинная глубина внедрения:

$$\frac{C_1}{C_2^2} = [e^{C_2\xi}\cdot(C_2\xi - 1) + 1] + C_3\xi^2 - \frac{m(V\cdot 0{,}5144\cdot\sin(\alpha))^2}{2} = 0, \tag{4.40}$$

где
$$C_1 = 1{,}0209p\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)\cdot\frac{h_{ice}}{\cos(\beta')};$$
$$C_2 = -1{,}005\mathrm{p}\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2); \tag{4.41}$$
$$C_3 = 0{,}1395\mathrm{p}\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)\cdot\frac{h_{ice}}{\cos(\beta')},$$

Формула (4.40) может быть решено численно. По найденной глубине внедрения ξ, используя формулу (4.38), восстанавливаем характерную длину контакта, а по формуле (4.35) — нормальную силу.

Нормальная сила в пересчете на шпацию определяется по формуле

$$F_{Space} = p \cdot b \cdot Space \cdot k_{scale}(Space), \quad (4.42)$$

где $Space$ — размер шпации, м;

$k_{scale}(Space)$ — значение масштабный коэффициента в пересчёте на шпацию;

b — высота ледовой нагрузки.

Среднее нормальное давление по площади контакта для элемента корпуса с размерами: $Space$ — длина контакта, b — высота ледовой нагрузки, если она меньше чем характерный пролет шпангоута, определяется по формуле (если высота нагрузки больше характерного пролета шпангоута, ее следует принять равной пролету):

$$p_{Space} = \frac{F_{Space}}{b \cdot Space}. \quad (4.43)$$

5 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

Пример 1. **Определение ледовой нагрузки**

1) **Судно.**

Танкер двойного действия категории Агс7.

2) **Параметры плоского элемента скулы носовой части танкера:**

угол входа ватерлинии $\alpha = 48°$;

угол наклона (развала) борта $\beta = 67°$;

угол наклона борта по нормали к наружной обшивке $\beta = 5766°$;

угол наклона батокса $\gamma = 25{,}2°$;

шпация $s = 0{,}68$ м;

пролет шпангоута $d = 1{,}3$ м.

3) **Режим эксплуатации.**

Самостоятельное движение в зимне-весеннюю навигацию, однолетний лед, март месяц.

Толщина льда $h_{ice} = 1{,}45$ м.

Скорость движения $V = 8$ *узлов* $= 4{,}12$ м/с.

4) **Сценарий взаимодействия со льдом.**

Удар скулой о кромку ледового покрова (см. рис. 2.2.1-1).

Прочностные характеристики льда.

Прочностные характеристики льда указаны в табл. 3.3.1-3.

Прочность льда на изгиб $\sigma_{bend} = 0{,}78$ МПа.

Характерная длина ледового покрова $L_{typical} = 17{,}43$ м.

Распределение среднеинтегрального давления p_0 (среднеинтегральная прочность льда на смятие σ_{crush}) (см. формулу (3.29)) поперек ледового покрова в зависимости от расстояния от верхней поверхности льда h для косого нагружения при $\beta' = 74{,}14$ указано в табл. 5-1.

Для расчета параметров ледовой нагрузки распределение среднеинтегрального давления p_0, МПа, в зависимости от расстояния от верхней поверхности льда аппроксимируется полиномом

$$p_0(h) = -1{,}349h^4 + 2{,}3115h^3 - 1{,}3022h^2 + 0{,}366h + 11{,}107, \text{ МПа}. \qquad (5.1)$$

Вид полинома определяется при помощи стандартных средств Excel как уравнение к линии тренда диаграммы.

6) **Определение ледовой нагрузки.**

Первоначальная оценка зоны контакта.

$w_0 = \max(w_1, w_2)$ (см. формулу (4.14)) для скорости движения $v_s = 8$ уз., толщины льда $h_{ice} = 1{,}45$ м:

$$Fr''_{ice} = \frac{V \cdot \mathrm{tg}\gamma}{\sqrt{g h_{ice}}} = 0{,}51; \tag{5.2}$$

$$w_1(Fr''_{ice}) = \left(7{,}31\exp\left[-\frac{Fr''_{ice}}{0{,}4}\right] + 0{,}6\right) \cdot h_{ice}^{3/4} = 3{,}47\text{м}; \tag{5.3}$$

$$w_2 = 0{,}5 w_1(Fr''_{ice})/(\mathrm{tg}\alpha) = 1{,}561 \text{ м}; \tag{5.4}$$

$$w_0(Fr''_{ice}) = \max(w_1, w_2) = 3{,}47 \text{ м}. \tag{5.5}$$

Таблица 5-1

Распределение среднеинтегрального давления p_0 (среднеинтегральная прочность льда на смятие σ_{crush}) поперек ледового покрова в зависимости от расстояния от верхней поверхности льда для косого нагружения при $\beta' = 74{,}14$ (см. формулу (3.29))

Расстояние от верхней поверхности льда, м	Средняя прочность на смятие для косого нагружения (наклонный борт), МПа
0	11,11399
0,145	11,12759
0,29	11,14697
0,435	11,17028
0,58	11,19071
0,725	11,19879
0,87	11,18023
1,015	11,11109
1,16	10,948
1,305	10,60837
1,45	9,976662

Уточнение длины контакта.

Уточнение длины контакта w, определение высоты контакта b и ледовой нагрузки F_n выполняется для статического нагружения ($Fr'_{ice} = 0$, $k_{dyn}(Fr'_{ice}) = 1$) , при $w = w_0(Fr''_{ice}) + 2l\mathrm{tg}(\varphi_{deslgn}/2)$.

Указанные параметры определяются из решения уравнения $(F_{vertical})_{hull} = (F_{vertical})_{ice}$ относительно переменной l — длины внедрения корпуса в лед.

Для решения уравнение $(F_{vertical})_{hull} = (F_{vertical})_{ice}$ необходимо записать через переменную l:

$$(F_{vertical})_{hull} = F_n \cos(90 - \beta') - f_d F_n \sin(90 - \beta') = F_n[\sin(\beta') - \cos(\beta')]; \tag{5.6}$$

$$F_n = w \cdot p_0(h) k_{scale} b; \tag{5.7}$$

$$k_{scale}(w) = c \cdot \exp[-w/0] + k, \tag{5.8}$$

где $c = 0{,}7853$, $0 = 1{,}99$, $k = 02146$ — коэффициенты;

$$k_{scale} = 0{,}78853 \exp\left[-\frac{(w_0 + 2l\operatorname{tg}(\varphi_{design}/2)}{\theta}\right] + 0{,}2146; \tag{5.9}$$

$$b = 0{,}65 \cdot (l^2 + h^2)^{0{,}5} = 0{,}65\sqrt{l^2 + (l \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^2}, \tag{5.10}$$

где $h = l \cdot \operatorname{tg}(90 - \beta') = l \cdot \operatorname{ctg}(\beta')$ — высота контакта; (5.11)
$\varphi_{design} = 160°$ — расчетный угол раскрытия сектора льда;
$f_d = 0{,}1$.

В качестве $p_0(h)$ используется полином (5.1):

$$p_0(h) = -1{,}349h^4 + 2{,}3115h^3 - 1{,}3022h^3 + 0{,}366h^2 + 11{,}107 =$$
$$= l \cdot \operatorname{ctg}(\beta') \cdot (-1{,}349l^3 \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^3 + 2{,}3115l^2 \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^2 - 1{,}3022l \cdot \operatorname{ctg}(\beta') + 0{,}366) + 11{,}107,$$

тогда уравнение для F_n (см. формулу (5.7)) принимает следующий вид:

$$F_n = [w_0 + 2l \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{design}/2)] \times [l \cdot \operatorname{ctg}(\beta') \cdot (-1{,}349l^3 \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^3 + 2{,}3115l^2 \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^2 -$$
$$- 1{,}3022l \cdot \operatorname{ctg}(\beta') + 0{,}366) + 11{,}107] \times \left(0{,}7853 \exp\left[-\frac{(w_0 + 2l\operatorname{tg}(\varphi_{design}/2)}{\theta}\right] +\right.$$
$$\left. + 0{,}2146\right) \times 0{,}65\sqrt{l^2 + (l \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^2}.$$

Таким образом, уравнение для вертикальной силы, действующей на кромку поля со стороны корпуса (см. формулу (5.6)), принимает следующий вид:

$$(F_{vertical})_{hull} = [w_0 + 2l \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{design}/2)] \times [l \cdot \operatorname{ctg}(\beta') \cdot (-1{,}349l^3 \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^3 + 2{,}3115l^2 \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^2 -$$
$$- 1{,}3022l \cdot \operatorname{ctg}(\beta') + 0{,}366) + 11{,}107] \times \left(0{,}7853 \exp\left[-\frac{(w_0 + 2l\operatorname{tg}(\varphi_{design}/2)}{\theta}\right] +\right.$$
$$\left. + 0{,}2146\right) \times 0{,}65\sqrt{l^2 + (l \cdot \operatorname{ctg}(\beta')^2} \cdot [\sin(\beta') - f_d \cdot \cos(\beta')].$$

Уравнение для вертикальной силы облома кромки поля, относительно глубины внедрения корпуса в лед, имеет следующий вид:

$$(F_{vertical})_{ice} = k_{dyn}k_{Ver}\left[0{,}77\,\frac{(w_0 + 2l\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}^2,$$

где $k_{dyn} = 1/\left(0{,}925\cdot\exp\left[-\frac{Fr'_{ice}}{0{,}4}\right] + 0{,}075\right)$

$Fr_{ice} = \frac{Vtypical}{\sqrt{gh_{ice}}}$ — число Фруда по толщине льда;

$V_{typical} = V_n = V\sin\alpha$ — скорость, нормальная к линии ватерлинии в расчетной точке контакта;

α — угол наклона ватерлинии в расчетной точке контакта (см. рис. 4.1.1);

$k_{Ver} = 0{,}14$ — коэффициент.

Так как уточнение длины контакта w, определение высоты контакта b и ледовой нагрузки F_n выполняется для статического нагружения, таким образом:

$$V = 0 \Rightarrow Fr'_{ice} = 0;$$
$$k^{dyn}(Fr_{ice}) = 1.$$

Таким образом, используя приведенные выше формулы, получаем нелинейное уравнение относительно глубины внедрения корпуса в лед:

$$k_{dyn}k_{Ver}\left[0{,}77\,\frac{(w_0 + 2l\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)}{L_{typical}} + 1{,}11tg(\varphi_{design}/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}^2 = (w_0 + 2l\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)\times$$
$$\times[1\cdot\mathrm{ctg}(\beta')\cdot(-1{,}349l^3\cdot\mathrm{ctg}(\beta')^3 + 2{,}3115l^2\cdot\mathrm{ctg}(\beta')^2 - 1{,}3022l\cdot\mathrm{ctg}(\beta') + 0{,}366) + 11{,}107]\times$$
$$\times\left(0{,}7853\exp\left[-\frac{(w_0 + 2l\mathrm{tg}(\varphi_{design}/2)}{\theta}\right] + 0{,}2146\right)\times 0{,}65\sqrt{l^2 + (l\cdot\mathrm{ctg}(\beta')^2}\times$$
$$\times[\sin(\beta') - f_d\cdot\cos(\beta')].$$

Далее подставляем в данное уравнение значения переменной l, начиная с $l = 0$, с шагом $\Delta l = 0{,}05$, пока $(F_{vertical})_{hull} \approx (F_{vertical})_{ice}$. Затем уменьшаем шаг, до получения достаточной сходимости результатов. В данном случае сходимость получилась при $l = 0{,}156$ м.

В результате решения:

Таким образом, для скорости $V = 0$ уз. была получена зона контакта $w(l) = 5{,}25$ м и статическая нагрузка:

$$(F_{vertical})_{hull}\ (V = 0) = (F_{vertical})_{ice}\ (V = 0) = 1{,}51\ \text{МН}.$$

7) **Расчет параметров интегральной нагрузки на корпус при скорости движения.**

$V = 8$ уз.

Скорость, нормальная к линии ватерлинии в расчетной точке контакта: $V_n = V \cdot \cos(90 - \alpha) = 3{,}061$ м/с;

Число Фруда:

$$Fr_{ice} = \frac{V_n = V \cdot \cos(90 - \alpha)}{(g h_{tce} = 1{,}45)^{0{,}5}} = 0{,}808;$$

Коэффициент динамического усиления:

$$k_{dyn} = 1/\left(0{,}925 \exp\left[-\frac{Fr'_{ice}}{0{,}4}\right] + 0{,}075\right) = 5{,}0339.$$

Нагрузка на корпус при скорости $V_s = 8$ уз.:

$$(F_{vertical})_{huil}(V = 8 \text{ уз.}) = (F_{vertical})_{ice}(V = 0) k_{dyn} = 7{,}6 \text{ МН};$$

$$F_n(V = 8 \text{ уз.}) = \frac{(F_{vert})_{hull}}{\sin(\beta') - f_d \cdot \cos(\beta')} = 9{,}6 \text{ МН}.$$

Для первого приближения принимается

$$p_0 = p_0(h_{ice}) = \frac{1}{h_{ice}} \int_0^{h_{ice}} p_0(\eta) d\eta = 10 \text{ МПа}.$$

Высота контакта со льдом:

$$b = F_n / k_{scale} \cdot w \cdot p_0.$$

При $l = 0{,}156$ м, длине контакта $w(l) = 5{,}25$ м и коэффициенте $k_{scale} = 0{,}27$, получаем:

$$b = F_n / k_{scale} \cdot w \cdot p_0 = \frac{9{,}6}{0{,}27 \cdot 5{,}24 \cdot 10} = 0{,}68 \text{ м}.$$

Далее, уточняется $p_0(b)$, МПа (см. формулу (3.29)):

$$p_0(h) = \frac{1}{b} \int p_0(\xi) d\xi = p_0(h) = \frac{1}{h} \int_0^h p_0(\eta) d\eta,$$

при этом в качестве $p_0(h)$ используется полином (5.1), определенный на предыдущем этапе решения:

$$p_0(h) = -1{,}349h^4 + 2{,}3115h^3 - 1{,}3022h^3 + 0{,}366h^2 + 11{,}107;$$

$$h = b\cdot\sin(90-\beta') = 0{,}68\cdot\sin(90-57{,}66) = 0{,}3638;$$

$$p_0(b) = p_0(h) = -1{,}349\cdot0{,}3638^4 + 2{,}3115\cdot0{,}3638^3 - 1{,}30220{,}3638^2 + 0{,}366\cdot0{,}3638 + + 11{,}107 = 11{,}16.$$

Второе приближение для высоты контакта:

$$b = F_n/k_{scale}\cdot w\cdot p_0 = \frac{9{,}6}{5{,}24\cdot0{,}27\cdot11{,}16} = 0{,}61 \text{ м}.$$

8) **Расчет параметров локальной нагрузки на элемент корпуса.**

Элемент корпуса имеет следующие размеры: s = 0,68 м; d = 1,3 м,

где s — шпация;

d — пролет шпангоута.

Скорость движения судна V = 8 уз.

Сила, действующая по нормали к поверхности элемента, для b = 0,61 м < d = 1,3 м,

где b — высота нагрузки (см. формулу (4.17))

$$F_n(s,d = b) = p_0(b)\cdot b\cdot s\cdot k_{scale}(s),\ b < d; \qquad (5.12)$$

$$k_{scale}(s) = c\cdot\exp[-s/0] + k, \qquad (5.13)$$

где c = 0,7853, 0 = 1,99, k = 0,2146 — коэффициенты;

$$k_{seale}(s) = 0{,}7853\exp[-0{,}68/1{,}99] + 0{,}2146 = 0{,}7726;$$

$$F_n(s,d) = p_0(b)\cdot b\cdot s\cdot k_{scale}(s) = 11{,}16\cdot0{,}61\cdot0{,}68\cdot0{,}7726 = 3{,}58,\ \ b < d;$$

Среднее нормальное давление по площади контакта для элемента корпуса с размерами (s,d) (см. формулу (4.18)):

$$p_{averadge}(s,d) = F_n(s,d)\cdot(b\cdot s) = 3{,}58/0{,}61\cdot0{,}68 = 8{,}6 \text{ МРа},\quad b < d.$$

Среднее нормальное давление на элемент корпуса можно использовать для определения t_{net} для судов полярных классов [2].

В этом случае $p_{averadge}(s,d)$ подставляется в формулу для определения t_{net} вместо ($AF*PPF_p*P_{avg}$), в качестве b — высота расчетного участка принимается b — протяженность (высота) зоны контакта обшивки с ледовым покровом, определенная в результате расчетов.

Пример 2. Определение расчетной схемы разрушения льда

Входные параметры:

1. Тип льда — однолетний лед.
2. Ускорение свободного падения g = 9,8 м/с^2.
3. Толщина ледового покрова h_{ice} = 70 см.
4. Угол входа ватерлинии $\alpha = 19°$.
5. Угол наклона батокса $\gamma = 41{,}43°$.
6. Угол наклона борта по нормали к обшивке $\beta' = 21{,}054°$.
7. Угол раствора льдины $\varphi = 160°$.
8. Плотность морской воды ρ_w = 1025 кг/м^3.
9. Коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}35$.
10. Коэффициент трения $fd = 0{,}1$.
11. Плотность льда ρ_{ice} = 0,92 г/см^3.

Выбор метода расчета осуществляется на основе следующего критерия:

$$(\mathrm{tg}(\beta') - f_d)\cdot p_0(h_{ice}) > B. \tag{5.14}$$

Если неравенство выполняется, то расчет ведется по предыдущей методике, в противном случае подключается расчет по сценарию взаимодействия прямостенного борта со льдом.

Контрольный параметр для однолетнего льда вычисляется по формуле

$$Parametr_{FYIce} = \{\mathrm{tg}(\beta) - fd\}\cdot p_0(h_{ice}). \tag{5.15}$$

Контрольное значение параметра на первом этапе (см. формулу (4.29)):

$$B = \frac{k_{ver}\left[0{,}77\,\frac{w_0}{L_{typical}} + 1{,}11\,\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{0{,}4225\,k_{scale}(w_0)w_0}. \tag{5.16}$$

Контрольное значение параметра на втором этапе (уточнение длины контакта, см. формулу (4.33)):

$$B1 = \frac{k_{dyn}k_{ver}\left[0{,}77\,\frac{w_1}{L_{typical}} + 1{,}11\mathrm{tg}(\varphi/2)\right]\cdot\sigma_{bend}h_{ice}}{0{,}65k_{scale}(w_1)w_1}. \qquad (5.17)$$

Таблица 5-2

Результаты определения вида расчетной схемы разрушения льда

Угол наклона борта по нормали к наружной обшивке β, град.	Скорость *V*, уз.	B	B1	$Parameter_{FYIce}$	Вывод
21,054	1	0,2443	0,1796	1,298	Разр. изгибом
	2	0,2728	0,2319	1,298	Разр. изгибом
	3	0,2973	0,2871	1,298	Разр. изгибом
	4	0,3301	0,3526	1,298	Разр. изгибом
	5	0,3726	0,4291	1,298	Разр. изгибом
	6	0,4201	0,5128	1,298	Разр. изгибом
	7	0,4663	0,6003	1,298	Разр. изгибом
	8	0,5063	0,6909	1,298	Разр. изгибом
	9	0,5378	0,7855	1,298	Разр. изгибом
	10	0,561	0,8854	1,298	Разр. изгибом
18	1	0,2443	0,1792	1,0066	Разр. изгибом
	2	0,2728	0,2314	1,0066	Разр. изгибом
	3	0,2973	0,2862	1,0066	Разр. изгибом
	4	0,3301	0,3501	1,0066	Разр. изгибом
	5	0,3726	0,4254	1,0066	Разр. изгибом
	6	0,4201	0,5065	1,0066	Разр. изгибом
	7	0,4663	0,591	1,0066	Разр. изгибом
	8	0,5063	0,6786	1,0066	Разр. изгибом
	9	0,5378	0,7704	1,0066	Разр. изгибом
	10	0,561	0,8674	1,0066	Разр. изгибом
15	1	0,2443	0,1786	0,7383	Разр. изгибом
	2	0,2728	0,2306	0,7383	Разр. изгибом
	3	0,2973	0,285	0,7383	Разр. изгибом
	4	0,3301	0,348	0,7383	Разр. изгибом
	5	0,3726	0,4201	0,7383	Разр. изгибом
	6	0,4201	0,4977	0,7383	Разр. изгибом
	7	0,4663	0,5784	0,7383	Разр. изгибом
	8	0,5063	0,662	0,7383	Разр. изгибом
	9	0,5378	0,75	0,7383	Прямостенный борт
	10	0,561	0,8433	0,7383	Прямостенный борт

Продолжение табл. 5-2

Угол наклона борта по нормали к наружной обшивке β, град.	Скорость V, уз.	B	B1	$Parameter_{FYIce}$	Вывод
12	1	0,2443	0,1775	0,4857	Разр. изгибом
	2	0,2728	0,2293	0,4857	Разр. изгибом
	3	0,2973	0,2827	0,4857	Разр. изгибом
	4	0,3301	0,3434	0,4857	Разр. изгибом
	5	0,3726	0,4114	0,4857	Разр. изгибом
	6	0,4201	0,4837	0,4857	Разр. изгибом
	7	0,4663	0,5585	0,4857	Прямостенный борт
	8	0,5063	0,6365	0,4857	Прямостенный борт
	9	0,5378	0,719	0,4857	Прямостенный борт
	10	0,561	0,8071	0,4857	Прямостенный борт
9	1	0,2443	0,1745	0,2472	Разр. изгибом
	2	0,2728	0,2256	0,2472	Разр. изгибом
	3	0,2973	0,2772	0,2472	Прямостенный борт
	4	0,3301	0,3331	0,2472	Прямостенный борт
	5	0,3726	0,3932	0,2472	Прямостенный борт
	6	0,4201	0,456	0,2472	Прямостенный борт
	7	0,4663	0,5213	0,2472	Прямостенный борт
	8	0,5063	0,5902	0,2472	Прямостенный борт
	9	0,5378	0,6642	0,2472	Прямостенный борт

Пример 3. Расчет параметров взаимодействия прямостенного борта со льдом

Исходные данные:

1. Масса судна $M = 3{,}5$ кт.
2. Ледовый класс судна — **Arc** 7.
3. Минимальная расчетная скорость хода судна $V_{\min} = 1$ уз.
4. Максимальная расчетная скорость хода судна $V_{\max} = 10$ уз.
5. Тип льда — однолетний лед, зимне-весенняя навигация.
6. Минимальная температура льда -45 °С, среднемесячная температура $-32{,}5$ °С.
7. Ускорение свободного падения $g = 9{,}8$ м/с^2 .
8. Толщина ледового покрова $h_{ice} = 70$ см.
9. Угол входа ватерлинии $\alpha = 19°$.
10. Угол наклона батокса $\gamma = 41{,}43°$.
11. Угол наклона борта по нормали к обшивке $\beta' = 0°$.

12. Угол раствора льдины $\varphi = 160°$.
13. Плотность морской воды $p_w = 1025$ кг/м^3.
14. Коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}35$.
15. Коэффициент трения $f_d = 0{,}1$.
16. Плотность льда $\rho_{ice} = 0{,}92$ г/см^3.
17. Шпация *Space* = 0,35 м.
18. Высота ледовой нагрузки $b = (0{,}65h_{ice})/\cos(\beta') = 0{,}455$ м.

Для поиска параметров зоны контакта и определения интегральной ледовой нагрузки необходимо использовать энергетическое уравнение

$$\frac{m(V\cdot 0{,}5144\cdot\sin(\alpha))^2}{2} = \int_0^{\xi} F d\xi, \tag{5.18}$$

где m — масса судна, кт (с учетом присоединенных масс). Присоединенные массы рекомендуется принимать как 5 % от массы судна;
V — скорость судна, уз.;
α — угол входа ватерлинии, рад.;
ξ — локальная координата глубины внедрения борта в ледовое образование.

Выражение для силы запишется следующим образом:

$$F_i = p\cdot(h_{ice})\cdot k_{scale}(w), \tag{5.19}$$

где $p(h_{ice})$ — среднеинтегральное давление по высоте зоны контакта, значение которой определяется как $h = 0{,}65h_{ice}$.

Среднеинтегральное давление определяется через свойства льда (распределение температуры по толщине, соленость, пористость). Определяется как среднее по участку равноудаленному от середины льда.

Высота ледовой нагрузки по элементу корпуса b определяется по формуле

$$b = \frac{0{,}65h_{ice}}{\cos(\beta')}; \tag{5.20}$$

Характерная длина контакта является функцией от локальной координаты глубины внедрения борта в ледовое образование и определяется по формуле (4.38):

$$w = 2\xi\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2). \tag{5.21}$$

Масштабный коэффициент так же выражается через локальную координату глубины внедрения ξ:

$$k_{scale}(\xi) = 0{,}7853\exp\left(-\frac{2\xi\,\mathrm{tg}(\varphi/2)}{1{,}99}\right) + 0{,}2146. \qquad (5.22)$$

В результате нахождения первообразной правой части равенства (4.34) получим выражение следующего вида, одним из корней которого и является истинная глубина внедрения.

$$\frac{C_1}{C_2^2} = [e^{C_2\xi}\cdot(C_2\xi - 1) + 1] + C_3\xi^2 - \frac{m(V\cdot 0{,}5144\cdot\sin(\alpha))^2}{2} = 0,$$

где $C_1 = 1{,}0209p(h_{ice})\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)\dfrac{h_{ice}}{\cos(\beta')} = 19{,}0695;$

$C_2 = -1{,}005p(h_{ice})\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2) = -5{,}6996;$

$C_3 = 0{,}1395p(h_{ice})\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)\dfrac{h_{ice}}{\cos(\beta')} = 2{,}6057.$

Искомая глубина внедрения в лед при минимальной и максимальной расчетных скоростях:

ξ_{min} = 0,05м;

ξ_{max} = 0,09 м.

Длина контакта, вычисленная при минимальной и максимальной глубинах внедрения:

w_{min} = 0,56м;

W_{max} = 10,20 м.

Интегральная сила, вычисленная при минимальной и максимальной глубинах внедрения:

$$F = p(h_{Ice})\cdot w\cdot b\cdot k_{scale}(w); \qquad (5.23)$$

F_{min} = 0,56 МН;

F_{max} = 8,8 МН.

Нормальная сила в пересчете на шпацию находится по формуле

$$F_{Space} = p(h_{Ice})\cdot b\cdot Space\cdot k_{scale}(Space); \qquad (5.24)$$

$$k_{scale}(Space) = 0{,}78853\exp\left[-\frac{2Space\cdot\mathrm{tg}(\varphi/2)}{\theta}\right] + 0{,}2146;$$

где $Space$ — размер шпации, м;
$k_{scale}(Space)$ — значение масштабный коэффициента в пересчете на шпацию;
b — высота ледовой нагрузки.

Нормальная сила в пересчете на шпацию определяется по формуле

$$F_{Space} = p(h_{ice})\cdot b\cdot Space\cdot k_{scale}(Space); \quad (5.25)$$

F_{Space} = 0,92 МН.

Среднее нормальное давление по площади контакта для элемента корпуса с размерами: $Space$ — длина контакта, b — высота ледовой нагрузки, если она меньше чем характерный пролет шпангоута, определяется (если высота нагрузки больше характерного пролета шпангоута следует принять ее равной пролету) по формуле

$$p_{Space} = \frac{F_{space}}{b\cdot Space}. \quad (5.26)$$

Локальное давление на элемент корпуса, определенное по формуле (5.26), принимается равным:

p_{Space} = 4,7934 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Часть II «Корпус», Правила классификации и постройки морских судов, 2016.
2. Часть XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна», Правила классификации и постройки морских судов, 2016.
3. Научно-технический отчет по договору № РС-4/2015 от 24.03.2015 «Разработка методики и доработка программного обеспечения Anchored Structures для расчета ледовых нагрузок на суда и плавучие сооружения, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС». Работа выполнялась лабораторией «Пропульсивные комплексы судов» под руководством зав. лаб., д.т.н. А.В. Андрюшина, АО «ЦНИИМФ», 2015.
4. Курдюмов В.А. Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед — Прикладная механика, том XII, № 10, 1976.
5. Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б., Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Санкт-Петербург. Российский морской регистр судоходства. Науч.-техн. сб. — 2002. Вып. 25. С. 83 — 100.
6. Soininen H. A propeller-ice contact model Dissertation for the degree of Doctor of Technology // VTT technical research centre of Finland. Espoo. 1988. 116 p.
7. Андрюшин А.В. Ледовые нагрузки для расчета местной прочности лопастей ледокольных гребных винтов // Российский морской регистр судоходства. — Научно-технический сборник № 26. — Санкт-Петербург. — 2003. — с. 93 — 107.
8. Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия морских платформ с различными типами ледовых образований и разработка на этой основе нормативно-технической документации, определяющей свойства льда и ледовых образований и по расчету глобальных ледовых нагрузок на шельфовые сооружения — Крыловский государственный научный центр, тема А-Х-258, отчет 38538, 1996.
9. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы. — Ленинград, 1980.
10. Weeks F.W. On sea ice — University Alaska Press, 2010.
11. Rihter J.A. and Cox G.F.N. Confined compression strength of multi-year pressure ridge sea ice samples.

12. Научно-технический отчет по договору № РС-4/2015 от 24.03.2015 «Разработка методики и доработка программного обеспечения Anchored Structures для расчета ледовых нагрузок на суда и плавучие сооружения, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС». Этап 2. Совершенствование методов расчета ледовых нагрузок на суда, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС. Совершенствование методик и программного обеспечения для расчета глобальных ледовых нагрузок на плавучие сооружения, включая суда ледового плавания — АО «ЦНИИМФ», 2015.
13. Научно-технический отчет по договору № РС-4/2015 от 24.03.2015 «Разработка методики и доработка программного обеспечения Anchored Structures для расчета ледовых нагрузок на суда и плавучие сооружения, форма корпуса которых отличается от регламентируемой Правилами РС». Этап 1. Разработка уточненной методологии определения прочностных характеристик ледовых образований, определяющих ледовое силовое воздействие на корпус судна и плавучие сооружения — АО «ЦНИИМФ», 2015.
14. DNV Rules, Pt. 5 Ch. Sec. 4, D400.

Российский морской регистр судоходства

Сборник нормативно-методических материалов
Книга двадцать пятая

Ответственный за выпуск *А. В. Зухарь*
Главный редактор *М. Р. Маркушина*
Компьютерная верстка *И. И. Лазарев*

Подписано в печать 03.10.17. Формат 60 × 84/16. Гарнитура Тайме.
Усл. печ. л. 3,6. Уч.-изд. л. 3,3. Тираж 100. Заказ 2017-16.

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8

gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru