

**Приложение А**  
**(рекомендуемое)**

**Дополнительная информация и рекомендации**

**А.1 Область применения**

Руководство отсутствует.

**А.2 Нормативные ссылки**

Руководство отсутствует.

**А.3 Термины и определения**

Руководство отсутствует.

**А.4 Обозначения и сокращения**

К обозначениям, перечисленным в 4.1 настоящего стандарта, дополнений не предложено. В этом приложении используются дополнительные обозначения, приведенные ниже. Они приводятся также в тексте при их использовании для однозначной трактовки применяемого обозначения, если у него есть несколько значений.

- $A$  – фактическая площадь контакта между льдом и сооружением;
- $A_N$  – номинальная площадь контакта между льдом и сооружением;
- $\bar{A}$  – средняя площадь льдины;
- $A_L$  – площадь локального контакта;
- $A_0$  – площадь приложения давления льда, отвечающего глобальной нагрузке;
- $a$  – постоянная, зависящая от локальных природных условий – ветра, течений и снежного покрова;
- $a$  – коэффициент, определяющий локальную форму льда;
- $a$  – высота зоны нагружения при локальном воздействии льда;
- $a_d$  – шаг ферм при расчете на локальную ледовую нагрузку;
- $B$  – ширина балки;
- $b$  – эмпирическое значение коэффициента теплопроводности;
- $b$  – коэффициент, определяющий локальную формы льда;

$b$  – расчетная длина балки;

$b_k$  – ширина киля тороса в нижнем сечении;

$C_A$  – коэффициент локальной формы ледяного образования;

$Ca$  – число Коши;

$C_{FDD}$  – сумма отрицательных градусо-дней;

$C_h$  – характеристика прочности льда при ударном воздействии льдины;

$C_i$  – характеристика прочности льда;

$C_{ir}$  – коэффициент эксплуатационной нагрузки для ледовой дороги;

$C_N$  – доля морской поверхности, покрытая плавучим льдом (сплоченность льда);

$C_P$  – коэффициент в уравнении для расчета давления льда;

$C_R$  – характеристика прочности льда;

$C_{R0}$  – характеристика прочности льда для региона, используемого в качестве эталонного;

$C_w$  – коэффициент локальной формы плоского ледяного образования в зоне контакта;

$c$  – эффективное удельное сцепление ледяных обломков;

$c$  – удельное сцепление льда в нижней части ледяного острова;

$c_{ice,aw}$  – удельное сцепление льда в надводной части ледяного острова;

$c_{soil}$  – удельное сцепление грунта;

$D$  – ширина (характерный размер в плане) ледяного образования;

$\bar{D}$  – средняя ширина ледяных образований в регионе;

$D_A$  – коэффициент локальной формы ледяного образования;

$D_c$  – диаметр ядра ледяного острова;

$D_{ice}$  – суммарная поврежденность сооружения, обусловленная воздействием льда;

$D_i^k$  – поврежденность сооружения, обусловленная воздействием льда в рамках сценария  $k$ ;

$D_P$  – коэффициент в уравнении для расчета давления льда;

- $D_w$  – коэффициент локальной формы плоского ледяного образования в зоне контакта;
- $D_{1,2}$  – коэффициенты, характеризующие локальную форму плоского ледяного образования в зоне контакта;
- $d$  – глубина воды;
- $d$  – ширина (характерный размер в плане) ледяного образования;
- $E$  – модуль упругости льда;
- $E_f$  – модуль упругости льда при изгибе;
- $E_K$  – пониженное значение кинетической энергии ледяного образования вследствие вращения при ударе;
- $E_0$  – начальная кинетическая энергия ледяного образования;
- $E_0$  – модуль упругости пресноводного льда;
- $E_1$  – эллиптический интеграл первого рода;
- $E_2$  – эллиптический интеграл второго рода;
- $e$  – единичный акт воздействия льда, событие;
- $e$  – пористость ледяного нагромождения;
- $f_X(x)$  – функция плотности вероятности случайной величины  $X$ , вычисленная при значении аргумента  $x$ ;
- $F$  – ледовая нагрузка;
- $F$  – нагрузка от киля тороса при пропахивании;
- $F$  – нагрузка, приложенная к свободному концу консоли;
- $F_b$  – разрушающая нагрузка;
- $F_B$  – предельная нагрузка торошения;
- $F_c$  – нагрузка, порождаемая воздействием консолидированной части тороса;
- $F_E$  – значение нагрузки в конце столкновения с ледяным образованием;
- $F_G$  – глобальная ледовая нагрузка по нормали к поверхности;
- $F_H$  – горизонтальная компонента ледовой нагрузки;
- $F_{ii}$  – нагрузка от пакового льда на ледяной остров;
- $F_k$  – нагрузка, порождаемая воздействием киля тороса;
- $F_L$  – локальная ледовая нагрузка;

$F_{\max}$  – максимальное значение ледовой нагрузки;

$F_{\min}$  – минимальное значение ледовой нагрузки;

$F_N$  – компонента нагрузки по нормали к поверхности контакта;

$F_R$  – нагрузка от воздействия ледяного тороса;

$Fr$  – число Фруда;

$F_S$  – глобальная ледовая нагрузка на многоопорное сооружение учетом взаимовлияния опор;

$F_T$  – тангенциальная компонента нагрузки (сила трения) при установившемся движении;

$F_V$  – вертикальная компонента ледовой нагрузки;

$F_X(x)$  – функция распределения случайной величины  $X$ , вычисленная при значении аргумента  $x$ ;

$F_1$  – ледовая нагрузка на одну опору многоопорного сооружения;

$F_0$  – пиковое значение ледовой нагрузки в цикле нагружения;

$F_1, F_2, \dots, F_m$  – функции распределения для отдельных сценариев;

$\Delta F$  – размах значений ледовой нагрузки в цикле нагружения;

$f$  – геометрический параметр для сооружения конической формы;

$f$  – частота;

$f_n$  – частота собственных колебаний;

$G$  – параметр в выражении для расчета компоненты нагрузки, порождаемой разрушением льда, при воздействии на сооружение конической формы;

$g$  – ускорение свободного падения;

$g_r$  – геометрический параметр для сооружения конической формы;

$H_B$  – горизонтальная компонента ледовой нагрузки, порождаемая разрушением льда (для сооружения конической формы);

$H_k$  – осадка киля;

$H_L$  – составляющая нагрузки, необходимая для поднятия ледяных обломков на поверхность надвигающегося ледяного покрова перед его разрушением (для сооружения конической формы);

- $H_P$  – составляющая нагрузки, необходимая для продвижения надвигающегося ледяного покрова сквозь нагромождение обломков (для сооружения конической формы);
- $H_R$  – горизонтальная компонента ледовой нагрузки, порождаемая наплывом обломков льда на наклонную поверхность сооружения конусной формы;
- $H_R$  – составляющая нагрузки, необходимая для проталкивания ледяных обломков вверх по наклонной поверхности сквозь ледяное нагромождение (для сооружения конической формы);
- $H_s$  – высота паруса;
- $H_T$  – компонента нагрузки, необходимая для поворота ледяных обломков в верхней точке наклонной поверхности (для сооружения конической формы);
- $h$  – толщина льда;
- $h_c$  – толщина консолидированного слоя;
- $h_E$  – нормативное значение толщины льда для определения ледовой нагрузки экстремального уровня (ELIE);
- $h_{fb}$  – высота надводной части острова;
- $h_k$  – расстояние между нижней границей консолидированного слоя и нижней точкой киля тороса;
- $h_r$  – толщина слоя льда, наплывающего на наклонную поверхность;
- $h_r$  – высота навала льда;
- $h_v$  – геометрический параметр для сооружения конической формы;
- $h_1$  – значение толщины льда 1 м, используемое как ссылочное;
- $h_0$  – начальная или известная толщина льда;
- $K_{lc}$  – вязкость разрушения;
- $k$  – коэффициент постели или реакция подстилающего слоя;
- $k_j$  – коэффициент, учитывающий образование ледяного затора (для многоопорных сооружений);
- $k_n$  – коэффициент, учитывающий неодновременность разрушения (для многоопорных сооружений);

- $k_s$  – коэффициент, учитывающий факторы экранирования и взаимовлияния (для многоопорных сооружений);
- $L$  – расстояние между опорами многоопорного сооружения;
- $L$  – длина;
- $L$  – длина балки;
- $L_c$  – нормативное значение протяженности ледяного поля;
- $l_b$  – характерный радиус изгиба в ледяном покрове;
- $l_c$  – общая длина круговой трещины;
- $M$  – масса;
- $M_n$  – модальная масса (в динамическом расчете);
- $m$  – эмпирический коэффициент в выражении для определения глобальной прочности льда;
- $m$  – эмпирический коэффициент, зависящий от толщины снежного покрова (при определении толщины льда);
- $m$  – количество учитываемых сценариев;
- $N$  – компонента нагрузки, ориентированная по нормали к поверхности сооружения;
- $N_c$  – константа в выражении для определения несущей способности;
- $n$  – количество событий;
- $n$  – эмпирический коэффициент в выражении для определения глобальной прочности льда;
- $n$  – количество опор многоопорного сооружения;
- $n$  – количество панелей;
- $n$  – количество параметров;
- $n$  – количество слоев льда;
- $n_r$  – количество реализаций;
- $P$  – вероятность или вероятность наступления события в течение года;
- $P$  – приложенная нагрузка или воздействие;
- $P$  – удельная нагрузка для конической конструкции (на единицу ширины);
- $P$  – прочность ледяного покрова;

- $P_0$  – исходная нагрузка;
- $p$  – давление льда;
- $p_D$  – удельная нагрузка торошения (на единицу ширины);
- $p_F$  – эффективное давление (в пределах всей толщины льда);
- $p_G$  – эффективное давление льда, соответствующее глобальной нагрузке (усредненное по номинальной площади контакта);
- $p_L$  – локальное давление льда;
- $p_T$  – удельная нагрузка от температурного расширения льда (на единицу ширины);
- $p_u$  – предел прочности льда при испытании в скважине;
- $p_0$  – среднее глобальное давление;
- $p_0^P$  – приведенное глобальное давление, прикладываемое вне участка, на котором приложено локальное давление;
- $Q$  – переменная нагрузка;
- $q$  – несущая способность на единицу площади;
- $q(\dots)$  – заданная функция;
- $q$  – интенсивность воздействия, выраженная в долях от максимального значения;
- $R$  – коэффициент в формуле для расчета нагрузки торошения;
- $R_{ii}$  – сопротивление ледового острова воздействию льда
- $r_c$  – радиус нагруженной зоны;
- $r_T$  – интенсивность повышения температуры;
- $r_y$  – радиус инерции ледяного образования относительно горизонтальной оси;
- $r_z$  – радиус инерции ледяного образования относительно вертикальной оси
- $S$  – соленость льда;
- $s_{\min}$  – коэффициент для нижней оценки прочности льда на сжатие при испытании в скважине;
- $s_{\max}$  – коэффициент для верхней оценки прочности льда на сжатие при испытании в скважине
- $s_u$  – нормативное значение сопротивления недренированному сдвигу;

- $T$  – температура льда;
- $T$  – длительность ледового воздействия;
- $T_a$  – среднесуточная температура воздуха;
- $T_b$  – температура замерзания воды;
- $T_i$  – температура льда;
- $t$  – время;
- $u$  – параметр интегрирования;
- $u$  – перемещение сооружения;
- $V$  – объем;
- $V$  – скорость дрейфа льда;
- $V_B$  – вертикальная нагрузка на сооружение конической формы при разрушении льда;
- $V_j$  – дискретные события в течение года, связанные с ледовыми воздействиями;
- $V_R$  – вертикальная нагрузка на сооружение конической формы, порождаемая наплывом льда;
- $v$  – скорость дрейфа льда;
- $v$  – скорость движения транспортного средства;
- $v$  – средняя по региону скорость дрейфа льда;
- $v_b$  – объемная доля рассола;
- $v_c$  – критическое значение скорости транспортного средства по льду, соответствующее максимальному динамическому усилению;
- $v_T$  – общая объемная доля пустот – рассола и воздуха;
- $v_t$  – наибольшая скорость дрейфа льда, при которой могут возникнуть условия для автоколебаний;
- $W$  – параметр в формуле расчета веса ледяного нагромождения на поверхности сооружения конической формы;
- $W_{ii}$  – вес в воде ледового острова, опирающегося на дно;
- $w$  – ширина конструкции;
- $w_L$  – ширина нагруженной зоны при действии локальной ледовой нагрузки;
- $w_T$  – диаметр верхнего сечения опоры конической формы;



- $x$  – параметр в формуле для определения ледовой нагрузки на сооружения конической формы;
- $x$  – расстояние от точки приложения нагрузки;
- $X_{1,E}$  – значение случайной переменной, используемой для расчета ледовой нагрузки экстремального уровня (ELIE);
- $X_{1,A}$  – значение случайной переменной, используемой для расчета ледовой нагрузки аномального уровня (ALIE);
- $X_j$  – значение переменной;
- $X_{j,N}$  – номинальное значение переменной;
- $Y$  – коэффициент в уравнениях для расчета ледовой нагрузки на сооружение конической формы;
- $Y_{r1,E/A}, Y_{r2,E/A}, \dots, Y_{rm,E/A}$  – нормативные значения ледовых нагрузок, отвечающие экстремальному и аномальному уровню, соответственно;
- $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  – нагрузки, соответствующие разным сценариям;
- $Z$  – воздействие;
- $z$  – расстояние от срединной плоскости льда;
- $z$  – расстояние от нижней точки киля ледяного образования до дна;
- $z$  – воздействие;
- $z_E$  – нагрузка экстремального уровня;
- $z_A$  – нагрузка аномального уровня;
- $z_{r,E}$  – нормативное значение ледовой нагрузки, соответствующее экстремальному уровню;
- $z_{r,A}$  – нормативное значение ледовой нагрузки, соответствующее аномального уровня;
- $z_{r,\alpha}$  – нормативное значение ледовой нагрузки, соответствующее обеспеченности (вероятности превышения в течение года)  $\alpha$ ;
- $\alpha$  – обеспеченность (вероятность превышения в течение года);
- $\alpha$  – наклон поверхности сооружения к горизонтали;
- $\alpha$  – коэффициент, учитывающий уменьшение давления льда с ростом площади;

- $\alpha_k$  — угол ската киля тороса;
- $\Delta$  — прогиб балки;
- $\delta$  — глубина внедрения конструкции в лед;
- $\delta$  — отклонение, смещение;
- $\delta_0$  — начальное отклонение;
- $\varepsilon$  — скорость деформации;
- $\varepsilon_y$  — эксцентриситет в горизонтальной плоскости;
- $\varepsilon_z$  — эксцентриситет в вертикальной плоскости;
- $\eta$  — среднегодовая частота столкновений;
- $\phi$  — эффективный угол внутреннего трения в среде из ледяных обломков;
- $\phi$  — эффективный угол внутреннего трения в нижней части ледяного острова;
- $\phi'$  — нормативное значение угла внутреннего трения;
- $\phi_{ice,aw}$  — угол внутреннего трения для надводной части ледяного острова, построенного методом набрызгивания;
- $\phi_{is}$  — угол внутреннего трения на границе лед — грунт;
- $\phi_{nC}$  — ненормализованная модальная амплитуда в точке приложения ледовой нагрузки;
- $\gamma_e$  — приведенная плавучесть, выраженная через удельный вес;
- $\gamma_i$  — удельный вес льда в надводной части ледяного острова, построенного методом набрызгивания;
- $\gamma_{is}$  — удельный вес льда в подводной части ледяного острова, построенного методом набрызгивания;
- $\gamma_L$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения давления по толщине льда;
- $\gamma_v$  — коэффициент, связывающий частоту нагружения и максимальную скорость дрейфа льда при автоколебаниях;
- $\gamma_w$  — удельный вес морской воды;
- $\lambda$  — геометрический масштабный коэффициент;
- $\mu$  — интенсивность ледовых воздействий, выраженная как количество столкновений год;

- $\mu$  — коэффициент трения скольжения льда по поверхности сооружения;
- $\mu_i$  — коэффициент трения скольжения льда по льду;
- $\mu_\phi$  — коэффициент пассивного давления для среды из ледяных обломков;
- $\nu$  — коэффициент Пуассона для льда, обычно 0,3;
- $\rho_A$  — пространственная плотность ледяных образований;
- $\rho_i$  — плотность льда;
- $\rho_w$  — плотность воды;
- $\sigma$  — измеренный или прогнозируемый показатель прочности;
- $\sigma$  — нормальное давление;
- $\sigma_c$  — прочность при одноосном сжатии;
- $\sigma_D$  — среднеквадратичное отклонение диаметра (размера в плане) дрейфующих льдин;
- $\sigma_{edge}$  — максимально допустимое напряжение изгиба при приложении нагрузки на краю льдины;
- $\sigma_f$  — прочность льда при изгибе;
- $\sigma_{is}$  — нормальное напряжение от веса льда;
- $\sigma_{max}$  — максимальное напряжение изгиба в ледяной пластине;
- $\sigma_t$  — прочность на растяжение;
- $\sigma_x$  — напряжение изгиба в крайнем слое на расстоянии  $x$  от точки приложения нагрузки;
- $\sigma_0$  — показатель прочности льда для региона, используемого в качестве эталонного;
- $\tau$  — сдвиговая прочность;
- $\tau$  — длительность цикла нагрузка — разгрузка;
- $\tau_{ice,aw}$  — сдвиговая прочность льда в надводной части ледяного острова, построенного методом набрызгивания;
- $\tau_{ice,bw}$  — сдвиговая прочность льда в подводной части ледяного острова, построенного методом набрызгивания;
- $\tau_{is}$  — сдвиговая прочность льда;
- $\theta$  — угол склона навала льда к горизонту;

$\theta$  – коэффициент демпфирования;

$\theta_k$  – угол ската киля тороса к горизонту;

$\xi$  – параметр, характеризующий соотношение между горизонтальной и вертикальной компонентами ледовой нагрузки;

$\xi_n$  – относительный коэффициент демпфирования для  $n$ -ой собственной моды колебаний, выраженный в долях от критического значения.

## **A.5. Общие требования и условия**

### **A.5.1 Основные требования**

Руководство отсутствует.

### **A.5.2 Методы проектирования**

Руководство отсутствует.

### **A.5.3 Учет условий на площадке строительства**

#### **A.5.3.1 Общие положения**

Руководство отсутствует.

#### **A.5.3.2 Долгосрочные изменения климата**

Факт изменения климата подтверждается Рабочей Группой 1 Межправительственного Совета по Изменению Климата (IPCC). Подробности можно найти в Отчете IPCC [1].

#### **A.5.3.3 Конструктивные особенности**

Руководство отсутствует.

#### **A.5.3.4 Подготовка к зимним условиям**

Руководство отсутствует.

### **A.5.4 Строительство, транспортировка и монтаж**

Руководство отсутствует.

### **A.5.5 Сочетания нагрузок**

Руководство отсутствует.

### **A.5.6 Защита окружающей среды**

На большинстве морских платформ в дополнение к некоторому количеству перерабатываемых углеводородных жидкостей применяются жидкости, используемые в качестве топлива. Кроме того, находящаяся в резервуарах

246

переработанная вода может содержать углеводороды. Балластная вода, используемая во время транспортировки и позиционирования установки, может содержать микроорганизмы, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

С целью предотвращения негативного воздействия на окружающую среду особое внимание следует уделить жидкостям и материалам, используемым для ввода сооружения в эксплуатацию.

Для изоляции балластных резервуаров для воды, располагаемых над многолетней мерзлотой, успешно применяется технология двойных перегородок в нижней части конструкции.

### **A.5.7 Вибрация и условия работы**

В стандартах серии ИСО 2631 [2-5] рассматривается воздействие вибрации на состояние человека с целью определения уровня комфорта и раздражающего воздействия данного фактора на персонал сооружения, см. справочные источники [2-5]. Циклические ледовые нагрузки, которые потенциально могут привести к возникновению вибрации сооружения, рассматриваются в A.8.2.6 (Приложение А).

### **A.1 Физические условия окружающей среды**

#### **A.6.1 Общие положения**

Руководство отсутствует.

#### **A.6.2 Световой день**

В зависимости от широты количество часов светлого времени суток может колебаться от нулевого значения в зимнее время года до 24 часов в летний период. На работу платформы и операции по ее снабжению может оказывать влияние отсутствие солнечного света, а необходимое освещение является требованием безопасности. Таблицы и рисунки, показывающие часы светлого времени суток по широте и по месяцам, приведены в нескольких публикациях, рисунок 23 в [6].

#### **A.6.3 Метеорология**

##### **A.6.3.1 Температура воздуха**

Температура воздуха является необходимым параметром не только в расчетах морской конструкции, но также в повседневной работе. Важно включить этот

параметр в устройства, проводящие гидрометеорологические измерения в реальном режиме времени и снабженные дисплеем, установленные в определенных местах.

### **А.6.3.2 Ветер**

В стандарте ИСО 19901-1 приводится информация по ветровым нагрузкам и их воздействию, профилям и спектрам ветра.

### **А.6.3.3 Ветровое охлаждение**

Начиная с 2001 года, метеорологические учреждения США и Канады применяют новые коэффициенты по ветровому охлаждению [7]. Новый подход учитывает современную теорию переноса тепла, используя в модели стандартную устойчивость кожи человеческого лица к охлаждению. Наибольшее значение имеет тот факт, что в новой формуле расчета ветрового охлаждения продолжают использоваться входные данные о скорости ветра на высоте 10 м (стандартная высота анемометра), однако при этом применяется поправочный коэффициент для корректировки данной скорости ветра на высоту человеческого лица (1,5 м над уровнем грунта).

См. дополнительное описание в [8].

### **А.6.3.4 Атмосферные осадки и снег**

В стандарте ИСО 19901-1 приводится общая информация по накоплению снега на зданиях и верхнем строении. При отсутствии специальной информации можно предположить, что плотность свежего снега составляет  $100 \text{ кг/м}^3$ .

### **А.6.3.5 Обледенение**

#### **А.6.3.5.1 Общие положения**

Обледенение на морских сооружениях происходит при наличии воды или влаги на поверхностях над уровнем моря и температурах, ниже температуры замерзания. Существует два основных типа морского обледенения: атмосферное и брызговое.

#### **А.6.3.5.2 Атмосферное обледенение**

Атмосферное обледенение возникает за счет атмосферных осадков. Сухой снег обычно не прилипает к поверхности и сам по себе он представляет небольшую опасность. Плотность выпавшего снега может быть низкой и составлять  $100 \text{ кг/м}^3$ ,  
248

тогда как плотность льда будет составлять около  $900 \text{ кг/м}^3$ . Если брызги воды или ледяной дождь смочит снег, то мокрый снег примерзает к поверхности. Образованный таким образом лед является пористым с низкой механической прочностью и его обычно можно удалить. И напротив переохлажденная вода при контакте с холодной поверхностью замерзает до твердого состояния. Сильное переохлаждение происходит при достижении жидкой фазы температуры ниже точки замерзания. Сильно переохлажденные капли существуют в форме морозной дымки, сильно охлажденного тумана или замерзающего дождя и сморози. Эти явления относятся к наиболее вероятным источникам атмосферного обледенения.

Мнения относительно значимости атмосферного обледенения различаются. Атмосферное обледенение может создать равномерный слой льда на всех поверхностях сооружения, начиная от нескольких метров над уровнем воды. Замерзающий дождь может смачивать только верхние или подветренные поверхности; относительно трубных элементов можно предположить, что он покрывает половину окружности. Само по себе атмосферное обледенение может не вызывать больших конструктивных изменений, хотя его эксплуатационные последствия являются суровыми. Если атмосферное обледенение происходит одновременно с брызговым, то это вызывает ускорение нарастания льда. Последнее явление называется смешанным обледенением.

Атмосферное обледенение возможно в арктических и холодных морях в течение всего года. Обычно такое обледенение происходит при температурах воздуха от  $0^\circ\text{C}$  до минус  $20^\circ\text{C}$  и скорости ветра менее  $10 \text{ м/с}$ . В результате атмосферного обледенения на более высоких уровнях сооружения может образовываться слой льда толщиной от 10 до 20 мм, в редких случаях толщина слоя может достигать 60 мм. В случаях комбинированного морского и смешанного обледенения толщина льда может в некоторых случаях достигать 1 м.

Дальнейшее руководство по атмосферному обледенению приведено в стандарте ИСО 12494 [9].

Накопление льда от замерзающего дождя может оцениваться с использованием теоретических моделей, например, описанных в [10].

А.6.3.5.3 Брызговое обледенение

Образование льда при распылении морской воды происходит наиболее часто и является основной формой обледенения в море. Другой причиной обледенения является морская вода, которая поступает на палубу судна через нос или корму. Скрытой теплоты замерзания в этой воде, даже если температура находится около точки замерзания, достаточно, чтобы избежать намерзания, если она быстро стекает с судна. Эта вода дополнительно способствует таянию и смыванию льда, который уже образовался на палубе. Если обмерзнут шпигаты или поручни покроются льдом, вода может застаиваться и замерзать. Вероятность морского обледенения по высоте зависит от максимальной высоты сооружения и наличия отрицательных температур.

Морское брызговое обледенение формируется двумя способами. Наиболее важным обледенением является распыление морской воды, производимое судном или сооружением при его взаимодействии с волнами. Вторая форма образуется при срыве ветром капель воды с вершины волн, зависит от формы и крутизны волн и скорости ветра. Процесс начинает происходить при скорости ветра от 8 м/с до 10 м/с. Чем сильнее ветер, тем выше поднимаются брызги. Высота морского брызгового обледенения обычно ограничивается высотой 15–20 м над поверхностью моря, хотя имеются подтверждения образования обледенения на высоте до 60 м над поверхностью моря. Необходимы определенные диапазоны температуры воздуха, температуры воды и скорости ветра, чтобы происходило существенное накопление обледенения верхнего строения. Таковыми условиями являются:

- температура воздуха ниже точки замерзания морской воды (в зависимости от солености воды);
- скорость ветра 10 м/сек или более;
- температура морской воды ниже 8°C.

Сильный ветер, холодный воздух и холодная морская вода – все они вносят свой вклад в объем накопления льда. В арктических морях и других районах холодных климатических зон обледенение может происходить в течение всего года. Обледенение наиболее вероятно в конце осени или зимой, когда температуры



воздуха ниже нуля и на поверхности моря нет ледяного покрова. В целом, с середины зимы до середины лета замерзание соленой воды менее вероятно. С конца лета до середины зимы примерно половину всех случаев обледенения составляет брызговое обледенение. Большая часть остальных случаев обусловлена смешанным обледенением, одновременно брызговое и атмосферное обледенение.

Обледенение можно классифицировать по интенсивности, как медленное, быстрое и очень быстрое. В более широком смысле:

- медленное обледенение (скорость накопления льда менее 10 мм/час) происходит при температуре воздуха между 0°C и минус 3°C и любой скорости ветра, или при температуре воздуха минус 3°C и ниже, скорости ветра менее 7 м/с.
- быстрое обледенение (скорость накопления льда 10–30 мм/час) происходит при температуре воздуха между минус 3°C и минус 8°C и скорости ветра 7–15 м/с;
- очень быстрое обледенение (скорость накопления льда более 30 мм/час) происходит при температуре воздуха равной или ниже минус 8°C и скорости ветра более 15 м/с.

Скорость роста толщины льда также зависит от сооружения и его высоты над водой. Продолжительность обледенения превышает 12 часов в трех четвертях сообщенных случаев, а максимальная продолжительность составляет 7 суток. В период обледенения скорость медленного обледенения наблюдается в 20–40% случаев в прибрежных районах и 50–70% в центральных частях арктических морей. Скорость быстрого обледенения наблюдается в 1–5% случаев в южных частях, и до 10% в северных частях арктических морей. Эти величины увеличиваются примерно на 10% в последней части данного периода. Обледенение может накапливаться сериями из независимых процессов обледенения. Многое зависит от степени таяния и потери адгезии между процессами, а также от возможных контрмер.

Методика расчета морского обледенения описывается в [11], [12], [13] и [14].

А.6.3.5.4 Источник данных по атмосферному и морскому обледенению

Информацию по накоплению льда можно получить в климатологических атласах, по результатам замеров, произведенных в районах расположения буровых установок, на прибрежных станциях и судах. Дополнительные сведения помогают определить особую опасность площадки. В таблице А.6.1 приведен пример комплекса данных для точки на шельфе Норвегии.

Результаты анализа обледенения 3000 судов [16] показал, что в 86% случаев брызговое обледенение было единственной причиной нарастания льда. Распыление в сочетании с туманом, дождем или изморозью насчитывало до 6,4% случаев, распыление в сочетании со снегом составило 1,1%, а только туман, дождь или изморозь составили только 2,7%.

Таблица А.6.1 – Проверка ледовых нагрузок (из справочного источника [15])

Высота сооружения над уровнем моря, м	СЛУЧАЙ 1			СЛУЧАЙ 2	
	Брызговое обледенение			Обледенение от снега с дождем	
	толщина, мм (56°с.ш. - 68°с.ш.)	толщина, мм (>68°с.ш.)	плотность, кг/м <sup>3</sup>	толщина, мм	плотность, кг/м <sup>3</sup>
от 5 до 10	80	150	850	10	900
от 10 до 25	линейн. от 80 до 0	линейн. от 150 до 0	линейн. от 850 до 500	10	900
> 25	0	0	500	10	900

На рисунке 19 в [6] приведена номограмма, относящаяся к скорости обледенения верхнего строения рыболовных судов в зависимости от гидрометеорологических параметров. Поскольку нарастание льда не всегда коррелируется с высотой, то номограмма, основанная на данных, полученных с судов, не может служить надежной оценкой обледенения по высоте расположения морского оборудования. Это происходит потому, что рыболовные суда склонны избегать наихудших природных условий.

#### А.6.3.6 Видимость

Руководство отсутствует.

#### А.6.3.7 Полярные циклоны

Полярные циклоны формируются, когда холодный воздух, проходящий над более теплым воздухом, создает атмосферную неустойчивость, которая может так возрасти, что образуются центры низкого давления размером до нескольких сотен километров в диаметре. Это явление наблюдается главным образом в европейском секторе субарктической и арктической зон.

Большая часть полярных циклонов, оказывающих влияние на норвежские и российские воды, возникают в регионах, расположенных к югу от Шпицбергена (Svalbard) и к востоку от о-ва Ян Майена (Jan Mayen) и перемещаются в Баренцевом море в восточном направлении. Частота их возникновения в Баренцевом море

снижается от запада к востоку. Полярные циклоны, возникающие в районе Исландии – Гренландии (Iceland – Greenland), главным образом, оказывают влияние на Шотландию и Северное море. Наиболее часто полярные циклоны возникают с октября по март и в среднем от 5 до 10 полярных циклонов в этот период.

Важность полярных циклонов состоит в их интенсивности и скорости развития, так как эти параметры могут оказывать влияние на проведение работ. Их сложно обнаружить наземной наблюдательной сетью из-за редкости и небольшому размеру, поэтому их трудно прогнозировать. В связи с этим, дистанционное наблюдение со спутников становится наиболее важным инструментом обнаружения полярных циклонов и улучшения возможности прогнозирования их образования.

Во время перемещения полярного циклона, он растет в размере. Если он движется в южном направлении, то может в конечном итоге достигнуть таких размеров, что за ним можно наблюдать и делать прогнозы. Проблемы прогнозирования, поэтому, наиболее трудны на дальнем севере, и облегчаются с увеличением южной широты. Полярные циклоны движутся в южном направлении со скоростью ветра на большой высоте с некоторым снижением, вызванным трением у поверхности. Обычный диапазон скоростей развития составляет 5–12 м/с.

Результаты натурных измерений и исследований ветра и волн во время полярных циклонов показали, что скорость самого сильного наблюдавшегося ветра составляла 35 м/с и самая большая наблюдавшаяся высота волн составляла 10,5 м. Хотя ни одно из этих значений не попадает в диапазон расчетного уровня, но необходимо учитывать влияние полярных циклонов на проводимые операции. В некоторых случаях сила ветра и волны может возрастать с одинаковой скоростью, так как полярный циклон может перемещаться со скоростью, сравнимой со скоростью движения преобладающих волн. Волны, близкие к полностью развитым волнам (значительная высота волны  $H_s$  от 6 до 8 м), могут появиться приблизительно одновременно с началом сильных ветров, см. ИСО 19901-1.

Обычная продолжительность действия полярного циклона составляет от 1 до 6 часов, после чего погодные условия улучшаются, хотя температура обычно несколько ниже, чем до начала возникновения полярного циклона.

Частота и вероятность возникновения полярных циклонов может повлиять на смягчение арктического климата. При рассмотрении данных параметров следует предусмотреть допуск, учитывающий текущие изменения климата.

#### **А.6.4 Океанография**

##### **А.6.4.1 Глубина воды**

Руководство отсутствует.

##### **А.6.4.2 Волны**

Волнообразование в покрытых льдами морях снижено по сравнению с морями с открытой водой, поскольку ледяной покров снижает длину разгона волны. Расположение кромок льда и сплоченность льда должно учитываться при проведении волновых исследований или прогнозирования. Практический подход к волнообразованию заключается в ограничении дальнейшего роста волнения, когда сплоченность ледяного покрытия превышает определенное значение, как 50%.

Волнообразование уменьшается, когда волны входят в покрытый льдом регион. Кроме того волны ослабляются по мере их продвижения через покрытый льдом регион. Уровень волнообразования зависит от длины волны, сплоченности льда, размера ледяных полей и пройденного через льды расстояния. Были проведены исследования для изучения распространения волн в покрытых льдами каналах [17]. Фактические измерения распространения волн через ледяное поле [18] – [22] показали, что после прохода через тонкие и средние однолетние льды на расстояние более 300 км все еще наблюдаются волны с амплитудой, превышающей 1 м, при этом средняя амплитуда будет гораздо меньше. При рассмотрении колебания морского льда было обнаружено, что внутренние волны вызывали колебания на поверхности льда с периодичностью до 30 минут и с фазовой скоростью 2 м/с [23].

Теоретические модели затухания волн в покрытых льдами морях приведены в [24] и [25]. В последних версиях [26], [27] была обновлена информация о взаимодействии волн с морским льдом.

Глобально геофизическая роль взаимодействия волн со льдом имеет два аспекта: физическое влияние волн на ледяной покров и использование волн в качестве диагностического инструмента в механике льдов. Физическое влияние включает способность волн разбивать ледяной покров на поля и собирать эти поля в группы, которые определяют морфологию маргинальных ледовых зон (МЛЗ), разбивать столообразные айсберги, образовывать айсберги из языков льда и производить шум. Диагностическая роль происходит из широкого распространения энергии волн в форме изгибно-гравитационных волн, проходящих через ледяной покров и информацию, в которой уравнение дисперсии и скорость затухания определяются свойствами и механикой льда.

Поскольку волны движутся в МЛЗ, они приводят к изгибным деформациям дрейфующего ледяного покрова. В результате изгиб является причиной разрушения льда на фрагменты, которые сами снова разбиваются до тех пор, пока не устанавливается распределение размера полей с мелкими полями в самых крутых волнах около кромки льда. Образованные таким образом поля действуют как плита для дрейфующего льда, который смягчает волны с самым коротким периодом. Если ледяное поле является открытым и поля не сталкиваются, процесс затухания волн наилучшим образом можно описать моделью рассеяния [19, 27, 28]. Как только дрейфующий лед уплотняется, происходят столкновения полей и дрейфующий лед начинает вести себя с точки зрения гидродинамики, либо как концентрация очень крупных полей, либо как единичное поле. Поскольку поля больше не могут колебаться вместе с волнами, затухание энергии может происходить более значительно в форме потери вязкости от границы слоя, находящегося подо льдом.

Когда волны пересекли МЛЗ и достигли внутренней части дрейфующего льда или границы припайного льда, можно учитывать их дальнейшее распространение в качестве изгибно-гравитационной волны с измененной дисперсией, которая затем может стать эффективной при разламывании внутренних ледяных плит.

Наиболее полные измерения затухания волн, проходящих через ледяные поля в МЛЗ, описаны в [19, 20]. Основные заключения, полученные по результатам наблюдений:

- Затухание волн по расстоянию их прохождения в дрейфующем льду имеет форму экспоненты с коэффициентом затухания, уменьшающуюся с увеличением периода волны в большей части диапазона. В тяжелом сплошном льду (например, в восточной части Гренландии) коэффициент затухания обычно колеблется от  $2 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$  для самого длинного поднятия до  $8 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$  для волн с периодом от 8 до 9 с в соответствии с расстояниями е-складки от 5 до 1,2 км (расстояния, выше которых затухание составляет  $1/e$ ).
- Имеется ряд свидетельств о «перекачивании» в самые короткие периоды (менее чем от 6 до 8 с), где скорость затухания может фактически начать снижаться по мере того, как период волны становится короче.
- Спектр направлений увеличивается по протяженности внутри ледяного поля до того, как он станет существенно изотропным в пределах нескольких километров от кромки.
- Некоторые волны отражаются от внешней кромки ледяного поля только на несколько процентов, даже когда кромка является сплошной.

Общая проблема волнового разрушения льдов рассматривается в [29] и [30], теория также применялась к разрушению пластинчатых айсбергов [31]. В [32] описывается математическая модель распределения размера полей с течением времени при данной скорости разрушения льдов.

Предложен ряд механизмов волнового разрушения очень больших полей. Самый простой подход заключается в рассмотрении стоячих волн [33, 34]. Вторым возможным механизмом является вызванный ветром наклон [35], происходящий, когда ветер, дующий над большой ледяной плитой, вызывает наклон ее края. Периодическое растрескивание льда может вызывать изгибающие напряжения из-за наклона льда. На разламывание льда также может повлиять постепенное

уменьшение толщины морского льда, возникающее в процессе накопления усталости от постоянного воздействия океанских волн [36].

Явление, влияющее на береговое оборудование, искусственные острова и конструкции с низким надводным бортом, называется «ледовым штормом». Событие, происходящее при ветрах со стороны суши, возникает при низких сплоченностях морских льдов, выбрасываются на берег куски льда. Такие события наблюдались в заливе Нортон, море Бофорта и вдоль Северного морского пути в России.

#### **А.6.4.3 Океанские течения**

Информация об океанских течениях играет важную роль в прогнозировании движения льдов. В регионах с высокими приливными течениями в преобладающих направлениях период изменения прилива с одного направления на другое может вызвать значительное давление на ледяные поля со сплоченностью от 9/10 до 10/10, поскольку течение изменяет направление движения. При более низких сплоченностях льда это влияние сокращено до минимума. Результат этого явления, полученный при проведении морских работ в Охотском море, показывает, что давление оказывается существенным, из-за чего «застревают» ледоколы с мощностью двигателя от 10 до 12 МВт до тех пор, пока не ослабится давление льда после изменения направления течения.

В регионах с высокими скоростями приливных течений течение влияет не только на скорость, с которой происходит взаимодействие льдов с сооружением, но также на частоту, связанную с различными свойствами льда. Поэтому важны точные оценки ожидаемой скорости течений.

#### **А.6.4.4 Другие океанографические факторы**

##### **А.6.4.4.1 Морские образования**

Взаимодействие льдов с сооружениями удаляет морские образования. Можно предполагать, что полная очистка происходит до глубины, равной сумме высоты прилива и средней толщины ледяного поля, и частичная очистка до глубины, равной сумме высоты прилива и средней глубине киля тороса.



#### А.6.4.4.2 Цунами

Принять во внимание регионы, на которые может оказывать влияние цунами, потенциальную вероятность покрытия льдами и снижение высоты волн цунами по мере их приближения к берегу.

#### А.6.4.4.3 Растворенный кислород

Руководство отсутствует.

#### А.6.4.4.4 Температура и соленость воды

Руководство отсутствует.

### А.6.5 Морской лед и айсберги

#### А.6.5.1 Общие положения

При описании морских льдов и айсбергов следует использовать классификацию морских льдов по WMO [37].

##### *Рост льда*

Морской лед представляет собой сложный материал, состоящий из твердого льда (матрицы), рассола, воздуха и твердых солей, зависящих от температуры. Механизмы роста льда могут создавать несколько различных кристаллических структур в зависимости от преобладающих условий. Обычно структуры льда включают гранулированный, шуговый, столбчатый и непрерывный столбчатый лед. Особенности микроструктуры льда в значительной мере влияют на механические и физические свойства льда. Во время роста льда в нем находится некоторая часть солей, присутствующих в морской воде. К концу ледового сезона однолетний морской лед имеет соленость в диапазоне от 4 до 6 ‰. В Каспийском и Балтийском морях соленость льда близка к нулю. В многолетних льдах соленость также близка к нулю. Рассол, воздух и твердые соли обычно располагаются на межкристаллических границах между кристаллами льда. Благодаря наличию во льду солей, фазовые температурные соотношения различаются (см. например, Weeks и Ackley [40]).

При охлаждении слоя поверхности моря до температуры замерзания кристаллы льда образуют тонкий эластичный слой. Толщина этого слоя увеличивается из-за разности тепла, уходящего в атмосферу со льда, и поступающего в лед из моря. Поднимающийся поток тепла через лед

пропорционален теплопроводности льда и температурному градиенту, а тепло кристаллизации пропорционально массе образовавшегося льда. Уравнение теплового баланса, характеризующее соотношение между этими потоками на границе лед-вода, представлено в работе Доронина и Хейсина [41], Доронина [42]. В качестве примера приведена эмпирическая формула (Гудкович и др. [43]), которая учитывает влияние температуры воздуха и глубины снега на рост толщины льда:

$$h = -m + [(m+h_0)^2 - 405 \sum T_a]^{1/2}, \quad (\text{A.6.1})$$

где  $T_a$  – средняя суточная температура воздуха на высоте метеорологического укрытия, °C;

$m$  – эмпирический коэффициент, который зависит от глубины снега;

$h_0$  – толщина льда в начале периода, м;

$h$  – толщина льда в конце периода, м,

Суммирование  $T_a$  выполняется по количеству суток за период времени.

Накопленные градусо-дни замерзания ( $C_{FDD}$ ) для зимы характеризует суровость условий образования льда. Градусо-дни для данного дня представляют количество °C, при котором средняя температура ниже данной базовой температуры, в этом случае – точка замерзания воды. Количество дней температуры замерзания – эта сумма, полученная накоплением количества градусо-дней для зимы, представлена следующей формулой:

$$C_{FDD} = | \sum (T_a - T_b) |, \quad (\text{A.6.2})$$

где  $T_a$  – среднесуточная температура, °C;

$T_b$  – точка замерзания воды (минус 1,8°C для морской воды с соленостью 32 ‰, выше для морской воды с низкой солености), °C.

Подсчет выполнен для количества зимних суток.

Использованы только дни со средней температурой ниже температуры замерзания морской воды. Большинство национальных метеорологических служб имеют данные о максимальном накопленном количестве градусо-дней замерзания за периоды 20, 50 и 100 лет.

Максимальная скорость роста толщины льда в зимнее время года может быть выражена в следующем виде:

$$h = a C_{FDD}^b, \quad (\text{A.6.3})$$

где  $a$  – специальная константа, которая зависит от локальных ветров, течений и снежного покрытия (см. [11], в котором приводятся значения, типичные для Аляски; значения по другим регионам можно найти в литературе по заданному региону);  
 $b$  – коэффициент, который можно оценить по данным или предположить, что он равен 0,5 линейной теплопроводности в соответствии с уравнением Стефана.

Максимальная толщина термического нарастания ровного льда находится в пределах 2 м для арктических регионов. Поток тепла от воды оказывает существенное влияние на рост толщины льда. Когда поток тепла через воду равен потоку, проходящему через лед, рост толщины льда прекращается. Увеличение толщины конвекционного слоя охватывает лежащую ниже воду, которая обычно теплее, тем самым снижается скорость роста льда. Увеличение солёности, находящегося подо льдом слоя воды, снижает температуру замерзания и соответственно скорость роста. Пространственные различия в плотности воды по слоям и возникшая в результате разница в потоках тепла в период роста льда вносит свой вклад в пространственную неоднородность толщины льда [44].

#### *Солёность морского льда*

Для однолетнего морского льда солёность ( $S$ ) обычно выражается как доля веса солей, содержащихся в единице массы. Она обычно дается как отношение граммов на килограмм морской воды, что выражается в частях на тысячу (‰ или промилле). В морском льду солёность обычно несколько колеблется с толщиной ледяного поля. Эта зависимость солёности от глубины меняется в течение зимы, поскольку соль во льду мигрирует вниз. Можно отметить изменения солёности даже в небольшом образце при средней солёности (в промилле) растущего ледяного поля относится к толщине льда [45, 46]:

$$S = \begin{cases} 13,4 - 17,4h; & h \leq 0,34 \text{ м} \\ 8,0 - 1,62h; & h > 0,34 \text{ м} \end{cases}, \quad (\text{A.6.4})$$

где  $h$  – толщина льда, м.

Альтернативное соотношение можно найти в [47].

#### *Объем рассола и общая пористость*

Исторически свойства морского льда анализируются в зависимости от объема рассола  $v_b$  во льду. Объем рассола представляет собой количество жидкого рассола в матрице льда. Определение объема позволяет оценить как влияние температуры, так и солености. Для морского льда объем рассола можно оценить, как описано в [49]:

$$v_b = S_i \left[ \frac{49,2}{|T_i|} + 0,53 \right] , \quad (\text{A.6.5})$$

при условии  $-22,9^\circ\text{C} < T_i < -0,5^\circ\text{C}$ .

Объем рассола обычно выражается в частях на тысячу, аналогично солености. В качестве альтернативы, можно выразить в долях объема. Например, объем рассола 20 ‰ представляет собой эквивалент в долях 0,020.

Во льду присутствует воздух и в определенных случаях, где происходит дренирование рассола, объем воздуха может быть значительным. Поэтому, обычно определяется общая пористость льда, которая представляет собой сумму относительного объема рассола и относительного объема воздуха. В [49] приводятся уравнения для расчета общей пористости. Для этого требуется точное значение общей плотности льда.

#### *Разрушение и таяние льда*

Увеличение температуры и солнечного излучения являются первичными причинами разрушения морского льда. Когда температура окружающей среды повышается примерно до минус  $10^\circ\text{C}$ , большая часть солей во льду переходит из твердой фазы в жидкую фазу. При температурах воздуха выше минус  $10^\circ\text{C}$  ячейки рассола быстро увеличиваются в размере и соединяются, образуя «дренажные каналы рассола», которые способствуют обессоливанию льда. Уменьшение прочности льда ведет к разрушению морского льда.

В теплый период года толщина льда меняется не только из-за таяния льда сверху, но также в результате таяния нижней поверхности льда. Это обычно

происходит у кромки поля или у трещины, где образуется теплая вода. Существуют эмпирические формулы расчета скорости таяния льда со дна до верхней части льда [44].

Таяние ледяных полей под воздействием волн может играть важную роль в разрушении льда близ кромок и опирающихся на грунт ледяных образований (стамух) в открытой воде. Движение льда в сторону теплых вод также играет значительную роль в очищении моря в летнее время.

### **А.6.5.2 Типы льда**

#### **А.6.5.2.1. Стадии развития**

Льды по типам можно охарактеризовать как однолетний, двухлетний и многолетний морские льды, шельфовый лед и материковый лед. Термин «многолетний лед» иногда используется для обозначения двухлетнего льда.

Поверхность однолетнего льда меняется по мере того, как лед становится толще, от черно-серого нового и молодого льда до белого, когда он становится толще. Стадии развития однолетнего льда разделены на категории организацией WMO следующим образом [37, 51]:

- Новый (толщиной  $<1$  см): морской лед в виде мелких пластинок или кусков. Новый лед обычно подразделяется на шугу, ледовое сало.

- Нилас (толщиной от 1 до 10 см). Тонкая корка плавучего льда, которая легко изгибается под волнами и вздувается. По виду его поверхность кажется матовой.

- Молодой лед (толщиной от 10 до 30 см). Этот тип льда подразделяется на:

- а) серый (толщиной от 10 до 15 см) – часто ломается под воздействием волн;

- б) серо-белый (толщиной от 15 до 30 см).

- Тонкий однолетний лед (толщиной от 30 до 70 см). Этот тип подразделяется на:

- а) стадию 1 (толщиной от 30 до 50 см);

- б) стадию 2 (толщиной от 50 до 70 см).

- Средний однолетний лед (толщиной от 70 до 120 см).

- Толстый однолетний (толщиной  $>120$  см).

В некоторых арктических регионах лед существует все лето, и процесс замерзания вновь начинается осенью. Лед, который пережил один (летний) сезон таяния, называется двухлетним льдом. В целом, в течение следующей зимы он становится толще, чем однолетний лед. Организация WMO считает, что толщина двухлетнего льда обычно не превышает 2,5 м. Высота надводной части двухлетнего льда выше, т.е. выше выходит из воды и имеет гладкую волнообразную поверхность. Летом и ранней осенью он часто имеет голубовато-зеленые ванночки на поверхности.

Лед, который пережил более одного (летнего) сезона таяния, называется многолетним. Он имеет очень низкую соленость и существенно прочнее, чем однолетний лед. Многолетний лед может быть очень толстым и прочным.

#### A.6.5.2.2 Сплоченность и форма

Ледяной покров характеризуется также сплоченностью. Сплоченность выражается в десятибалльной системе, которая представляет собой отношение площади поверхности воды, покрытой льдом, ко всей площади. Фактическая площадь будет зависеть от точки расположения наблюдателя, т.е. судна, самолета или спутникового изображения.

Также лед можно характеризовать по его форме и нормы WMO выделяют 10 категорий для описания поперечных размеров. Категории включают самые мелкие формы (блинчатый, шуга и битый лед), поля (малые, средние, большие и обширные), припайный лед, айсберги и неопределенные формы.

Категории сплоченности включают следующее:

- а) Отсутствие льда: льда нет.
- б) Открытая вода: Большая площадь свободна для навигации, лед присутствует при сплоченности менее 1/10.

в) Дрейфующий лед/паковый лед: Термин используется очень широко и предполагает наличие льда любой площади, независимо от того, какую форму он принимает или как расположен. При высоких значениях сплоченности, т.е. 7/10 или больше, термин «дрейфующий лед» может быть заменен на термин «паковый лед».

г) Очень открытый дрейфующий: Лед, сплоченностью от 1/10 до 3/10 и площадь воды преобладает над льдом.

д) Открытый дрейфующий: Лед, сплоченностью от 4/10 до 6/10, со многочисленными промоинами и полыньями. Поля обычно не контактируют друг с другом.

е) Сплошной паковый лед, сплоченностью от 7/10 до 8/10, составленный в основном из полей, находящихся в контакте друг с другом.

ж) Очень плотный паковый лед: лед, сплоченностью от 9/10 до менее чем 10/10.

з) Сплошной лед: Лед, сплоченностью 10/10 и воды не видно.

и) Монолитный лед: Лед, сплоченностью 10/10 со смерзшимися вместе полями.

Следующие термины используются в сообщениях и прогнозах о ледовой обстановке, а также для описания распределения льда в данном районе.

- Битый лед: любой относительно плоский кусок льда менее 20 м в поперечнике.
- Ледовые просветы: включает все формы разломов и трещин.
- Трещина: любое нарушение целостности припайного, сплошного льда или поля, за которыми могут последовать разломы от нескольких сантиметров до нескольких метров.
- Полоса: длинная узкая площадь дрейфующего льда около 1 км или менее по ширине, обычно состоящая из мелких фрагментов, отсоединенных от основной массы, идущие вместе под влиянием ветра или течения.
- Ледовая кромка: граница открытой воды в любой заданный период времени на море, озере или речного льда и припайным или дрейфующим льдом. Она может быть классифицирована либо как сплошной, либо как рассеянный лед.

#### А.6.5.2.3. Айсберги.

Ледники и ледяные потоки с доступом к открытой воде имеются во многих регионах. Лед в ледниках является пресным, поскольку он сформировался из снега,

преобразовавшегося в течение многих сотен лет. Оторвавшиеся от ледника куски льда называются айсбергами, которые могут быть чрезвычайно крупными (несколько десятков миллионов тонн). Части меньшего размера называются обломками и кусками айсбергов. Айсберги классифицируются по размеру в зависимости от длины ватерлинии обломки (0-5 м), куски айсбергов (5-15 м), мелкие айсберги (15-60 м), средние айсберги (60-120 м), крупные айсберги (120-200 м) и очень крупные айсберги (более 200 м). Средняя плотность льда в айсбергах обычно находится в диапазоне от 850 до 910 кг/м<sup>3</sup> [52].

Айсберги могут находиться в океане в течение многих лет, как в плавучем состоянии, так и опираясь на грунт. В [37] приводится терминология айсбергов исходя из их формы. К сожалению, эта терминология по форме не используется в отношении айсбергов при проведении морских работ. Альтернативная терминология по форме айсбергов [28] сформирована в соответствии с [53]. Различия между плоскими и неплоскими айсбергами значимы при проектировании и эксплуатации сооружений. Некоторые клинообразные или куполообразные айсберги трудно поддаются буксировке.

#### **А.6.5.3 Морфология льда**

Плотность льда меньше, чем у воды, поэтому лед обычно находится в плавающем состоянии. Также можно обнаружить некоторые формы не плавающего льда, такие как «заякоренные» льды, припай, береговой лед и лед, лежащий на грунте.

«Заякоренный» лед представляет собой погруженный лед, прикрепленный или заякоренный к морскому дну. Его находят в мелководных приливных или межприливных зонах, когда температура воздуха ниже точки замерзания воды.

Припай представляет собой узкую полосу льда, примерзшего к берегу или пляжной полосе. В использованном здесь контексте он образуется из битого льда, примерзшего к острову или сооружению после ударного воздействия ледяного поля.

Прибрежный лед является плавающим льдом, который находится на грунте на мелководье.



Находящийся на грунте лед опирается на дно моря или находится в контакте с ним.

#### *А.6.5.3.3. Ровный и паковый (битый) лед*

Ровный лед можно определить как морской лед с недеформированной верхней и нижней поверхностью. Ровный лед обычно имеет гранулированный верхний слой, транзитную зону и столбчатые гранулы, проходящие сквозь большую часть остальной толщины ледяного покрова.

Ряд параметров ровного льда (в научной терминологии S2 и S3) [54] классифицируется в соответствии с направлением оси С (оси симметрии шестиугольной структуры). На механические свойства (прочность на изгиб, прочность на сжатие, модуль Юнга и пр.) оказывает влияние кристаллическая решетка льда и его направление по оси С. Если ледяной покров всплыл на ранней стадии роста и продолжает расти, то трудно отличить его от чистого ровного термического льда без результатов анализа текстуры льда. Если всплывшие слои тонкие ( $< 10$  см), всплывший лед ведет себя практически как чистый ровный лед.

Так как организация WMO не признает термин «битый лед», она обозначила его как паковый лед или ледовое поле. Ледовые поля возникают благодаря динамике льда (т.е. движения льда, вызванного напряжениями, возникшими в результате теплового расширения, воздействия ветра и течений), воздействия волн, действующих на ледяной покров, взаимодействия льдин с такими объектами, как сооружения, суда и пр. Колебания температуры могут вызывать внутренние напряжения в ледовом покрове и развитие трещин, разделяющих ледяной покров на поля.

#### *А.6.5.3.3. Торосистый и плавучий лед (деформированный лед)*

Ледяной покров может деформироваться под воздействием внешних факторов, вызванных напряжениями и взаимодействием с другими льдинами и полями. Обычно два механизма деформации образуют торосы (взаимодействие двух ледовых полей) и нагромождения (погружение одной части ледового поля под другой). В обоих случаях деформации локализуются там, где происходит образование торосов и нагромождение льда.

Торосы часто подразделяются на торосы сжатия и сдвига. Торосы сжатия в целом имеют криволинейные очертания, но иногда могут быть прямыми. Они образуются из-за надвига одной части ледового поля на другую. Могут существовать как единое образование с треугольным или трапециевидным килем и парусом, что часто наблюдается в крупных полях торосов. Торосы сдвига, как правило, бывают прямыми, что вызвано скольжением одного ледового поля вдоль другого. Характерной чертой тороса сдвига является вертикальный борт, находящийся над и под водой, где произошло взаимодействие. Торосы сдвига часто располагаются на границе припайного и движущегося дрейфующего льда.

В целом, торосы имеют широкий диапазон форм и размеров. Глубина килей доходит до 50 м, а измеренная высота паруса – до 12,8 м, однако кили торосов глубже 30 м являются редкими [55].

Торосы из однолетних льдов являются пористыми, состоят из льда, воды, воздуха и снега. Верхняя надводная часть, называемая парусом, имеет поры, заполненные воздухом и снегом. В подводной части, называемой килем, могут быть поры, заполненные водой, и в некоторых случаях существуют воздушные карманы. Торосы из двухлетнего и многолетних льдов в целом имеют очень низкую пористость. Отношение глубины киля к высоте паруса является важным параметром и обычно находится между 4 и 5 для торосов из однолетнего льда и около 3-3,5 для торосов из двухлетнего и многолетнего льдов [56, 57].

Киль тороса подразделяется на верхний замороженный слой, называемый консолидированным, и нижнюю неконсолидированную часть. Консолидированный слой растет в течение срока жизни тороса в зависимости от окружающих метеорологических и океанографических условий, температуры воздуха и воды, глубины снега и скорости ветра и окружающих течений, которые являются принципиально важными. Четкое руководство по механическим свойствам, как у ровного льда, отсутствует. Справочные источники по данному вопросу: [58], [59], [60], [61], [62], [63] и [64]. Для однолетних торосов отношение толщины консолидированного слоя к толщине ровного льда, образовавшегося в открытой воде при тех же температурах что и торос, является важным фактором и в целом

этот показатель находится в диапазоне между 1,5 и 2. Толщина консолидированного слоя 8,5 м была зарегистрирована у однолетнего льда в Охотском море [65]. Различие между консолидированной и неконсолидированной частями килля менее ясно, чем для многолетних торосов, поскольку возможно, что определенная часть может быть консолидированной по всему киллю [66].

#### *А.6.5.3.4 Торосы и скопление битого льда*

Торосы представляют собой линейные образования, образовавшиеся в результате взаимодействия льдин и ледовых полей. Торосистые поля представляют собой локальные образования с прямоугольной или квадратной формой в горизонтальной проекции. В соответствии с определением WMO, торосистое поле представляет собой «возвышение из обломков льда, вызванное давлением», при этом локальный характер данного явления не упоминается.

Торосы и поля из битого льда могут иметь размеры от нескольких десятков метров до нескольких километров. Эти ледяные образования можно наблюдать в воде на различных глубинах.

Еще одной характеристикой, отличающей торосы от гряд льда, является их консолидация. Как правило, термин «торосы» чаще используется для многолетних льдов, чем для однолетних. Принимая во внимание консолидацию, происходящую с деформированными однолетними льдами в конце сезона, данный термин может также использоваться для описания однолетнего льда.

Статистика по физическим размерам торосов (как однолетних, так и многолетних) доступна по Чукотскому морю в США [67], по морским участкам России [68, 69], по морским участкам острова Сахалин [70] и по морю Бофорта в Канаде [56].

#### *А.6.5.3.5 Припайный лед*

Припайный лед представляет собой сплошной, устойчивый ледяной покров, примерзший к берегу или располагающийся на грунте. Простирается припайного льда от берега зависит от глубины воды, локального географического расположения (т.е. островов, заливов, банок и пр.), скоростей ветра и течений, и может составлять от нескольких метров до нескольких сотен километров. Обычно припайный лед

образуется из однолетнего льда, но многолетний припайный морской лед существует на северных арктических островах Канады.

Граница между припайным и паковым льдом называется зоной сдвига или переходной зоной. Эта зона состоит из значительно деформированного льда и соответственно высокой плотности торосов (определяемой как количество торосов на единицу длины, например, на километр). Когда лед, находящийся внутри зоны сдвига, перемещается, он является частью пакового льда, но когда он замерзает, то становится частью припайного ледового покрова.

Паковый лед представляет собой любой лед, который не является припайным. Параметрами, используемыми для его характеристики, являются сплоченность льда, распределение полей по размеру, скорость движения льда и распределение по толщине. Также к ним можно отнести размеры торосов и частоту их возникновения.

#### *А.6.5.3.6 Айсберги*

Для определения критериев проектирования, следует выполнить количественный анализ состояния айсбергов. Обычно такой анализ включает в себя определение набора взаимосвязанных и легко измеримых показателей (максимальная длина ватерлинии, ширина ватерлинии по перпендикуляру к длине, максимальная высота и осадка), а также соотношения этих величин с другими параметрами, такими как метацентрическая высота, площадь ватерлинии, радиус кривизны и коэффициент заполнения.

Коэффициент заполнения представляет собой отношение объема айсберга к объему прямоугольной призмы, построенной по размерным показателям.

#### *А.6.5.3.7 Шельфовый лед*

Шельфовый лед представляет собой лед, который по происхождению является плавучей частью ледника.

### **А.6.5.4 Движение льда**

#### **А.6.5.4.1 Процессы**

Под влиянием ветра и течений лед становится очень динамичным. Хотя скорости дрейфа льда обычно составляют менее 1 м/с, скорости более 3 м/с наблюдаются в регионах с высокими приливными течениями, таких как залив Кука

на Аляске. Имеются многочисленные публикации, в которых приводится описание факторов, влияющих на скорость дрейфа льдов, коэффициенты трения поверхностей и килей, горизонтальные площади, скорость ветра, скорость течения и пр. Если нет фактических данных по измерениям дрейфа льдов, скорость дрейфа можно рассчитать с помощью алгоритмов, принятых в компьютерных имитационных моделях, определения характеристик частоты встречаемости льдов, скорости воздействия льдов и пр.

Важным явлением, влияющим на динамику льда, является сжатие. Сжатие часто возникает в прибрежных регионах, когда прижимные ветры заставляют лед уплотняться вдоль побережья или когда направление ветра или течения быстро меняется. В этом отношении большое значение также имеют изменения под влиянием приливных течений. В обоих случаях лед не может реагировать на изменение направления движения, а внутренние напряжения в растущем ледовом покрове вызывают свое давление. Влияние давления льда заключается в снижении способности судна проходить через лед. В чрезвычайных случаях, как известно, давление ледовых полей может сминать корпус судна, тем самым приводя к затоплению. Морские платформы в целом рассчитаны на более высокие локальные нагрузки, чем те, что вызваны давлением льда на судно, но следует выполнять проверки.

Дрейфом айсбергов управляют ветер, волны и течения. Поскольку большая часть массы айсберга находится под водой, айсберги имеют более низкий ветровой коэффициент, чем морской лед, подразумевая, что подводное течение оказывает относительно большее влияние на скорость и направление айсберга [28].

#### *А.6.5.4.2 Зона маргинального льда*

Регион расположения ледового покрова, которое находится близко от границы открытого океана, называется зоной маргинального льда (ЗМЛ). В этом регионе ледяной покров разламывается на поля в результате изгибных напряжений волн, проникающих в лед из открытого моря. Ширина ЗМЛ определяется как глубина проникновения, на которую волны могут разламывать лед, создавая поля, что является функцией не только толщины льда и его механических свойств, но также

волновой климатологией региона и глубины воды. Спектр волн меняется на мелководье и создает более короткие и крутые волны, которые разбивают поля на более мелкие фрагменты, но не проникают в лед так далеко, как более длинные волны в глубоководных местах.

Если ветер дует в направлении берега, он сжимает ЗМЛ, образуя компактное ледовое поле с острой внешней границей небольших участков ледового сала и шуги (фрагментов разрушенных полей). Ветер, дующий в направлении льда, часто ассоциируется с теплым влажным воздухом из открытого моря, который охлаждается над льдом, и, сжимая его таким образом, что границы льда часто трудно увидеть с воздуха или со спутника, их структура лучше всего передается с использованием радара с синтезированной апертурой.

Когда ветер дует в сторону моря, большая часть ЗМЛ становится размытой. Наиболее удаленная кромка становится ледовым полем, пропадающим в открытом море, начинается формирование нового льда из кромки сплошного льда, отделенных полностью открытой водой и лежащая по оси приблизительно перпендикулярно направлению ветра. Зимой кромки льда формирует новый лед в акваториях с открытой водой, что приводит к усилению повторного нагнетания рассола в ЗМЛ.

В северных океанах ветер, дующий параллельно кромке льда (лед – слева по направлению ветра) создает эффект транспортировки Экмана (Ekman) (благодаря силе Кориолиса (Coriolis)) в граничном слое, который направлен от кромки льда, в результате чего возникает поднятие уровня воды, которым может передавать тепло из более глубоких слоев в зону кромки льда. Ветер, дующий параллельно кромке льда (лед – справа по направлению ветра) взаимодействует с легким ветром, возникшим в результате горизонтального температурного градиента между теплым воздухом внешней кромки льда и охлажденным воздухом, находящимся над кромкой льда. Взаимодействие создается поверхностным фронтом внешней кромки льда; примером был фронт с температурой 6°C в 25 км, который наблюдался в 100 км от кромки льда в Баренцевом море [71].

#### **А.6.5.5 Характеристики льда**

Руководство в отношении механических свойств льда приведено в А.8.2.8.

#### **А.6.5.6 Мониторинг льда**

Руководство отсутствует.

#### **А.6.6 Факторы морского дна**

##### **А.6.6.1 Землетрясение**

Известными примерами сейсмически активных зон в арктических и холодных регионах являются:

- а) Залив Кука;
- б) Охотское море и Татарский пролив;
- в) Японское море;
- г) Пролив Бохай;
- д) Определенные районы шельфа Канады.

##### **А.6.6.2 Многолетняя мерзлота**

Руководство отсутствует.

##### **А.6.6.3 Ледовое пропахивание**

Ледовое пропахивание или образование ледовых борозд на дне (в литературе эти термины используются как синонимы) происходит при движении киля ледового образования в контакте с дном моря. Характерные ледяные образования, связанные с пропахиванием, включают:

- а) торосы из однолетнего льда в ровных или в торосистых полях;
- б) торосы из многолетнего льда в ледовых полях;
- в) стамухи, движущиеся или разрушающиеся под напором окружающего льда;
- г) айсберги или ледовые острова.

Глубина ледового пропахивания (глубина борозд) изменяется в пределах от нескольких сантиметров до нескольких метров, в зависимости от типа и характеристик льда, создающего борозды и типа грунта морского дна. Глубина ледового пропахивания могут существенно меняться в пределах площади и длины борозды.

Ледовые пропахивания в целом имеют линейный характер, и эти линии могут достигать километра или более в длину. В тексте, приведенном ниже, используется термин «пропахивание» для борозд или линий, а термин «яма» используется для

обозначения локальных образований. Ямы отличаются от борозд пропахивания тем, что имеют ограниченную протяженность в пределах от нескольких до десятков метров.

В целом считается, что ледовое пропахивание создается движениями вверх по склону килей торосов, находящихся в контакте с морским дном. Ледовое пропахивание, образовавшееся вниз по склону, также наблюдалось у килей гряд торосов [72] и айсбергов, где передвижение килей происходило во время процесса пропахивания. Значимость передвижений айсбергов также иллюстрируется присутствием ряда ям и углублений, которые наблюдались на Лабрадорском побережье в Канаде [73]. На морском дне также наблюдались отдельные ямы в таких различных местах, как восточное побережье Канады [74] и Каспийское море.

Детальные исследования процесса пропахивания в общем виде отсутствует, и количество прямых наблюдений, проведенных непосредственно в полевых условиях, довольно ограничено. Процессы пропахивания исследуются по современным или обнаженным древним бороздам на морском дне.

В общем, процессы взаимодействия между льдом и грунтом зависят от характеристик льда и типа воздействий. В имеющейся литературе показано, что в канадском море Бофорта пропахивание оставляет длинные борозды соответствующих размеров и с небольшим подъемом у основания борозды. Общепринято, что эти борозды создаются киями многолетних торосов [75]. Последняя информация, полученная с использованием многолучевого эхолота, который дает более полную картину пропахивания, показывает, что в борозде пропахивания действительно происходят локальные изменения. В [72] приведены случаи, когда меняется характер борозд, образованных киями многолетних торосов. Это связано с изменениями направления дрейфа льда, которые меняют ориентацию килей торосов, потенциально засыпая одни борозды пропахивания другими.

У восточного побережья Канады и Гренландии, где айсберги являются основными причинами пропахивания, также наблюдались и другие причины ледовой экзарации. Глубокие ямы наблюдались на морском дне у края борозд, где



айсберги садились на дно и разламывались. Такие же борозды наблюдались по стамухам. Также наблюдались изолированные ямы, образованные айсбергами, которые вероятно возникли при разрушении и контакте с морским дном. Глубина ям, образованная айсбергами, может достигать 10 м. Борозды пропахивания (или экзарации) на морском дне, возникшие при перемещении айсбергов, носят периодический характер.

Обследования борозд пропахивания длиной нескольких километров в море Бофорта в Канаде показали, что характер борозды можно классифицировать по определенным типам (увеличение глубины борозды без подъема, увеличение глубины борозды с подъемом и постоянная глубина борозды с подъемом), и основание по длине борозды может подниматься на несколько метров [76, 72]. Это указывает на то, что киль тороса поднимается вдоль борозды или с другой стороны, киль, изнашивается или механически разрушается при движении, или возможно произошла комбинация того и другого явления.

#### **А.6.6.4 Воронки размыва**

Реки, впадающие в арктические прибрежные воды, способствуют раннему таянию весной придонного льда на побережье (при его наличии). Речная вода натекает на лед и распространяется в море, заливая значительную часть прибрежной зоны. Происходит дренаж пресной воды под лед через разломы во льду, которые обычно состоят из приливных, температурных трещин и промоин, через которые дышат тюлени. В этих случаях, при высокой скорости дренажа и относительно небольшой глубины воды (менее 7 м) может происходить существенный размыв морского дна.

Наблюдаются воронки размыва двух типов: круглый и линейный. Круглый размыв формируется под дренажом через промоины или большую площадь под трещинами. Линейная эрозия формируется под трещинами.

В целом тип и размер воронки размыва контролируются объемом речного стока, развитием и распространением воды, поступающей через трещины в ледовом покрове. Эти влияния зависят от многих факторов, которые являются важными соображениями при проведении анализа.

## **A.7 Надежность и проектирование по методу предельных состояний**

### **A.7.1 Методология проектирования**

#### **A.7.1.1 Основные принципы**

Настоящий стандарт направлен на обеспечение безопасной эксплуатации арктических сооружений с использованием подхода к проектированию, при котором основные целевые показатели надежности обеспечиваются за счет применения частных (дифференцированных) коэффициентов надежности по нагрузкам для различных предельных состояний сооружения. Стандарт позволяет проектировщику рассматривать воздействия на сооружение по отдельности, при этом целевые показатели надежности для сооружения в целом достигаются в рамках приближенного подхода с использованием коэффициентов сочетания нагрузок и частных коэффициентов надежности по нагрузкам.

В данном разделе стандарта установлены рекомендации для проектирования арктических сооружений, основанные, по возможности, на практическом опыте. Наряду с рядом предписаний, направленных на практику проектирования, существует также возможность вероятностной оценки комбинаций нагрузок и соответствующих частных коэффициентов для обеспечения гибкости при выборе безопасных, технически осуществимых и эффективных вариантов конструкций.

Существует вероятность, что в некоторых природных ледовых условиях надежность конкретных сооружений может не соответствовать предположениям, принятым при калибровке коэффициентов нагрузок и представленных в настоящем стандарте. Поэтому оценку специфических особенностей природных условий следует выполнять на основе методологии, использованной при разработке данного стандарта. Кроме того, при рассмотрении отдельных этапов эксплуатации сооружения, таких как строительство, транспортировка, монтаж и демонтаж, следует иметь в виду, что целевые показатели надежности и коэффициенты нагрузок были получены для стационарных условий эксплуатации.

Кроме того, целесообразно наряду с надежностью при конкретных предельных состояниях рассматривать общую надежность сооружения.

#### **А.7.1.2 Классы безопасности**

Для арктических сооружений определены три класса безопасности.

*а) S1: платформы с постоянным присутствием персонала, без эвакуации*

К классу S1 относятся платформы, на которых постоянно (или почти постоянно) находится и проживает персонал, при этом эвакуация персонала в случае расчетного природного события не планируется или является нецелесообразной.

При проектировании платформа классифицируется по классу S1, если в проекте не обеспечивается выполнение конкретных требований класса S2 или S3 в течение проектного срока службы платформы.

*б) S2: платформы с постоянным присутствием персонала, с эвакуацией*

К классу S2 относятся платформы, на которых обычно находится персонал, за исключением ситуаций, связанных с превышением прогнозных расчетных природных событий. При проектировании платформа классифицируется по классу S2 только при условии выполнения совокупности следующих требований:

- возможен надежный прогноз расчетного природного события как с технической, так с организационной точек зрения, при этом погодные условия во временном интервале между поступлением прогноза и наступлением ожидаемого расчетного природного явления с высокой степенью уверенности не будут препятствовать *безопасной* эвакуации;

- проектом непосредственно предусматривается выполнение эвакуации персонала в случае возникновения расчетного природного события;

- имеется достаточное время и технические ресурсы для проведения безопасного покидания всем персоналом данной платформы, а также со всех других платформ, для которых, вероятно, потребуется проведение покидания во время того же шторма.

*в) S3: без постоянного персонала*

К классу S3 относятся платформы, на которых персонал присутствует временно: в течение кратковременных плановых посещений для проведения обследования, технического обслуживания, модернизации. При проектировании платформа классифицируется по классу S3 только при условии выполнения совокупности следующих требований:

- посещение платформы осуществляется только для проведения специально запланированных обследований, технического обслуживания или работ по модернизации на самой платформе;
- предполагается, что длительность посещения в сезоны с суровыми погодными условиями не превышает 24 часов;
- выполнены все требования п. б) для платформ категории S2.
- платформы этого класса могут быть определены как «обычно безлюдные».

Присвоение класса безопасности содержит некоторый элемент неопределенности. Класс безопасности, назначаемый для проектируемой платформы, должен быть определен владельцем (оператором) до начала проектирования и, в необходимых случаях, согласован с надзорными органами.

#### **А.7.1.3 Класс ответственности**

При определении класса ответственности платформы учитываются следующие факторы:

- безопасность для жизни персонала, находящегося на или около платформы, который может быть подвергнутым воздействиям любой природы в условиях отказов произвольного характера;
- причинение вреда окружающей среде;
- ожидаемые финансовые потери, причиненные владельцу, другим операторам или промышленности в целом.

##### *а) C1: тяжелые последствия*

К классу C1 относятся платформы, на которых осуществляется высокий уровень добычи или имеются значительные технологические мощности, а также платформы, на которых существует потенциальная возможность утечек из

скважины нефти или сернистого нефтяного газа вследствие отказов различного характера. Кроме того, сюда входят платформы, где прекращение добычи нефти или сернистого газа при наступлении расчетного события не планируется или является технически неосуществимым (например, в районах с высокой сейсмической активностью). Платформы, на которых расположены трубопроводы для транспорта нефти или емкости для хранения нефти, периодически отгружаемой в танкеры, также относятся к классу С1.

К сернистым газам обычно относится природный газ, содержащий сероводород в концентрации не менее 0,01–1%. Объемная доля сероводорода 0,1% (или 1000 частей на миллион) является смертельной сразу же после его вдыхания и поэтому рекомендуется в стандарте как значение, обоснованно определяющее *понятие сернистого газа*.

При проектировании платформа классифицируется по классу С1, если в проекте не обеспечивается выполнение конкретных требований класса С2 или С3 в течение проектного срока службы платформы.

*б) С2: умеренные последствия*

К классу С2 относятся платформы, где добыча может быть приостановлена на период расчетного природного события. При проектировании платформа классифицируется по классу С2 только при условии выполнения совокупности следующих требований:

- все скважины, на которых могут иметь место утечки в случае разрушения платформы, должны быть оснащены внутрискважинными предохранительными клапанами, гарантированно находящимися в работоспособном состоянии, изготовленными и испытанными в соответствии с действующими спецификациями;

- объем хранения нефти ограничен технологическим складским запасом и «доливочными» емкостями для обеспечения транспорта по трубопроводу;

- трубопроводы имеют ограниченный потенциал разлива углеводородов из-за малого объема, низкого давления или вследствие использования запорных вентилей или линейных клиновых задвижек.

с) С3: незначительные последствия

К классу С3 относятся «минимальные» платформы, на которых добыча может быть остановлена на период расчетного события. Платформы такого рода могут предназначаться для транспорта продукции с платформы и из внутрипромысловых выкидных линий в небольшом объеме. При проектировании платформа классифицируется по классу С3 только при условии выполнения совокупности следующих требований:

- все скважины, на которых могут иметь место утечки, в случае разрушения платформы, должны быть оснащены внутрискважинными предохранительными клапанами, гарантированно находящимися в работоспособном состоянии, изготовленными и испытанными в соответствии с действующими спецификациями;

- объем хранения нефти ограничен технологическим складским запасом;
- трубопроводы имеют ограниченный потенциал разлива углеводородов из-за малого объема, низкого давления или вследствие использования запорных вентилей или линейных клиновых задвижек.

Присвоение класса ответственности содержит некоторый элемент неопределенности. Класс ответственности, назначаемый для проектируемой платформы, должен быть определен владельцем (оператором) до начала проектирования и, в необходимых случаях, согласован с надзорными органами.

#### **А.7.1.4 Категория сложности**

Для арктических сооружений может применяться подход, аналогичный для покидания персоналом платформ, находящихся на ожидаемой траектории движения тайфуна (что имеет место в различных районах мира), когда покидание (с предшествующей остановкой добычи) осуществляется в случае поступления прогноза о возможности реализации ледовой обстановки, порождающей нагрузку на сооружения экстремального или аномального уровня, например, при приближении ледового острова. Такая ситуация может представлять собой расчетный случай для сооружения с категорией сложности L2. Берма и защитные сооружения могут

проектироваться как сооружения категории сложности L3, если защищаемые ими сооружения способны самостоятельно обеспечить свою целостность при условии разрушения защитных конструкций категории L3.

Если часть проектируемого сооружения классифицирована по более низкой категории сложности (например, L2 или L3), чем другая часть сооружения, то первый абзац А.7.1.4 следует применять, заменяя слово «сооружения» на «части сооружений». В случае, когда часть сооружения классифицирована по более низкой категорией сложности, ее повреждение или разрушение не должно приводить к разрушению части сооружения с более высокой категорией сложности.

#### **А.7.1.5 Предельные состояния**

Руководство отсутствует.

#### **А.7.1.6 Альтернативные методы проектирования**

Руководство отсутствует.

### **А.7.2 Методы проектирования по предельным состояниям**

#### **А.7.2.1 Предельные состояния**

Важным примером предельного состояния по эксплуатационной пригодности, SLS, для морских арктических сооружений является пригодность для пребывания на сооружении людей в условиях вибрации, возникающей как реакции на динамическое возбуждение.

#### **А.7.2.2 Нагрузки**

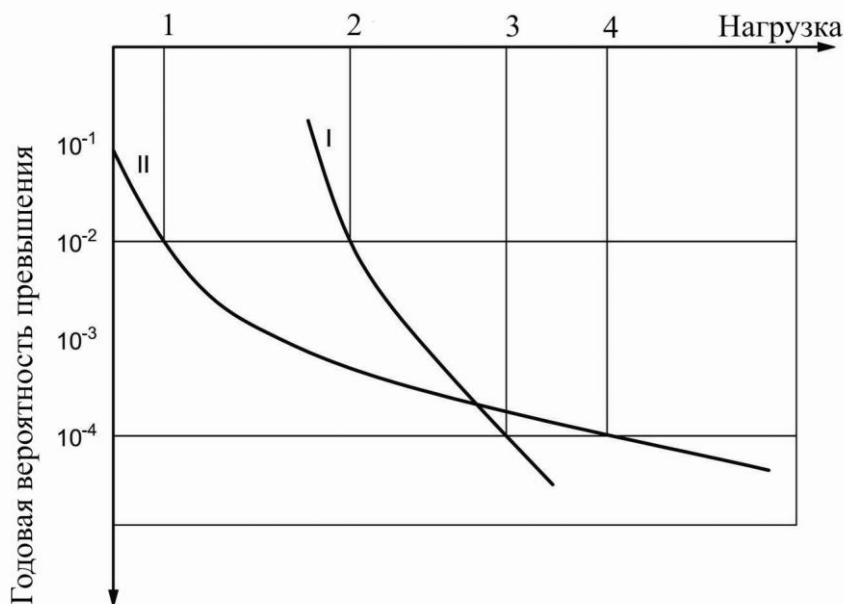
Понятия «частых природных событий» и «редких природных событий» были введены в некоторые нормативные документы [77], чтобы подчеркнуть различие между частыми событиями (ветер, шторм и пр.), которые каждый год имеют несколько пиковых значений, и редких событий, таких как столкновения айсбергов или землетрясения, которые происходят только один раз в течение нескольких лет. Для сооружений L1 расчетные значения нагрузок назначаются по годовой вероятности превышения, равной  $10^{-2}$  и  $10^{-4}$  в год, соответственно.

В данном стандарте понятия «событие экстремального уровня, EL, и аномального уровня, AL, заменяют понятия «частого процесса» и «редких

событий». Следует обратить внимание, что два набора концепций не являются эквивалентными.

Оба события EL и AL следует рассчитывать для всех сценариев взаимодействий, независимо от того, характеризуются ли они частыми или редкими природными событиями. Настоящий подход снимает в некоторой степени условную границу между частотами, связанными с частыми процессами и редкими событиями.

Согласно требованиям 7.2.2.3 и 7.2.2.4, величины нормативных нагрузок, соответствующие вероятности превышения  $10^{-2}$  для ELIE и  $10^{-4}$  (случай сооружений категории L1) или  $10^{-3}$  (случай сооружений категории L2) для ALIE рассчитываются для всех событий. Редкие события могут оказаться близким к нулю для ELIE, однако может доминировать в ALIE, как показано на рисунке А.7.1. И наоборот, частое событие может доминировать на уровне ELIE. Если данных недостаточно для статистического определения нормативных значений, их следует назначать по результатам экспертной оценки. Следует обратить должное внимание на различие последствий, связанных с ELIE и ALIE.



1 –  $z_E^{(II)}$

2 –  $z_E^{(I)}$

3 –  $z_A^{(I)}$



$$4 - z^{(II)}_A$$

$Z, z$  – нагрузка;

$P(Z > z)$  – годовая вероятность превышения нагрузки  $Z$  указанного значения  $z$  (годовая вероятность превышения);

I – частые события;

II – редкие события;

$z_E$  – нагрузка ELIE;

$z_A$  – нагрузка ALIE.

Рисунок А.7.1 – Схематическая иллюстрация ELIE и ALIE для редких и частых событий.

Землетрясения в общем случае имеют небольшую интенсивность в случае событий экстремального уровня.

Возможным примером событий, к которым применяется только ALIE, является ударное воздействие айсбергов и ледовых островов. Если такие события происходят с годовой вероятностью больше  $10^{-4}$  (для сооружений категории сложности L1), нагрузку ALIE с годовой вероятностью больше  $10^{-4}$  можно оценить на основе подхода, описанного в 8.2 и А.8.2.

Для обеспечения целевых значений надежности меньше  $10^{-4}$  (таблица 7.1) (например, для сооружений класса L1), необходимо учитывать ледовые события с годовой вероятностью возникновения в диапазоне между  $10^{-4}$  и  $10^{-5}$ . Невозможно рассчитать нормативную нагрузку с вероятностью больше  $10^{-4}$  для ледового события, которое имеет вероятность возникновения меньше  $10^{-4}$ . В таких случаях расчет аномальной нагрузки ALIE можно выполнить с использованием вероятностных методик или путем рассмотрения номинальных значений нагрузки, связанных с соответствующими ледовыми событиями.

Цель может быть достигнута путем проверки несущей способности сооружения в рамках одного из методических подходов, изложенных в 8.2.7, или с использованием их комбинации. Аналогично, ледовые события с годовой вероятностью возникновения между  $10^{-3}$  и  $10^{-4}$  следует рассматривать для

сооружений категории сложности L2 для обеспечения целевого показателя надежности  $10^{-4}$ . При этом целевой показатель надежности для сооружений категорий сложности L3 не подразумевает учет нагрузок аномального уровня ALIE.

Температурные градиенты, вызываемые технологическими процессами или природными условиями, могут быть важным фактором нагрузки при проектировании арктических морских сооружений. При определении частных коэффициентов надежности по нагрузкам и коэффициентов сочетаний нагрузок их можно рассматривать как переменные нагрузки (Q).

#### **A.7.2.3 Основные и сопутствующие природные нагрузки**

Таблица 7.2 содержит рекомендации по учету статистически зависимым, статистически независимым и несовместным (взаимоисключающим) природным процессам. В первой колонке таблицы 7.2 указана основная природная нагрузка уровня EL или AL в конкретном сочетании нагрузок. Во второй колонке показаны нагрузки, которые, вероятно, будут иметь высокие или экстремальные значения вместе с основными значениями в первой колонке. В третьей колонке указаны нагрузки, статистически независимые от основных нагрузок, при этом вероятность их возникновения является низкой. Оба этих фактора следует учитывать в рассматриваемой комбинации нагрузок; кроме того, следует провести вероятностный анализ с использованием статистического распределения основных и соответствующих вспомогательных значений таким образом, чтобы полученная в результате комбинированная нагрузка превышала требуемую годовую вероятность. В четвертой колонке приведен перечень нагрузок, которые в обычных случаях следует исключить из комбинации при рассмотрении основного значения.

При выполнении детерминистического анализа, нормативное экстремальное значение каждой соответствующей вспомогательной нагрузки следует умножить на соответствующий коэффициент, указанный в таблице 7.3, и затем сложить полученное значение с нормативным экстремальным или аномальным значением основной нагрузки. Полученное результирующее значение природной нагрузки затем используется в сочетаниях нагрузок, указанных в таблице 7.4.

Значения, приведенные в таблице 7.3, получены путем калибровки (см. А.7.2.6) и являются оценкой сверху при учете разнообразия проектируемых сооружений и широкого диапазона природных условий. Для арктических сооружений предпочтительным является полный вероятностный расчет для сопутствующих нагрузок.

#### **А.7.2.4 Сочетания нагрузок и частные коэффициенты надежности по нагрузкам**

Частные коэффициенты надежности для постоянных и переменных нагрузок, представленные в таблице 7.4, определены в стандарте ИСО 19902 для стационарных стальных сооружений. Для стационарных бетонных сооружений и плавучих конструкций в стандартах ИСО 19903 и ИСО 19904-1 приводятся другие, часто более низкие, значения соответствующих коэффициентов. Таким образом, при использовании указанных стандартов для соответствующих типов сооружений разрешается применять указанные в них коэффициенты надежности по нагрузкам для постоянных и переменных нагрузок, но не для природных нагрузок. Результаты калибровки, выполненные при разработке настоящего стандарта, показывают, что величина коэффициента надежности по нагрузке, применяемого к природным нагрузкам на арктические морские сооружения, не является чувствительной к небольшим изменениям коэффициента надежности для весовых нагрузок.

Коэффициенты надежности по нагрузкам должны быть не меньше значений, указанных в таблице 7.4 (или в соответствующем стандарте для проектируемого сооружения, если таковой применяется), поскольку более высокие коэффициенты могут использоваться в тех случаях, когда требуется более высокий показатель надежности. Относительно значений коэффициентов надежности по нагрузкам, меньших единицы, указанных в таблице 7.4 и применяемых для расчетных ситуаций опрокидывания, противодавления и обратного воздействия нагрузок, пониженные значения коэффициентов надежности нагрузок приводят к более неблагоприятным расчетным ситуациям.

Сочетания температурного сжатия и весовых нагрузок определены в стандарте ИСО 19900. Движущиеся нагрузки можно рассматривать как переменные нагрузки.

Частный коэффициент 1,2 для постоянного гидростатического давления и физически ограниченных переменных нагрузок может применяться из-за очень низкой неопределенности при определении максимальных значений данных нагрузок. Примером физически ограниченной нагрузки является содержимое емкости, переменный вес которого не может превысить значение, определенное ограниченным объемом емкости.

Коэффициенты надежности по нагрузкам для сооружений категории сложности L3 не включены в таблице 7.4. Хотя они обычно принимаются по усмотрению оператора проекта и подлежат согласованию в национальных надзорных органах, некоторые общие рекомендации можно найти в [78].

Настоящий стандарт позволяет проектировщику выполнять калибровку коэффициентов надежности по нагрузкам для применения в конкретных условиях. В этом случае откалиброванные коэффициенты используются взамен значений коэффициентов, представленных в таблице 7.4 при расчете целевых показателей надежности, указанных в таблице 7.5 для всех категорий сложности. Это может потребоваться из-за особенностей природных условий, типа сооружения, сценариев взаимодействия льда с сооружением, а также при необходимости учета прочих факторов, таких, как управление ледовой обстановкой, если они являются неотъемлемой частью проекта сооружения. Методика проведения такой калибровки представлена в [7]; целевые показатели надежности рассматриваются в А.7.2.6. В результате калибровки могут быть получены значения коэффициентов надежности по нагрузкам, отличающиеся от коэффициентов, приведенных в таблице 7.4 в большую или меньшую сторону. При выполнении такой калибровке необходимо должным образом учитывать необходимые коэффициенты надежности по материалу – в соответствии с положениями стандартов ИСО 19902 и ИСО 19903, а также других международных стандартов для проектирования морских сооружений.

Т а б л и ц а А.7.1 – Целевые показатели надежности для каждого сочетания нагрузок, учитываемого в проекте

<i>Категория сложности</i>	<i>Целевой показатель надежности, выраженный в качестве годовой вероятности аварийности</i>
L1	$1,0 \cdot 10^{-5}$
L2	$1,0 \cdot 10^{-4}$
L3	$1,0 \cdot 10^{-3}$

Целевые показатели надежности, указанные в таблице 7.5, относятся к расчетным сочетаниям нагрузок, рассматриваемым по отдельности, и применяются как для глобальных нагрузок (например, порождающих опрокидывание сооружения), так и для локальных (например, локальное давление льда).

Коэффициенты надежности по нагрузкам и коэффициенты сочетаний нагрузок, за исключением землетрясений, указанные в таблице 7.4, были откалиброваны в соответствии с методикой, описанной в работе [78]. Процедура калибровки использует взвешенные комбинации всех нагрузочных факторов, взятых с учетом всех расчетных уравнений нагрузок и сочетаний нагрузок, различных моделей прочности, различных уровней неопределенности в расчетных моделях, различных уровнях статистической изменчивости, а также при различных значениях частоты наступления событий, *порождающих нагрузки*. Применяемая методика включает в себя оптимизационную процедуру, причем целевая функция минимизирует отклонение от показателей надежности, соответствующих категориям сложности L1, L2 и L3, при обеспечении условия, что ограничение по верхней границе вероятности разрушения сооружения не нарушается. Для сооружений категории сложности L1, в соответствии с таблицей А.7.1, использовалось целевое значение надежности  $10^{-5}$ , а указанное ограничение заключалось в условии, что годовая вероятность разрушения сооружения для каждого из принимаемых во внимание предельных состояний не превышает  $10^{-4}$ .

Целевые показатели надежности, приведенные в таблице А.7.1, учитывают аспекты безопасности, как людей, так и окружающей среды, поскольку назначаются на основе категорий сложности L1, L2 и L3. Если для проектируемого сооружения принят класс безопасности S1 (сооружение с постоянным присутствием персонала,

без эвакуации) или класс ответственности C1 (тяжелые последствия в случае аварии), то для сооружения устанавливается категория сложности L1 и используется наивысшее значение надежности. Аналогично, если для проектируемого сооружения принят класс безопасности S3 (без постоянного персонала) или класс ответственности C3 (незначительные последствия в случае аварии), то для сооружения устанавливается категория сложности L3. Другие комбинации соответствуют категории сложности L2. Следует подчеркнуть, что целевые показатели надежности, приведенные в таблице А.7.1, устанавливаются для каждого сочетания нагрузок по отдельности, предполагая, что лишь одно или несколько из них являются определяющими. Необходимо также отметить, что целевые показатели надежности не включают в себя сопутствующие морские операции, например, танкерный транспорт углеводородов. Кроме того, отдельно рассматривается также сейсмический риск (ИСО 19901-2).

Для сооружений категории сложности L1 (сооружения с постоянным присутствием персонала, для которых эвакуация и прекращение добычи в случае наступления расчетной ситуации с экстремальным или аномальным уровнем нагрузки не предусматривается проектом – в отличие от случая отсоединяемой платформы, уходящей с точки при угрозе наступления события, превышающего расчетное) целевой показатель может приближенно трактоваться как наихудшее значение показателя индивидуального риска для каждого члена персонала сооружения, а также значимого экологического риска, для каждого отдельного предельного состояния и расчетной ситуации. Методический подход по назначению целевого показателя надежности, соответствующего категории сложности L1, описан в работе [79].

Значения целевых показателей надежности включены в канадский стандарт CAN/CSA S471 для проектирования арктических и других морских сооружений [77], впервые опубликованного в 1992 г. Значение «целевого уровня надежности в расчете на 1 год»  $1 \cdot 10^{-5}$ , назначаемого для используемого в стандарте CAN/CSA S471 «Класса безопасности 1» (соответствующего «категории сложности L1» в настоящем стандарте), послужило мотивацией для выбора целевого показателя надежности  $1 \cdot 10^{-5}$  как основы для калибровки нагрузок на сооружение категории

сложности L1 в настоящем стандарте. Стандарт CAN/CSA S471 был успешно применен в проектах обустройства морских месторождений с ледовым режимом, таких как Терра Нова (Terra Nova) и Уайт Роуз (White Rose) на Большой Ньюфаундленской банке, к востоку от побережья Канады.

Для сооружений с более низкими уровнями сложности L2 и L3 целевые показатели по годовым вероятностям разрушения повышаются вследствие снижения угроз для персонала и окружающей среды. Для категории сложности L2 принимается приближенно, что сложность составляет порядка 10% от соответствующего значения для категории L1. Аргументация основана на предположении, что заблаговременная эвакуация персонала и мероприятия по остановке добычи в 90% случаев произойдет без ущерба для здоровья персоналу и технических отказов, что выражается в повышении целевого показателя по годовой вероятности разрушения до значения  $10^{-4}$ . Аналогично, для категории L3 дальнейшее десятикратное снижение уровня сложности приводит к значению целевого показателя по годовой вероятности разрушения  $10^{-3}$ . Это значение для категории сложности L3, принятому в настоящем стандарте, соответствует значению «целевого уровня надежности в расчете на 1 год»  $1 \cdot 10^{-3}$ , назначаемому для используемого в стандарте CAN/CSA S471 «Класса безопасности 2».

Учитывая успешный опыт использования указанных целевых показателей в реальных проектах, нецелесообразно повысить их точность, поскольку попытка применения строгого математического аппарата с точки зрения определения целевых показателей с большей градацией величин, представляется необоснованной. Полученные по результатам калибровки значения коэффициентов надежности по нагрузкам и коэффициенты сочетания нагрузок согласуются с положениями других международных стандартов для проектирования морских сооружений.

#### **A.7.2.5 Расчет по предельным состояниям ULS и ALS**

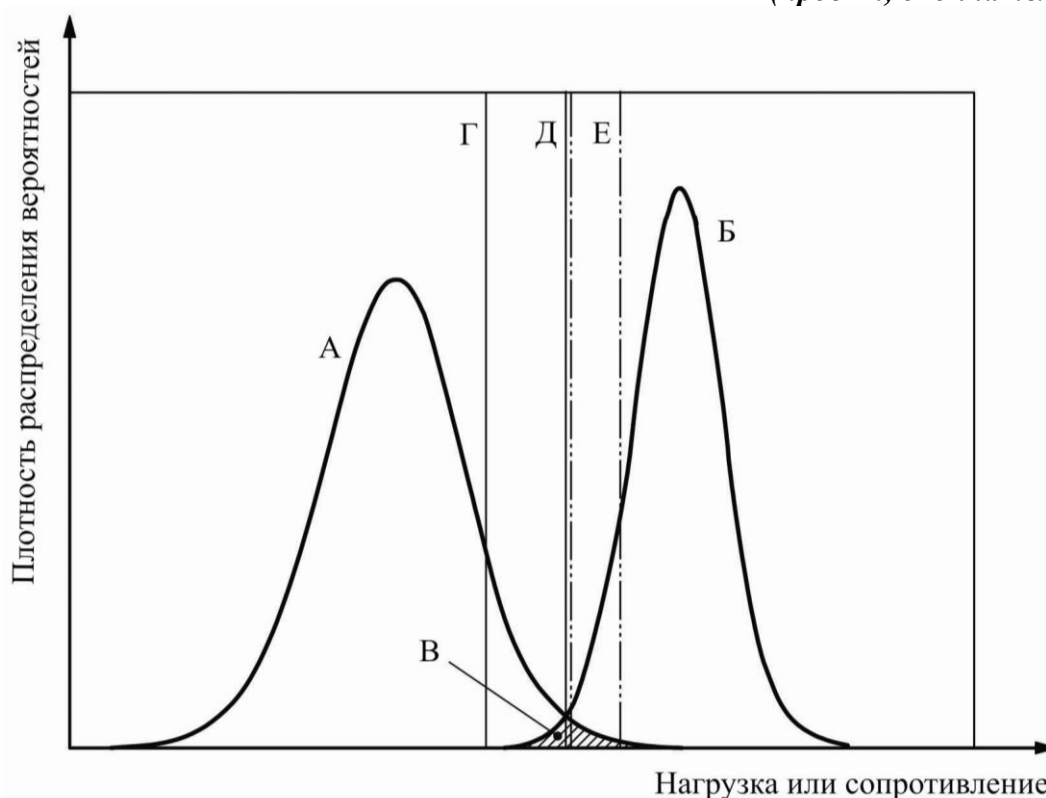
В рамках подхода к проектированию по методу предельных состояний итоговое расчетное значение нагрузочного эффекта вычисляется по результатам анализа различных сочетаний нагрузок с учетом нормативных значений нагрузок и

коэффициентов надежности по нагрузкам и коэффициентов сочетания. Нормативные значения либо рассчитываются для соответствующей вероятности превышения на основе вероятностного описания данной нагрузки, либо принимаются в виде номинальных значений.

Номинальными называются значения базовой переменной, определенные на нестатистической основе, обычно на основании накопленного опыта или имеющихся физических ограничений. Аналогично, нормативные значения сопротивлений приводятся с помощью множителей, представляющих собой коэффициенты надежности по материалу, к расчетным значениям прочности (при анализе основных предельных состояний, ULS) или оцениваются в более широком контексте (для аномальных предельных состояний, ALS). Итоговое расчетное значение нагрузочного эффекта не должно превышать расчетного значения прочности (рисунок А.7.2).

Многие аспекты моделирования нагрузок и сопротивлений могут включать фактор неопределенности, в т.ч. основные гипотезы, неполные или упрощенные математические и механические модели, различные упрощения, а также применение недостаточно проверенных на практике или математически откалиброванных значений. Типичным примером является гипотеза о виде зависимости давления льда от площади контакта для конкретного сооружения и конкретного его расположения – данная гипотеза в принципе может быть проверена только путем проведения специализированных полномасштабных измерений ледовой нагрузки. Хотя принимается, что указанные неопределенности следует учитывать при формулировке критериев проектирования и при дальнейшей калибровке частных коэффициентов надежности по нагрузкам, рациональный подход при проектировании может заключаться в выборе «осторожного» детерминистического варианта, использующего соответствующие консервативные допущения (см. [79]).





А – нагрузка; Б – сопротивление; В – область возможного разрушения;

Г – нормативная нагрузка; Д – расчетные значения: нагрузка и сопротивление с учетом частных коэффициентов надежности; Е – нормативное сопротивление;

$f_z(z)$  – плотность распределения вероятностей;  $z$  – нагрузка или сопротивление

Рисунок А.7.2 – Схематическое представление определения расчетных значений нагрузки и сопротивления

Использование метода проектирования по предельным состояниям с соответствующими коэффициентами надежности направлено на обеспечение приемлемого уровня надежности проекта, однако этот метод сам по себе не позволяет рационально установить этот уровень. В то время как достигаемый уровень надежности может меняться от одной расчетной ситуации к другой, частные коэффициенты надежности оптимизируются таким образом, чтобы отклонение от целевых показателей надежности по совокупности учитываемых ситуаций достигает минимума. Процедура калибровки делает возможным использование полностью вероятностного подхода, в рамках которого вероятность превышения каждого конкретного предельного состояния рассчитывается отдельно. Преимущество подхода, использующего частные коэффициенты надежности для

нагрузок и сопротивлений заключается в том, что благодаря оптимальным значениям коэффициентов, полученных путем анализа взвешенных результатов для всех учитываемых расчетных ситуаций, полученные уровни надежности будут достаточно близкими к целевым показателям надежности и будут иметь достаточно узкий разброс для различных расчетных ситуаций. При этом обеспечивается простота применения подхода на практике.

После выполнения калибровки частные коэффициенты надежности ассоциируются с некоторым набором расчетных ситуаций. Соответствующий перечень учитываемых в проекте расчетных ситуаций обычно приводится в документе под названием «основы для проектирования». Частные коэффициенты надежности могут быть также использованы в сочетаниях экстремальных значений нагрузок, чтобы учесть фактор снижения вероятности реализации экстремального значения одной нагрузки при условии реализации экстремального значения другой (например, максимальные ледовые нагрузки, имеющие место одновременно с сильным землетрясением). Метод проектирования по предельным состояниям в англоязычной литературе имеет другое название: «метод проектирования с помощью частных коэффициентам надежности по нагрузкам и материалу» (Load and Resistance Factor Design method, LRFD, или Partial Factor Design Method, PFD).

## **A.8 Нагрузки и эффекты нагрузки**

### **A.8.1 Общие положения**

Руководство отсутствует.

### **A.8.2 Ледовые нагрузки**

#### **A.8.2.1 Общие принципы расчета ледовых нагрузок**

Процесс расчета ледовых нагрузок проиллюстрирован на рисунке A.8.1. Ключевая задача – идентификация наиболее реальных сценариев взаимодействия, основанных на расчете сооружения, локальном состоянии льдов и гидрометеорологических условий окружающей среды.

#### **A.8.2.2. Нормативные значения ледовых нагрузок**

#### А.8.2.2.1. Нормативные значения

В настоящем стандарте нормативные значения ледовых нагрузок определены для уровня ELIE (экстремальные ледовые нагрузки) и уровня ALIE (аномальные ледовые нагрузки) с использованием заданных уровней годового превышения вероятности  $\alpha$ . Нагрузки ELIE,  $z_{r,E}$ , определены при уровне превышения вероятности  $\alpha=10^{-2}$ , тогда как нагрузки ALIE,  $z_{r,A}$ , определены при уровне превышения вероятности  $\alpha=10^{-4}$  для каждого рассматриваемого сценария и для всех сценариев, рассматриваемых совместно.

Нормативные ледовые нагрузки можно оценить с помощью:

- вероятностного подхода, в котором используется совместное распределение вероятности наиболее важных параметров для получения значений нагрузок ELIE и ALIE; и
- детерминистического подхода, в котором значения экстремального уровня (например, толщина для морского льда) или аномального уровня (например, масса или кинетическая энергия для айсбергов) и номинальные значения (например, давление), характеризующие параметры ледового покрова, комбинируются для получения значений нагрузок уровня ELIE и ALIE.

Для определений «нормативных значений» ELIE и ALIE необходимо обратиться к разделам 3, 7.2.2.3 и 7.2.2.4. Номинальными называются значения базовой переменной, определенные на нестатистической основе, обычно на основании накопленного опыта или физических условий.

Независимо от методики основной целью является оценка соответствующих нагрузок ELIE и ALIE. Больше попыток требуется при использовании вероятностных методик, потенциально позволяющих получить более высокую эффективность при конструировании. В случае, когда для какого-либо конкретного сценария взаимодействия имеется недостаточное количество данных по особым местным условиям, могут использоваться *номинальные* значения параметров.

Для каждого рассматриваемого сценария, ледовая нагрузка,  $Z$  (*годовой максимум*), определяется как максимальная из нагрузок  $V_j$  в соответствующем году:

$$Z = \max(V_1, V_2, \dots, V_j, \dots) \quad (\text{A.8.1})$$

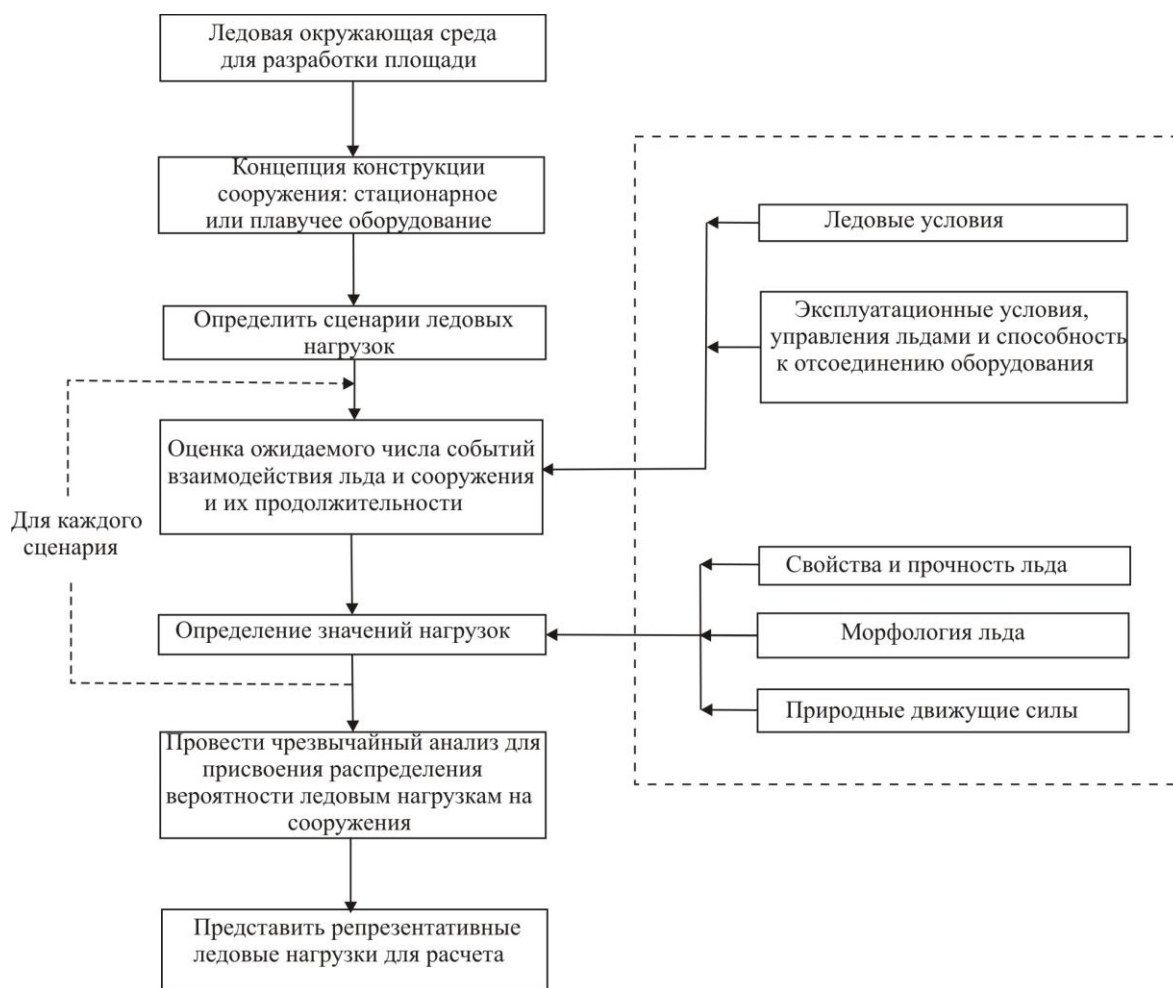


Рисунок А.8.1 – Блок-схема общего подхода к расчету проектных ледовых нагрузок

Если в каком-либо конкретном году соответствующие события не будут иметь места,  $Z$  следует приравнять нулю. Каждая нагрузка  $V_j$ , следовательно и  $Z$ , является функцией  $n$  (в общем случае случайным значением) участвующих параметров,  $X_j$ , а именно:

$$V = V(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (\text{A.8.2})$$

Формула (А.8.2) называется уравнением нагрузки. Отношение между индивидуальной нагрузкой  $V$  и участвующими параметрами  $X_j$  не обязательно должно быть аналитическим выражением, но может состоять из нескольких отношений для механизмов ледяных образований, действующих одновременно против сооружения

Хотя величина  $Z$  обычно является глобальной горизонтальной нагрузкой, она может быть моментом опрокидывания, вертикальной нагрузкой или локальной нагрузкой. Для взаимодействия морского льда параметры  $X_i$  могут включать толщину льда, размеры ледовых полей, скорость дрейфа, ширину взаимодействия, давление разрушения и др. факторы. Параметрами с наиболее важным влиянием на экстремальные значения нагрузки  $Z$  обычно являются толщина и прочность льда как для ровного льда, наслоенного льда или смерзшегося слоя тороса.

#### А.8.2.2.2 Вероятностный подход

##### *Анализ индивидуальных сценариев взаимодействия*

При использовании вероятностного подхода нормативные нагрузки  $z_{rE}$  и  $z_{rA}$  получаются из:

$$P(Z > z_{r,E}) = 10^{-2}, \quad (\text{A.8.3})$$

$$P(Z > z_{r,A}) = 10^{-4}, \quad (\text{для L1}),$$

$$P(Z > z_{r,A}) = 10^{-3}, \quad (\text{для L2}), \quad (\text{A.8.4})$$

где  $P$  является вероятностью превышения.

Эти уравнения могут быть эквивалентным образом представлены так:

$$F_z(z_{r,E}) = 0,99, \quad (\text{A.8.5})$$

$$F_z(z_{r,A}) = 0,9999, \quad (\text{для L1}),$$

$$F_z(z_{r,A}) = 0,999, \quad (\text{для L2}), \quad (\text{A.8.6})$$

где  $F_z(z)$  представляет собой кумулятивную функцию распределения годового максимума,  $Z$ .

Во многих ситуациях годовое максимальное значение можно непосредственно использовать для формирования распределения ледовых нагрузок. Если события используются для определения ледовых нагрузок, таких как воздействие торосов или айсберга, то можно связать распределение годовых максимумов  $F_z(z)$  с  $F_v(v)$ , т.е. с кумулятивной функцией распределения ледовой нагрузки,  $V$ , достигаемой во время *одного* события. Отношения между  $F_z(z)$  и  $F_v(v)$  зависят от частоты событий и характеристик процесса взаимодействия льдов. Используя это отношение и

функцию  $F_v(\nu)$ , можно рассчитать желаемые значения  $z_{r,E}$  и  $z_{r,A}$ , решив уравнения (А.8.5) и (А.8.6) аналитическим или численным образом. Дальнейшее обсуждение отношения между индивидуальными событиями, годовыми максимумами и экстремальными значениями приводится в ссылке [80].

Количество ледовых событий в течение заданного периода часто можно рассматривать как пуассоновский процесс. Для распределения годовых максимумов распределение Пуассона с интенсивностью входного потока  $\eta[1 - F_v(z)]$  дает следующее отношение между  $F_z(z)$  и  $F_v(\nu)$ :

$$F_z(z) = \exp(-\eta[1 - F_v(z)]) , \quad (\text{А.8.7})$$

где  $\eta$  представляет собой среднюю годовую частоту столкновений (см. А.8.2.2.5).

Это уравнение является действительным для произвольных значений  $\eta$  — как для больших (например, в несколько тысяч для торосов), так и малых (порядка  $10^{-3}$  для айсбергов (1 айсберг за тысячу лет)).

Небольшие значения уровней превышения, используемые в уравнениях (А.8.3) и (А.8.4), приводит к тому, что уравнение (А.8.7) позволяет получить приблизительное отношение:

$$F_v(z_{r,\alpha}) \approx 1 - \alpha/\eta , \quad (\text{А.8.8})$$

где  $z_{r,\alpha}$  представляет репрезентативную ледовую нагрузку, соответствующую уровню превышения  $\alpha$  для ELIE и ALIE. Приближенное представление функции (А.8.10) является действительным для  $\alpha < 10^{-2}$ .

**Примечание** – Уравнение (А.8.8) не применяется для  $\alpha/\eta > 1$ , когда события, связанные с воздействием, происходят очень редко и величина  $\eta$  является небольшой. В этом случае нормативная ледовая нагрузка, соответствующая уровню превышения  $\alpha$ , не существует. Например, если частота воздействия айсбергов равна  $\eta = 10^{-3}$ , то можно определить нормативное значение ALIE ( $\alpha = 10^{-4}$ , сооружения L1), тогда как репрезентативное значение ELIE ( $\alpha = 10^{-2}$ ) равно нулю.

События могут быть связаны с дискретным сценарием айсберга, тороса или поля, они могут быть связаны с конкретным механизмом или ледовым режимом либо они могут отражать ежемесячные или сезонные максимальные значения.

Распределение ледовых событий,  $F_v(v)$ , должно отражать совместное распределение параметров  $X_j$ . В большинстве случаев наличие распределений всех параметров не является обязательным для расчета нормативных значений ледовой нагрузки. Некоторые параметры имеют небольшую изменчивость и не оказывают существенного влияния на репрезентативные нагрузки либо не имеют большого влияния в функциональных отношениях, связанных с ледовой нагрузкой. Это позволяет использовать широко применяемые полувероятностные подходы, в которых производится вероятностная обработка нагрузок на сокращенном наборе параметров. При этом уравнение нагрузки (А.8.2) выражается как:

$$V = V(X_1, X_2, \dots, X_j, X_{j+1,N}, \dots, X_{n,N}). \quad (\text{А.8.9})$$

В данном выражении рассматривается совместное распределение главных участвующих параметров  $1, \dots, j$ , тогда как одиночные номинальные значения для  $j+1, \dots, n$  используются для остальных параметров.

В целом должна быть принята самая лучшая оценка, а не консервативные распределения должны использоваться для главных параметров, поскольку их сочетание может привести к нереалистичным значениям или сделать избыточными осторожные оценки нормативных ледовых нагрузок. Следует уделить должное внимание «хвостам» рассматриваемых распределений, поскольку они оказывают сильное воздействие на ледовые нагрузки при малых уровнях превышения.

Когда используются номинальные значения, следует проявлять осторожность при обеспечении результирующих значений нагрузки, как требуется при приближении к уровню ELIE или ALIE. Для этого номинальные значения должны представлять наиболее вероятные значения, связанные с нормативными нагрузками. Например, если ледовая геометрия и сценарий взаимодействия моделируются вероятностным образом, номинальное значение для ледовой нагрузки должно отражать площади контакта, соотношения размеров и скорости взаимодействия, связанные с репрезентативными нагрузками.

*Объединение различных сценариев*

При рассмотрении  $m$  сценариев ледовых нагрузок для данного периода времени, например для года, то следует рассмотреть набор нагрузок, соответствующих этим  $m$  сценариям, например  $Y_1; Y_2, \dots, Y_m$ . Конструктор принимает во внимание максимальные их значения:

$$Z = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_m) . \quad (\text{A.8.10})$$

Если индивидуальными кумулятивными распределениями являются  $F_1, F_2, \dots, F_m$  и если мы полагаем, что нагрузки являются стохастически независимыми то:

$$F_z(z) = P(\text{all } Y_i \leq z) = F_1(z) \cdot F_2(z) \cdot \dots \cdot F_m(z) . \quad (\text{A.8.11})$$

#### A.8.2.2.3 Детерминистический подход

Детерминистические подходы отличаются от вероятностных методик тем, что в них не рассматриваются вероятности распределения нагрузок, а только распределения выбранных параметров. Такой подход может использоваться на стадии предварительного проектирования сооружений L1 и L2 и детального проектирования сооружений L3 в арктических и холодных климатических регионах. При использовании детерминированных подходов нормативные ледовые нагрузки ELIE или ALIE обычно оцениваются по экстремальным или аномальным уровням значений параметров  $X_{I,E}$  и  $X_{I,A}$ , соответственно, для наиболее важного параметра (такого, как давление или толщина льда) и номинальным значениям параметров  $X_{j,N}$  для остальных параметров. Нормативное значение нагрузок для допустимых сценариев  $Y_i$  получаются из уравнений вида:

$$y_{i,E} \text{ или } y_{i,A} = Y_i(X_{1,E} \text{ или } X_{1,A}, X_{2,N}, \dots, X_{n,N}), \quad (\text{A.8.12})$$

а нормативные значения ледовой нагрузки аппроксимируются соотношением

$$z_{r,E/A} = \max\{y_{r1,E/A}, y_{r2,E/A}, \dots, y_{rm,E/A}\}, \text{ где } E \text{ относится к ELIE (т.е. } X_{I,E}), \text{ а } A \text{ к ALIE (т.е. } X_{I,A}).$$

Номинальные значения параметров,  $X_{j,n}$ , должны определяться для значений нагрузок, соответствующих или превышающих уровни ELIE или ALIE. Для этого номинальное значение каждого параметра должно приниматься по консервативной верхней границе (оценке), если он вносит свой вклад в увеличение значения ледовой



нагрузки, и по нижней границе (оценке), если он снижает значение ледовой нагрузки. Примером последнего варианта может быть использование низкого коэффициента трения на наклонной грани сооружения при определении нагрузок, действующих на вертикальную секцию.

Обычно при детерминированном подходе используются величина толщины морского льда ELIE в сочетании с номинальной величиной общего давления при дроблении льда. В этом случае определяется не обязательно экстремальный уровень давления льда, поскольку его величина может определяться при осторожном повышении нагрузок или может оказаться бесполезной при определении соответствующих величин при любом уровне точности. Тем не менее, давление льда должно отражать самую высокую величину, коррелированную с толщиной льда ELIE. Во многих случаях оценки годового ледового взаимодействия максимальное в году ожидаемая величина давления льда соответствует номинальному значению. Если в году происходит небольшое количество взаимодействий, может приниматься более низкая величина. Сочетания всех параметров на уровнях ELIE или ALIE могут дать осторожные оценки нагрузок.

В А.8.2.4.3, А.8.2.4.4 и А.8.2.4.5 рекомендуемые в тексте параметры, связанные со свойствами льда, предлагается использовать при годовой вероятности превышения толщины льда для ELIE, равной  $10^{-2}$  (100 лет), если не указано иное.

#### А.8.2.2.4 Моделирование по методу Монте-Карло

Из-за сложности расчетов ледовых нагрузок обычно на практике для моделирования используются методы Монте-Карло. При наличии достаточных данных целесообразно использовать значения параметров или распределений, полученных при различных сезонах. Следует использовать допустимые отклонения для корреляций между различными вводимыми количественными данными, если они могут быть установлены. Выборки могут быть получены непосредственно из распределений или путем дискретизации распределения по элементам. При использовании дискретизации следует обеспечить точное моделирование хвостов

распределений. Могут использоваться специальные методики, такие как выборка по значимости.

Количество реализаций, необходимое для моделирования по методу Монте-Карло, зависит от частоты, с которой происходит событие ( $\eta$ , в А.8.2.2.5), количества параметров в уравнении нагрузки (А.8.2), корреляции между параметрами и требуемого годового уровня вероятности. Количество реализаций можно оценить как:

$$n_r = q(n_p) \eta / \alpha, \quad (\text{А.8.13})$$

где  $q(n_p)$  – функция количества параметров, для которых в расчетах определены распределения;

$\eta$  – годовая частота событий;

$\alpha$  – годовая вероятность превышения (для сооружений L1  $10^{-2}$  при ELIE и  $10^{-4}$  при ALIE).

Функция  $q(n_p)$  должна определяться на примере, в котором должна быть показана надежность оценки для уровней ELIE или ALIE. Обычно  $q(n_p)$  находится между значениями 10 и 100.

Исследование в целом проводится для изучения чувствительности результирующего распределения ледовых нагрузок по отношению к вводимым параметрам или смещению в используемых физических моделях. Исследование чувствительности должно включать меняющиеся вероятности хвостов распределений для наиболее важных параметров.

#### А.8.2.2.5 Частота столкновений

Конкретный ледовый сценарий может состоять из последовательности дискретных взаимодействий, например серии взаимодействий с ледовыми торосами, районами наслоенных льдов, многолетних ледовых полей или айсбергов. Сценарии, которые могут рассматриваться как дискретные события, часто представляют собой проектные условия для арктических морских сооружений. Частота взаимодействия  $\eta$  может быть определена путем сравнения площади возможного взаимодействия, на

который распространяется ледовое образование и ширины конструкции, как показано на рисунке А.8.2. Частоту взаимодействий можно рассчитать так:

$$\eta = \rho_A (\bar{D} + w) \bar{v}, \quad (\text{А.8.14})$$

где  $\rho_A$  – плотность ледяных образований (число ледяных образований или льдин на единицу площади ледового поля;

$w$  – ширина конструкции или средняя ширина, если конструкция не является круглой;

$\bar{D}$  – средняя ширина ледяных образований, ожидаемых в данном регионе;

$\bar{v}$  – средняя скорость дрейфа в регионе.

Для взаимодействия айсбергов с конструкциями, поперечное сечение которых меняется с изменением глубины, следует использовать среднюю сумму ширины конструкции и ледового образования в точке контакта.

Для ледовых полей из отдельных льдин локальная плотность может быть определена как:

$$\rho_A = \frac{C_N}{\bar{A}}, \quad (\text{А.8.15})$$

где  $\bar{A}$  – средняя площадь льдины;

$C_N$  – (сплоченность) доля площади морской поверхности, занимаемая ледовыми полями.

Если известен только средний диаметр льдины, средняя площадь льдины может быть рассчитана с помощью следующей формулы:

$$\bar{A} = \frac{\pi}{4} (\bar{D}^2 + \sigma_D^2), \quad (\text{А.8.16})$$

где  $\bar{D}$  – средний диаметр льдины;

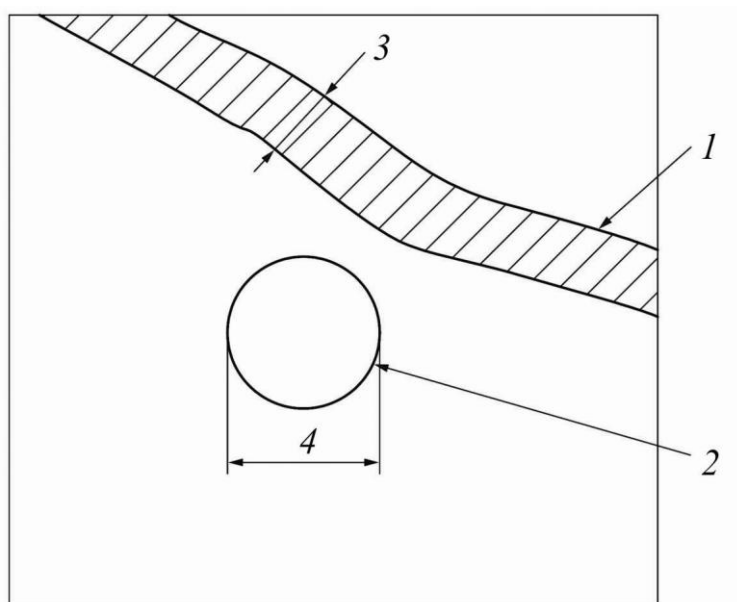
$\sigma_D$  – стандартное отклонение диаметра льдины.

Для дискретных ледяных образований локальная плотность представляет собой среднегодовое (или среднее за сезон, если необходимо) количество образований на единицу площади. Измеренные значения локальной плотности

должны быть скорректированы, чтобы исключить пространственное и временное смещение выборки, где это необходимо.

Средние значения локальной плотности и скорости дрейфа используются для получения средних частот взаимодействия, например за месяц, сезон или год. Ледовой менеджмент и предотвращение столкновений могут быть использованы для изменения частот взаимодействия.

Скорость дрейфа обычно определяется по измерению движения льда. Следует подчеркнуть, что значение, используемое в расчете частоты взаимодействия, должно быть средним по региону, в котором находится конструкция. Оно не должно корректироваться, как указывается в А.8.2.2.6.



1 – область, на которую распространяется (площадь, замечаемая при дрейфе) ледовое образование;

2 – конструкция;

3 – ширина или диаметр ледового образования;

4 – ширина конструкции.

Рисунок А.8.2 – Геометрическое определение вероятности столкновения

#### А.8.2.2.6. Корректировка распределений для расчета столкновений

Характерные распределения размера ледяных образований и скорости дрейфа определяются по снимкам региона в течение определенного времени. Регион

должен быть выбран таким образом, чтобы распределения размера и скорости были репрезентативными для местоположения конструкции.

Для ледяных образований с заданным временем пребывания более крупные и движущиеся более быстро образования имеют более высокую вероятность столкновения с конструкцией. Распределения скоростей, используемые для определения столкновения, обновлены на основе условных распределений с использованием теоремы Байеса. Если « $e$ » – это столкновение или событие, а  $v$  это скорость дрейфа льда, то плотность вероятности скорости  $f_v$  должна быть заменена на  $f_{v|e}$  с использованием следующего выражения:

$$f_{v|e}(v) = \frac{vf_v(v)}{\int_{all\ u} uf_v(u)du}, \quad (A.8.17)$$

где  $u$  – параметр интегрирования, представляющий скорость дрейфа.

Уравнение (A.8.17) — это просто взвешивание распределения скорости (или гистограмма) по скорости, в котором больший вес применим к большим скоростям. Знаменатель представляет собой среднюю скорость дрейфа и масштабирует интеграл функции плотности распределения вероятности скорости дрейфа, нормализуя его до единицы.

Независимо от поля скоростей, распределение горизонтального размера ледяных образований в регионе должно быть скорректировано от  $f_D$  до  $f_{D|e}$  с использованием выражения:

$$f_{D|e}(d) = \frac{(d+w)f_D(d)}{\int_{all\ u} (u+w)f_D(u)du}, \quad (A.8.18)$$

где  $w$  – ширина конструкции;

$d, D$  – ширина ледяного образования;

$u$  – параметр интегрирования, представляющий ширину ледового образования. Для некоторых способов сбора данных и методов расчета, распределения скорости дрейфа и размеров ледового образования могут быть уже обновлены и не требуют изменения. Таким примером является ситуация, когда параметры воздействия получены на основании моделирования дрейфа.

Распределения скоростей дрейфа и размеров ледяных образований должны обновляться с учетом воздействия или условий взаимодействий. Они не должны обновляться для расчетов скорости взаимодействия в уравнениях (А.8.14, А.8.15, А.8.16).

#### А.8.2.2.7. Распределение вероятностей

Выбор параметров распределения является важным, особенно, когда распределение оказывает заметное влияние на экстремальные значения ледовых нагрузок. Необходимо учесть следующее:

- Выбор распределения должен отражать суть процесса, например осадка ледяных образований не должна превышать глубину воды, при этом скорости льда и физические размеры должны быть строго положительными.

- Должны использоваться данные полевых наблюдений, а для определения распределения вероятностей случайных параметров должны быть получены наилучшие оценки.

- Простые формы распределений часто являются наилучшими, особенно там, где количество информации ограничено.

- Смещение выборки должно быть скорректированным. Например, если в выборку не включены маленькие образования, для распределения должен быть указан предел отсечения.

- Распределения должны отражать неопределенность данных. Специальное внимание должно уделяться хвостам распределений параметров, влияющих на увеличение ледовых нагрузок. Экстраполяция экстремальных или аномальных значений из ограниченных наборов данных может привести к значительным ошибкам в ледовых нагрузках и потенциально приводит к ненадежным конструктивным решениям или решениям с чрезмерным запасом прочности. Там, где прямых измерений недостаточно, должны проводиться надежные и обоснованные физические и математические исследования при применении сведений из других географических зон для совместного использования с доступными наборами данных и выявления корреляций с другими локальными

параметрами. Использование консервативных детерминированных значений в этих случаях является эффективной альтернативой.

- Средние значения параметров и распределений, связанные с репрезентативными нагрузками должны быть проверены, чтобы убедиться в том, что они физически реальны и имеют смысл при их комбинировании.
- Сезонные вариации должны учитываться для параметров, влияющих на ледовые нагрузки.

#### А.8.2.2.8. Данные по ледовым нагрузкам

Рекомендации, приводящиеся ниже в А.8.2.3 – А.8.2.6, основываются на большом объеме данных полномасштабных исследований и наблюдений, которые были проведены между 1965 и 2007 гг. Большая часть выражений, которые предложены в А.8.2 для определения ледовой нагрузки, была выведена с использованием этих данных. Дальнейшие данные полномасштабных исследований могут быть использованы для выбора методов определения ледовой нагрузки при условии, что эти данные используются в условиях, аналогичных условиям, при которых эти данные были собраны.

#### А.8.2.3. Сценарии взаимодействия

Ледовые нагрузки являются результатом *взаимодействий* между различными ледовыми образованиями и конструкцией. Форма и размер конструкции, ледовые условия и нагрузки, связанные с окружающими условиями могут привести к различным сценариям взаимодействия, режимам разрушения и последующим ледовым нагрузкам. Факторы, которые могут влиять на сценарии, приводятся на рисунке А.8.3.

Основные физические параметры, используемые для характеристики различных типов взаимодействий льда, даны в таблице А.8.1. Ровный лед обнаруживается везде, где есть морской лед. Однолетние торосы обнаруживаются почти везде, где есть движущиеся морские льдины. Наслоенный лед обнаруживается в непосредственной близости от торосов. Многолетний лед обнаруживается в зонах,

подверженных влиянию арктического пакового льда, он обычно холоднее, чем однолетний лед, и имеет повышенную прочность из-за низкого содержания рассола.

Разработка сценариев потенциальных взаимодействий может быть упрощена путем отсылки на описания физической среды, приведенные в Приложении Б. При детальном проектировании обычно требуется сбор данных, специфических для местных условий.



Рисунок А.8.3 – Факторы, влияющие на сценарии взаимодействия

Ледовые нагрузки для различных сценариев взаимодействия могут быть рассчитаны на основании информации, представленной в таблице А.8.2.

Таблица А.8.1. Общие физические параметры, используемые для описания сценариев взаимодействия

Типы льда	Параметры	Типы льда	Параметры
Ровный лед	Толщина льда	Однолетние торосы	Толщина сплошного или повторно смерзшегося льда
	Скорость дрейфа		Осадка ледового киля
	Размер льдин		Геометрия киля
	Расстояние между льдинами или частота число на ед. длины трассы		Толщина окружающего ровного льда



<b>Наслоенный лед</b>	Общая толщина		Поперечная протяженность смерзшегося слоя
	Скорость дрейфа		Ориентация тороса относительно конструкции
	Время упрочнения или степень сцепления		Длина тороса
	Протяженность областей наслоенного льда		Расстояние между торосами или частота
	Количество слоев наслоенного льда		Направление дрейфа по отношению к конструкции
	Расстояние между торосами или частота		Скорость дрейфа
<b>Многолетние поля</b>	толщина льдины	<b>Айсберги</b>	масса
	скорость льдины		
	размер льдины		скорость дрейфа
	толщина кромки льдины		
	направление дрейфа поля по отношению к конструкции		длина по ватерлинии
	расстояние между торосами или частота		
<b>Многолетние торосы</b>	осадка киля тороса		локальная форма
	скорость дрейфа		направление дрейфа по отношению к конструкции
	геометрия киля тороса		глубина первого контакта с конструкцией
	ориентация тороса относительно конструкции		частота айсбергов
	длина тороса		высота над ватерлинией
	толщина окружающего ровного льда		осадка
	высота надводной части тороса		ширина ватерлинии перпендикулярная к длине
	расстояние между торосами или частота		

ГОСТ Р ИСО 19906

(проект, окончательная редакция)

Т а б л и ц а А.8.2. Подпункты для различных сценариев взаимодействия

	Стационарные конструкции					Плавучие конструкции			Искусственные острова	
Сценарий льда	Вертикальные		Конические или наклонные		Многоопорные	Судовой формы	лонжеронная/буйковая	лонжеронная/буйковая коническая	вертикальные	наклонные
	широкие	узкие	широкие	узкие						
ОЛ ровный	А.8.2.4.3 А.8.2.4.10		А.8.2.4.4 А.8.2.4.10		А.8.2.4.3 А.8.2.4.4	А.8.2.4.3 А.8.2.4.4 А.8.2.4.8	А.8.2.4.3	А.8.2.4.4	А.8.2.4.3 А.8.2.4.10	А.8.2.4.4 А.8.2.4.10
ОЛ поля торосов и обломков	А.8.2.4.5, А.8.2.4.6				А.8.2.4.5 А.8.2.4.9 А.8.2.4.6	А.8.2.4.5, А.8.2.4.6, А.8.2.4.8			А.8.2.4.5, А.8.2.4.6	
ОЛ отдельные поля	А.8.2.4.7				А.8.2.4.7 А.8.2.4.9	А.8.2.4.7				
МЛ ровный	А.8.2.4.3		А.8.2.4.4		А.8.2.4.3 А.8.2.4.9	А.8.2.4.3 А.8.2.4.4	А.8.2.4.3 А.8.2.4.8	А.8.2.4.4 А.8.2.4.8	А.8.2.4.3	А.8.2.4.4
МЛ поля торосов и ледовые гряды	А.8.2.4.5, А.8.2.4.6				А.8.2.4.5 А.8.2.4.9 А.8.2.4.6	А.8.2.4.5, А.8.2.4.6, А.8.2.4.8				
МЛ отдельные поля Айсберги Ледовые острова	А.8.2.4.7, А.8.2.4.6				А.8.2.4.7 А.8.2.4.6 А.8.2.4.9	А.8.2.4.6, А.8.2.4.7, А.8.2.4.8				
Примечания										
1 ОЛ означает однолетний лед.										
2 МЛ означает многолетний лед.										
3 Подпункты А.8.2.2, А.8.2.4.3 А.8.2.5, А.8.2.7 и А.8.2.8 могут применяться для всех сценариев взаимодействия.										
4 Пункт А.8.2.4.11 может применяться для стационарных конструкций и искусственных островов на уровне однолетних льдов.										



#### **А.8.2.4. Глобальные ледовые нагрузки**

##### **А.8.2.4.1. Ограничения по величинам нагрузок**

Для многих сценариев взаимодействия необходимо учитывать следующие ограничительные механизмы по величинам нагрузок - предельного напряжения, предельной энергии и предельной силы, каждый из которых должен быть исследован при определении проектных ледовых нагрузок.

Механизм *предельного напряжения действует*, когда процессы разрушения льда происходят в непосредственной близости (контакта) к конструкции (сжимающие, сдвигающие, растягивающие, изгибающие, прогибающие, раскалывающие) определяют величину ледовой нагрузки. Особенность условий предельного напряжения состоит в том, что ледовое образование имеет достаточную движущую силу (кинетическую энергию), чтобы разрушить лед на контакте с конструкцией без существенной потери скорости дрейфа. Во многих случаях механизмы предельного напряжения связаны с расчетными проектными ледовыми нагрузками. Раскалывание ледового поля – это механизм предельного напряжения, который может действовать до наступления полного контакта с конструкцией.

Механизм *предельной энергии*, иногда называемый механизмом предельного момента (limit momentum mechanism), начинает действовать, когда величина кинетической энергии (или момента количества движения) ледового образования ограничивает ледовую нагрузку. Примеры включают отдельные ледовые поля (например, многолетний лед летом), воздействия ледовых островов или айсбергов.

Механизм *предельной силы (силы навала)* начинает действовать, когда нагрузки от ветра, течений и окружающего дрейфующего льда на ледовое образование в контакте с конструкцией недостаточны, чтобы разрушить лед, примыкающий к конструкции.

Для некоторых сценариев можно учесть комбинацию вышеуказанных механизмов. При проверке механизмов предельной силы необходимо всегда убедиться, что нагрузка меньше, чем рассчитанная в соответствии с механизмом предельного напряжения. Ледяные образования могут разрушаться путем раскалывания (механизм предельного напряжения) при возникновении предельных

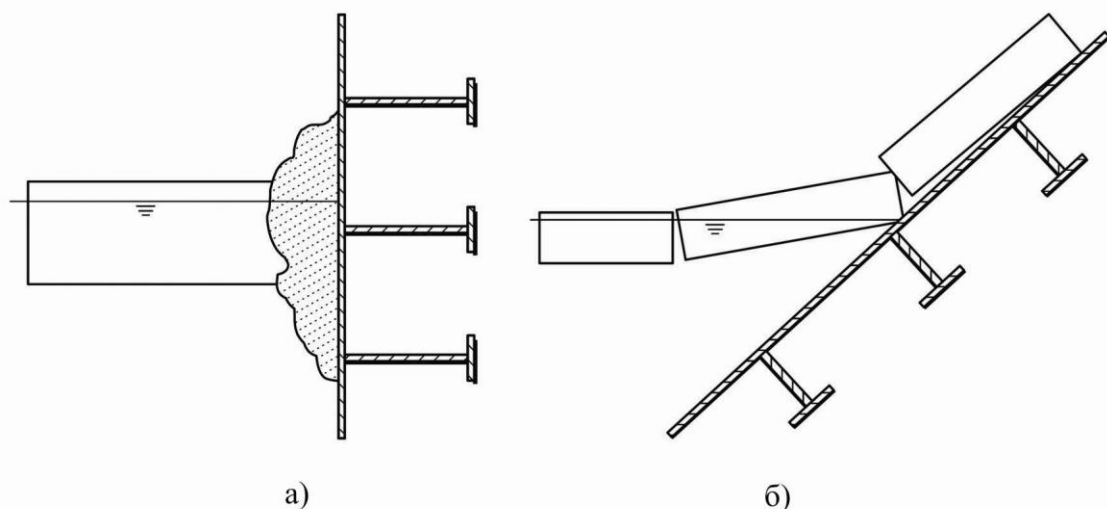
ситуаций. Когда ледовые поля содержат торосы, условия предельного напряжения должны быть проверены как на контакте с конструкцией, так и на кромке между торосом и ровным льдом за ним, а нагрузки предельной силы, приводящие к возникновению торосов, должны быть оценены на кромке ледового поля. Ледовая нагрузка на конструкцию будет возрастать при воздействии каждого из этих механизмов. В общем случае, если одновременно начинают действовать несколько ограничительных механизмов, при проектировании в первую очередь должен учитываться механизм, дающий наименьшую ледовую нагрузку. Эти вопросы обсуждаются далее в А.8.2.4.2.

#### А.8.2.4.2. Режимы разрушения льда

##### *Обзор режимов разрушения*

*Режимы разрушения льда* при контакте с конструкцией значительно влияют на величину ледовой нагрузки. Режим разрушения для морского льда (например: смятие, сдвиг, изгиб, ползучесть) зависит от параметров, таких как толщина льда, наличие торосов, скорость льда, температура льда и форма конструкции. Условия разрушения льда при его изгибе, в общем, приводят к меньшим значениям ледовых нагрузок, чем в случае смятия льда. Для одного и того же типа конструкции могут иметь место различные виды разрушения льда, в зависимости от ледовых условий и скорости взаимодействия, даже во время одного и того же события. Динамическая реакция конструкции обычно приводит к разрушению льда из-за смятия.

*Геометрия конструкции* является важным фактором при определении ледовой нагрузки. Ключевые конструктивные особенности включают тип конструкции (многоопорная, одноопорная или кессонная), вертикальная или наклонная поверхность ватерлинии (см. рисунок А.8.4), проектную форму конструкции и проектные размеры. Ребра жесткости или выступающие части не должны подвергаться ледовой нагрузке.



- а) смятие (вертикальная конструкция)  
б) разрушение в результате изгиба (наклонные конструкции)

Рисунок А.8.4 – Виды разрушения льда перед конструкцией

Профиль конструкции – это главный фактор. Конструкции с вертикальными стенами в районе ватерлинии обычно испытывают более высокие ледовые нагрузки по сравнению с наклонными (для аналогичных размеров ватерлинии). Ледовые нагрузки в общем меньше для наклонных конструкций, за исключением ситуаций, когда значительные количества обломков льда собираются на наклонной поверхности. В последнем случае образование трещин при изгибе льда может быть затруднено и начнут действовать другие режимы или смешанные режимы разрушения с потенциально более высокими нагрузками.

Форма в плане конструкции менее важна, за исключением ситуаций, при которых угол прямоугольной конструкции ориентирован по направлению предпочтительного движения льда. В общем случае влияние формы ватерлинии в плане конструкции составляет 10–15% величины общей ледовой нагрузки [81].

Проектные размеры конструкции влияют на величину ледовой нагрузки. Многие эксперименты и наблюдения демонстрируют эффект влияния размера, в результате чего, общее или реальное давление (общая нагрузка, деленная на номинальную площадь контакта) для более узкой конструкции выше, чем для широкой.

Откалывание ледового образования, намерзшего вокруг конструкции, может потенциально вызвать более сильные ледовые нагрузки. Такое поведение наиболее вероятно в районах с небольшой величиной прилива. *Хотя по опыту известно, что эта ситуация обычно не является критически важной при проектировании больших морских платформ, этому вопросу все же следует уделить определенное внимание.*

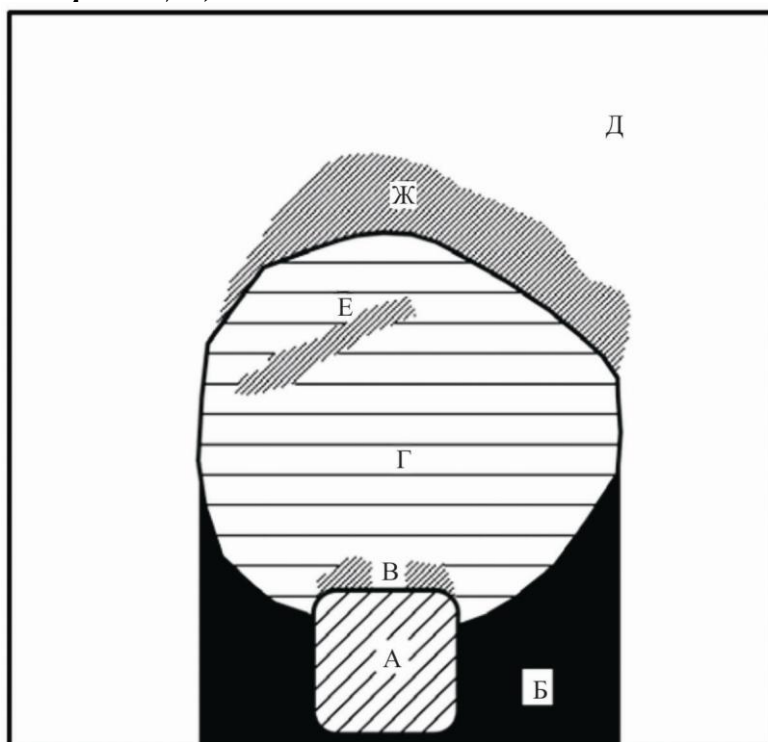
#### *Разрушение ровного льда*

При воздействии ровного или наслоенного льда на вертикальную конструкцию, лед может разрушаться в различных режимах. Это включает образование трещин при изгибе и выпучивании, вертикальное (радиальное) раскалывание и смятие. Смятие обычно преобладает при ледовых нагрузках на вертикальные конструкции. Если поверхность конструкции наклонная, лед разрушается из-за трещинообразования, т. к. он наползает на поверхность или заходит под наклонную грань.

На мелководье масса обломков, соприкасаясь с наклонной плоскостью конструкции, может изменить режимы разрушения от смятия и трещинообразования до смешанного режима или режима образования обломков. Значительная масса обломков, взаимодействуя с дном, может демпфировать ледовую нагрузку, и в конечном счете снизить нагрузку на конструкцию.

#### *Процессы разрушения ледяных полей*

Когда толстый однолетний (ОЛ) или многолетний (МЛ) лед сталкивается с конструкцией, могут образоваться торосы за ледяным полем и наблюдаться локальные разрушения льда, как показано на рисунке А.8.5. Если это происходит одновременно, в результате этих двух процессов будет минимум нагрузок, что используется при проектировании.

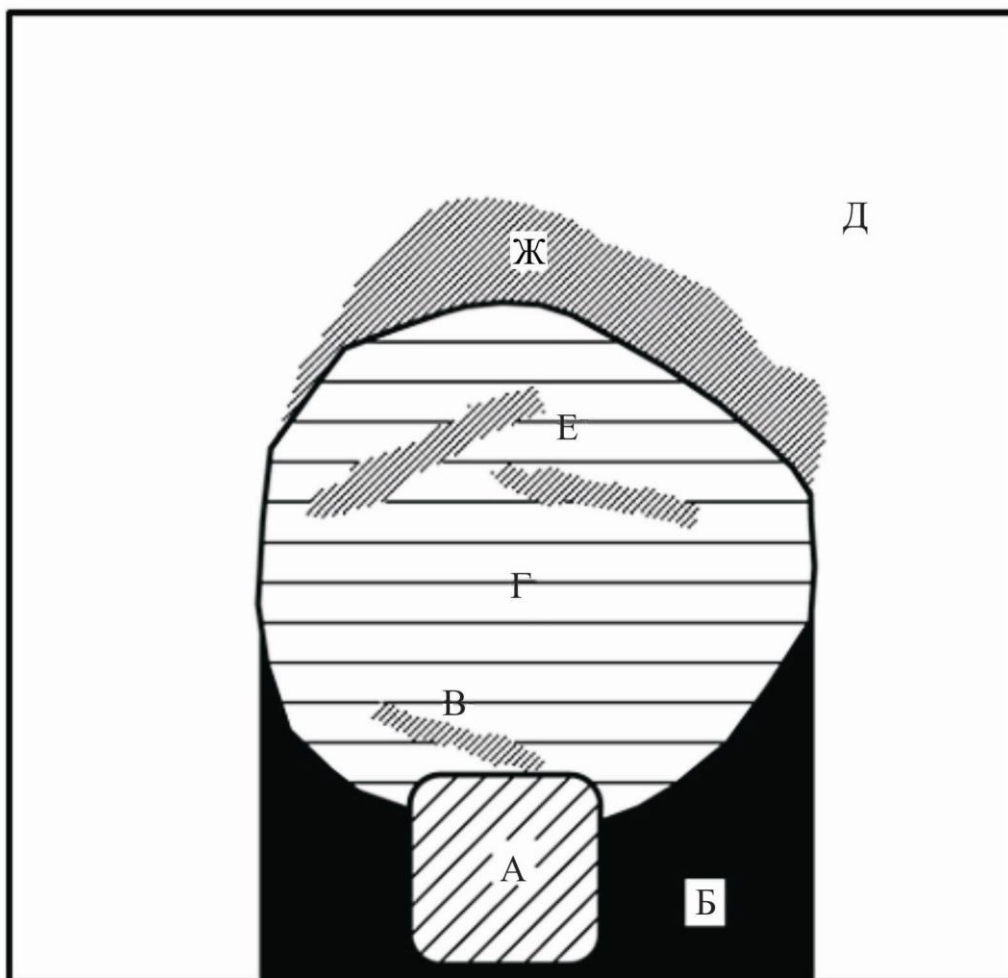


- А – конструкция
- Б – открытая вода в кильватере ледяного поля
- В – локальное разрушение
- Г – ледяное поле МЛ или из толстого льда ОЛ
- Д – лед ОЛ
- Е – участок торосов в ледяном поле
- Ж – образование торосов

Рисунок А.8.5 – Образование торосов и локальные процессы разрушения льда

Если торосы внутри ледяного поля контактируют с конструкцией, как показано на рисунке А.8.6, некоторые разрушения будут наблюдаться внутри и вблизи торосов в дополнение к смятию или трещинообразованию об конструкцию. Потенциальные процессы разрушения, такие как разлом торосов, дробления обломков, показано на рисунке А.8.7. Разрушение тороса может быть результатом посадки на дно или на откос, прилегающий к конструкции. Поскольку процессы разрушения могут происходить одновременно, должна быть учтена минимальная нагрузка при различных процессах.





- А – конструкция
- Б – открытая вода в кильватере ледяного поля
- В – разрушение тороса
- Г – ледяное поле МЛ или из толстого льда ОЛ
- Д – лед ОЛ
- Е – участок торосов в ледяном поле
- Ж – образование торосов

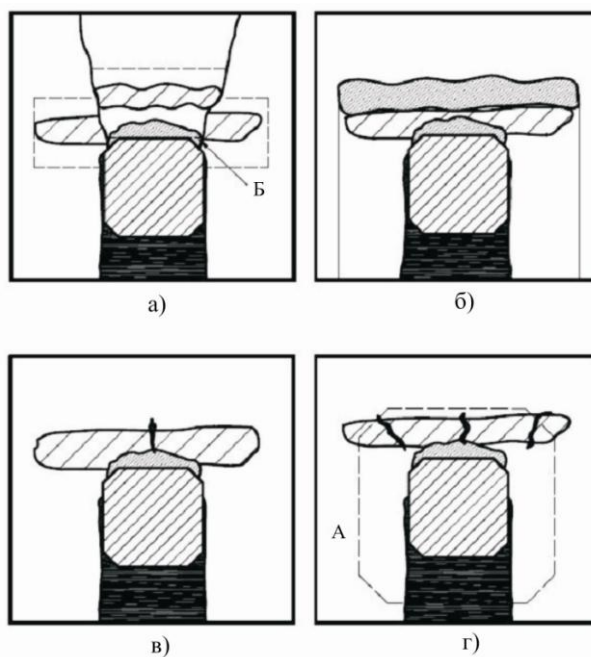
Рисунок А.8.6 – Формирование торосов и разрушение торосов рядом с конструкцией

#### А.8.2.4.3. Вертикальные конструкции

##### *Разрушение ледяного покрова в результате сжатия*

Термин *смятие* относится к разрушению при сжатии, которое может повлечь за собой последующее развитие продольных или горизонтальных трещин, а также обломков при смятии по контакту (рисунок А.8.8).

Наблюдения за взаимодействием льда и конструкции показывают, что реакция льда при различных скоростях этих взаимодействий значительно различается. Среднемасштабные полевые испытания в области взаимодействия порядка квадратного метра показали, что разрушение за счет деформации ползучести происходит при скорости ледового навала менее 1 мм/с. При более высоких скоростях разрушения образуются трещины и отслоения, приводя к образованию зон высокого давления (*звд*) в зоне контакта между льдом и конструкцией, также откалыванию больших кусков льда, которое приводит к возникновению зон низкого или нулевого давления. В результате некоторые мелкие куски льда или узкие полосы получают высокое давление, а другие – низкое или нулевое. Это высокое давление существенно влияет на локальные ледовые нагрузки, как описано в А.8.2.5.



- а) разрушение от среза тороса (пунктирная линия показывает смещение тороса)
- б) обламывание льда сзади торосов
- в) разрушение тороса в одной плоскости
- г) внеплоскостное разрушение тороса
- А – площадь морского дна конструкции
- Б – разрушения льда, по контакту с конструкцией

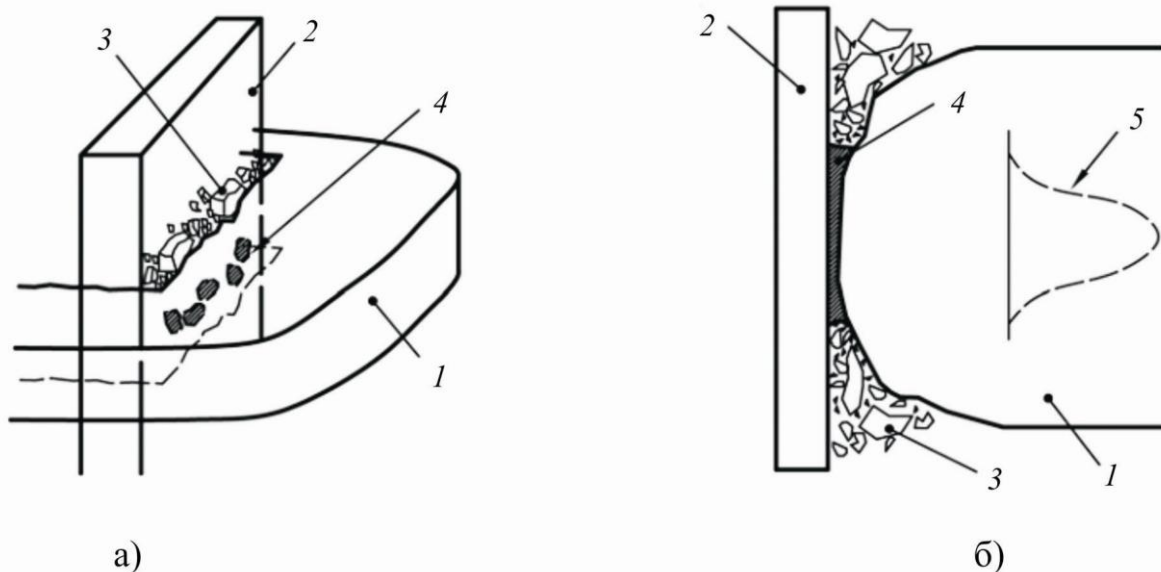
Рисунок А.8.7 – Процессы разрушения торосов

Рисунок А.8.8 показывает схему образования *звд* в ледяном покрове при его взаимодействии с конструкцией. В зонах высокого давления напряженное состояние льда является трехмерным, изменяясь от низких значений с края к высоким значениям контактного давления вблизи центра.

Давления в области сжимающих воздействий от конструкции во льду значительно колеблются в пространстве и времени при преимуществе контактного давления в зонах высокого давления. В этих зонах образуется дробленый лед, состоящий из небольших кусков, в больших количествах. Зоны высокого давления возникают в ограниченных областях, далеко от свободных поверхностей. Это приводит к возникновению линейных участков напряжений в центре ледяного покрова. Зоны высокого давления передвигаются, реагируя на возникновение трещин, иногда уходя в сторону от «наиболее вероятных» мест. Данные полевых наблюдений по этому процессу разрушения использованы в А.8.2.5.2 для того, чтобы определить уравнения для локального давления, обусловленного нагрузками ровного льда.

При медленно текущих ограниченных в боковом направлении взаимодействиях ровного однолетнего льда с вертикальной конструкцией продольные трещины или трещины раскалывания могут развиваться в результате вертикальной деформации поверхности льда. Начавшись в зонах высокого давления, горизонтальные трещины расширяются, достигая величин, в несколько раз превосходящих толщину льда, внося тем самым свой вклад в разрушение ледяного покрова при сжатии.

Процесс разрушения, описанный выше, означает, что локальное давление льда является более многообразным, чем наблюдаемое для области в целом. При расчетах общих нагрузок локальное давление усредняется, в результате чего многообразие снижается.



а) схема взаимодействия ледяного покрова с узкой плоской вертикальной конструкцией

б) профиль взаимодействия ледяного покрова с вертикальной конструкцией

1 – ледяной покров

2 – конструкция

3 – отслаивания и выдавливание

4 – зоны высокого давления в (а), слой дробленого льда зоны высокого давления в (б)

5 – распределение давления по поверхности контакта

Рисунок А.8.8. Схема локальных нагрузок сжатия при взаимодействии конструкции со льдом

### *Общие нагрузки, обусловленные дроблением льда*

При дроблении льда около конструкции общая нагрузка ото льда, перпендикулярная к поверхности,  $F_G$ , может выражаться так:

$$F_G = p_G \cdot A_N, \quad (\text{А.8.19})$$

где  $p_G$  – давление льда, усредненное к номинальной площади контакта, связанное с общей нагрузкой;

$A_N$  – номинальная площадь контакта.

Номинальная площадь контакта – это проекция поверхности неповрежденного ледового образования на конструкцию.

Для ровного льда, наслоенного льда или смерзшегося слоя торосов, номинальная площадь контакта определяется как  $(h \cdot w)$ , где  $h$  – толщина льда, а  $w$  – ширина контакта с конструкцией.

В этом случае:

$$F_G = p_G \cdot h \cdot w, \quad (\text{A.8.20})$$

При взаимодействиях глетчерного льда и больших ледяных образований номинальная площадь контакта определяется как проектная площадь контакта ледового образования с поверхностью конструкции при заданном проникновении в лед.

Когда действуют механизмы предельного напряжения или предельной движущей силы, номинальная площадь контакта может быть постоянной для всего взаимодействия или иметь (по предположению) значительную величину. Для ситуаций предельной энергии проектная площадь обычно увеличивается в процессе взаимодействия в соответствии с формами ледового образования и конструкции.

Давление льда,  $p_G$ , часто является наиболее важным параметром при проектировании защиты конструкций от ледовых нагрузок. Давление, влияющее на общую нагрузку, зависит от температуры льда, номинальной площади контакта, формы или соотношения размеров области контакта, природы контакта, относительной скорости перемещений льда и конструкцией, а также податливости конструкции. Так как давление льда может значительно изменяться во времени, максимальные величины обычно будут зависеть от времени усреднения.

#### *Общее давление морского льда*

Информация, полученная по измерениям на полномасштабных моделях в заливе Кука, море Бофорта, Балтийском и Бохайском морях, использовалась для определения верхней границы ледовой нагрузки для сценариев воздействия однолетних и многолетних льдов на конструкцию. Данные также использовались для анализа влияния толщины льда и ширины конструкции на общую ледовую нагрузку. На основании этих исследований общее давление льда может быть определено как:

$$p_G = C_R \left( \frac{h}{h_1} \right)^n \left( \frac{w}{h} \right)^m, \quad (\text{A.8.21})$$

где  $p_G$  – средняя величина общего давления льда, МПа;

$w$  – проектная ширина конструкции, м;

$h$  – толщина ледяного покрова, м;

$h_1$  – справочная толщина для 1,0 м;

$m$  – эмпирический коэффициент,  $m = -0,16$ ;

$n$  – эмпирический коэффициент:

$$n = -0,50 + h/5, \text{ для } h < 1,0 \text{ м}$$

$$n = -0,30, \text{ для } h > 1,0 \text{ м}$$

$C_R$  – коэффициент прочности льда, МПа.

Уравнение (A.8.21) применимо для жестких конструкций с соотношением размеров  $w/h > 2$ , в которых смещение ватерлинии под действием статической репрезентативной ледовой нагрузки не превышает 10 мм. Это уравнение не включает в явном виде воздействие температуры [82].

Уравнения (A.8.20) и (A.8.21) могут использоваться в вероятностном анализе, определяя функцию плотности вероятности толщины льда и параметр прочности  $C_R$ . Собственная величина общей ледовой нагрузки может затем определяться по рекомендациям, описанных в A.8.2.2. При детерминированном анализе параметр прочности для ELIE может быть определен как  $C_R = 2,8$  на основе данных по однолетним и многолетним льдам, полученным в море Бофорта [83, 84, 85]. По данным, полученным в море Бофорта [86], это значение  $C_R$  может рассматриваться как осторожное, поскольку оно включает некоторое преувеличение, обусловленное податливостью конструкции.

По другим данным, полученных для жестких конструкций в Балтийском море, величина параметра прочности ELIE составила  $C_R = 1,8$  [87] для условий, при которых скорость льда превышала 0,1 м/с, а максимальные смещения ватерлинии по направлению ледовой нагрузки на конструкцию составили примерно 0,4% от толщины льда. Для этих условий полученное значение прочности  $C_R$  не содержит

преувеличения, обусловленного податливостью конструкции. Этот же набор данных показывает, что величина  $C_R$  оказывается примерно на 15–20% больше для ALIE, и поэтому обычно при учете уровня ледовых нагрузок на вертикальные конструкции используется ELIE.

Данные, полученные в полевых условиях и при лабораторных исследованиях, показывают, что хрупкое разрушение, которое превалирует при скоростях льда больше 0,1 м/с, обычно не приводит к получению самых высоких нагрузок. Максимальные пиковые значения встречаются при скорости льда в пределах 0,003–0,1 м/с. Дальнейшее увеличение ледовой нагрузки может возникнуть при небольшой скорости льда, если конструкция является податливой и происходит процесс взаимодействия льда с конструкцией, известный как прерывистое разрушение (intermittent crushing) (см. А.8.2.6.1). Это явление следует рассматривать при вероятностном и детерминированном анализе, если смещения ватерлинии конструкции превышают 10 мм. Лабораторные [88] и полномасштабные данные [87] могут использоваться для определения величины увеличения ледовой нагрузки. Могут быть также использоваться специальные численные методы [88, 89].

Следует также отметить, что в уравнениях (А.8.19)–(А.8.21) не принимаются во внимание эффекты, обусловленные вибрациями, вызываемыми воздействием льда, которые могут возникать в податливых конструкциях. Для выяснения необходимости дополнения статического анализа динамическим, воспользуйтесь рекомендациями, приведенными в А.8.2.6.1.

#### *Влияние локальных ледовых условий на давление льда*

Различные географические зоны имеют различные ледовые условия, обусловленные климатическими условиями, подвижностью и строением льда. Некоторые области, такие как море Бофорта, имеют многолетние льды, в то время как другие (например, Охотское море, залив Кука, Балтийское и Бохайское моря) – не имеют. В качестве руководства по расчету нагрузок в регионах с различным климатом и относительной ледовой прочностью, можно рассмотреть следующие региональные условия.

– **Арктическое**, с 4000 градусо-днями отрицательных температур в течение зимнего сезона (пример: море Бофорта).

– **Субарктическое**, с 2000 градусо-днями отрицательных температур в течение зимнего сезона (пример: Охотское море к северо-востоку от о. Сахалин).

– **Умеренное**, с 1000 градусо-днями отрицательных температур в течение зимнего сезона (пример: Охотское море — Анивский залив, север Каспийского моря, залив Кука, Балтийское море, Бохайское море).

Примечание – Метод расчета градусо-дней отрицательных температур приводится в А.6.5.1.

Индекс замораживания (градусо-дни с отрицательной температурой) очень важный параметр при оценке толщины повторно смерзшегося наслоенного льда и толщины торосов сплошного льда, полученных в результате давления. Если однолетний лед может достигать аналогичной толщины в областях с различными значениями градусо-дней отрицательных температур, толщина пакового льда или смерзшегося слоя будет отличаться из-за различной способности атмосферы удалять тепло изо льда.

Как отмечено выше, параметр прочности льда  $C_R$  оценен как 2,8 МПа для Арктических и 1,8 МПа для Умеренных областей. Если имеются свидетельства о том, что прочность льда в интересующей области отличается, могут использоваться два возможных подхода к определению параметра прочности  $C_R$ , описание которых приводится ниже.

Для первого упрощенного подхода может использоваться значение  $C_R=2,4$  для Субарктических регионов. При альтернативном подходе параметр прочности льда может быть определен следующим образом:

$$C_R = C_{RO} \sigma / \sigma_0, \quad (\text{А.8.22})$$

где  $C_R$  - параметр прочности льда для интересующей области;

$C_{RO}$  - параметр прочности льда для справочной области (например, 2,8 МПа для Арктических областей и 1,8 МПа для Балтийского моря);

$\sigma$  - измеренный или прогнозный индекс прочности для интересующей области;



$\sigma_0$  - индекс прочности для справочной области.

Индекс прочности может включать различные показатели прочности на сжатие, включая результаты измерений, полученных с помощью скважинного домкрата, одно- и многоосных измерений прочности, экспериментов на береговом припае и взаимосвязей между температурой, объемом солевого раствора и прочностью на сжатие. Подчеркнем, что для использования отношения, вид которого приведен в уравнении (А.8.22), следует привести необходимое обоснование.

Следует соблюдать значительную осторожность при масштабировании параметра  $C_R$ , особенно при наличии больших различий между ледовыми условиями и температурами для интересующей и справочной областей.

Калибровка на основе мелкомасштабных одноосевых измерений прочности на сжатие может привести к результатам с низкой достоверностью. Если используются измерения прочности, проведенные “in situ”, они для репрезентативности должны покрывать достаточно обширный географический регион. Дальнейшее обсуждение вопросов, связанных с прочностью на сжатие, приводится в А.8.2.8.2.

При масштабировании индексов прочности необходимо учитывать, что характеристики конструкции могут повлиять на данные измерений. Давление льда при непрерывном разрушении, полученное в одном регионе, не следует напрямую использовать для податливых конструкций. Давления на податливых конструкциях могут быть существенно выше, чем на жестких конструкциях.

Значения прочности, полученные с помощью скважинного домкрата (см. А.8.2.8.2), могут использоваться для получения соотношения величин общего давления для двух регионов. Прочность в этом случае будет зависеть от температуры и степени солёности, так же как, что и для одноосевой прочности на сжатие. Если известно значение прочности по методу скважинного домкрата, среднюю величину прочности, полученную на интересующем месте, можно разделить на 3, чтобы получить оценку одноосевой прочности на сжатие.

Метод, предложенный в [90], может также использоваться в качестве практического средства оценки или масштабирования  $C_R$ . Для оценки индекса прочности ледяной покров разделяется на некоторое число слоев, для которых получены типичные профили температуры и солёности. В этом методе усредненное по времени значение сначала определяется для температуры на границе снега со льдом. При постоянной температуре воздуха максимальное время, необходимое для достижения равновесной температуры льда, составляет 5 дней при  $h = 0,5$  м, 11 дней при  $h = 0,75$  м, 19 дней при  $h = 1,0$  м, 43 дня при  $h = 1,5$  м и 77 дней при  $h = 2,0$  м. Распределение объема рассола  $v_b$  может быть определено по уравнению (А.8.75), предполагая линейный профиль изменения температуры в ледовом покрове.

Средний индекс прочности затем получается как:

$$\sigma_0 = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (\text{А.8.23})$$

где  $n$  – количество слоев ( $n \geq 5$ );

$C_i$  – коэффициент прочности, полученный для слоя из таблицы А.8.3.

Т а б л и ц а А.8.3 – Коэффициент прочности льда,  $C$ , в зависимости от объема рассола (см. уравнение А.8.75)

Параметр	Значение					
$v_b$	0,001	0,010	0,025	0,050	0,100	0,200
$C$ , МПа	8,4	6,0	3,4	1,6	1,0	0,8

При использовании этого метода справочное значение индекса прочности  $a_0$  равняется 2,86 МПа для условий, при которых был получен параметр прочности  $C_R = 2,8$ . Соответственно, индекс прочности  $a_0 = 2,07$  МПа для умеренных областей, для которых параметр прочности составляет  $C_R = 1,8$ .

*Общее сжатие льдов из испытаний, связанных с разрушением льда под тяжестью судна.*

Данные по разрушению многолетнего льда под тяжестью судна показывают, что общая нагрузка является нерегулярной, даже для квазиподобных случаев. Это

связано со случайностью событий образования трещин при разрушении льда. Усредненное общее давление является функцией номинальной площади контакта. Для сценариев столкновения разработано следующее отношение давление-площадь:

$$p_G = C_p A_N^{D_p}, \quad (\text{A.8.24})$$

где  $A_N$  – номинальная площадь контакта;

$C_p$  и  $D_p$  – случайные коэффициенты.

Коэффициенты  $C_p$  и  $D_p$  были определены с использованием больших баз данных по разрушению многолетнего льда под тяжестью судна (Kigoriak, Polar Sea, MV Arctic, Manhattan и Oden). Прогнозы исходной формы ледового образования вокруг конструкции при наличии соответствующего обледенения, а также результирующие максимальные нагрузки для каждой модели классифицировались и сравнивались (на основе вероятности превышения) с испытательными данными по разрушению льда под тяжестью судна. Для выбора лучшей комбинации аппроксимирующих коэффициентов был использован критерий соответствия. Предпочтительными комбинациями являются среднее и стандартное отклонение 3,0 и 1,5 для  $C_p$  (при логнормальном распределении) и среднее и стандартное отклонение минус 0,4 и 0,2 для  $D_p$  (при нормальном распределении) со значениями  $p_G$  в МПа [91].

При экстраполяции на большие площади контакта функция давление-площадь (уравнение A.8.24) может давать нереалистично низкие значения давления для мгновенного сжатия льдов. В таких случаях должна учитываться нижняя граница отсечения для кривой площадь-давление. Для низких значений взаимодействия соотношения размеров рекомендации могут быть получены из уравнения A.8.22.

#### *Точка приложения равнодействующей*

Точка приложения равнодействующей ледовых нагрузок на вертикальную конструкцию может приниматься на средней толщине льда. Для конструкций с некоторым отклонением от вертикали, точка приложения равнодействующей может

приниматься как средняя точка льда, находящегося в контакте с конструкцией при максимальном внедрении.

При взаимодействии айсбергов и других массивных образований точка приложения равнодействующей принимается как точка первого контакта с конструкцией или средняя точка льда в контакте с конструкцией при максимальном внедрении. Для конструкции определенной геометрии, например ступенчатых конструкций, должны проверяться несколько точек контакта при увеличении внедрения, особенно если в результате возникает более высокая точка контакта.

Должны приниматься во внимание изменения уровня воды из-за волнения, приливов, штормов и долгосрочных колебаний. В соответствующих случаях при расчете ледовых нагрузок должна приниматься во внимание корреляция между толщиной льда, скоростью его движения и уровнем воды.

При рассмотрении торсионных нагрузок в качестве точки приложения равнодействующей может использоваться средняя точка площади контакта. В таких случаях направление нагрузки должно отображать тангенциальное торможение.

#### А.8.2.4.4. Наклонные конструкции

##### *Описание процесса разрушения*

Морские конструкции с наклонной ледокольной поверхностью могут рассматриваться в качестве альтернативы вертикальным конструкциям. Ровный лед, взаимодействуя с наклонной конструкцией, разрушится с большей вероятностью в режиме образования трещин при изгибах. Ледовые нагрузки при таких режимах могут быть значительно снижены, чем в режиме сдавливания, который характерен для вертикальных конструкций. Наклонные ледокольные поверхности также могут снизить ледовые нагрузки от ледовых торосов.

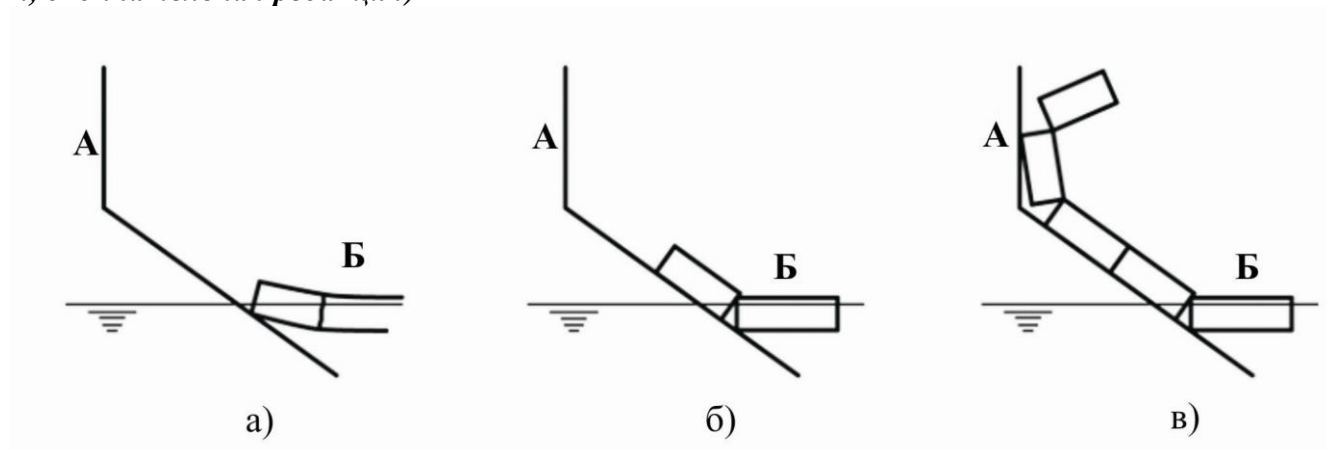
Существует несколько возможных типов наклонных конструкций. Коническая форма является более предпочтительной для морских конструкций из-за своей симметричной формы. В дополнение к ровным коническим конструкциям с круглой ватерлинией также были исследованы многогранные конусы с пологими поверхностями. Были проведены обширные теоретические исследования, а также ограниченные по масштабу программы лабораторных испытаний ледовых нагрузок

на конические или многогранные наклонные конструкции. Ледовая нагрузка на наклонные конструкции была также изучена во время нескольких полевых исследований, включая маяк Кеми-1 в 1983–86 гг. в Ботническом заливе, два пирса моста Конфедерации начиная с 1997 г., эксплуатационные платформы каркасной конструкции в море Бохай, наклонный ледокольный плавучий кессон Куллук в море Бофорта и экспериментальная башня в Момбецу, Япония. Эти конструкции выдержали широкий диапазон нагрузок, обусловленных воздействием однолетних льдов, включая ровный лед, однолетние торосы и скопления стамух. Результаты этих полевых исследований использовались как опорные критерии при верификации теоретических моделей [92] и проектных параметров для вновь построенных конических и наклонных конструкций. При отсутствии информации по полномасштабным исследованиям, дополнительно использовались мелкомасштабные модели для верификации теоретических моделей и проектных критериев.

Геометрия стыка, образованного двумя наклонными плоскими поверхностями, может использоваться в зонах с доминирующим направлением движения льда. Также исследовались наклонные плоские панели для фундаментального понимания характера ледовых нагрузок, вызванных ледяным покровом. Плоские наклонные панели могут также использоваться как элемент конструкции.

Наклонные конструкции ломают подступающий ледяной покров, изгибая его вверх или вниз. Результирующая ледовая нагрузка имеет вертикальный и горизонтальный компоненты. Горизонтальный и вертикальный компоненты ледовой нагрузки на наклонную ледокольную конструкцию значительно ниже, по сравнению с конструкцией постоянного наклона одинакового размера и угла наклона. В наклонной ледокольной конструкции вертикальный компонент ледовой нагрузки направлен вверх, уменьшая эффективное сопротивление сдвигу при взаимодействии конструкции и дна.

Взаимодействие с наклонной поверхностью – это сложный процесс, который включает повреждение нетронутых льда, наплывание кусков льда и аккумуляцию массы обломков на склоне с последующей их очисткой.



- а) структура надвигающегося ледяного покрова;  
 б) лед начинает ломаться и наползать на поверхность конструкции;  
 в) ледяные обломки напозаут на плоскость конструкции и переворачиваются назад;  
 А – наклонная конструкция;  
 Б – надвигающийся ледяной покров;

Рисунок А.8.9 – Процессы, протекающие при взаимодействии наклонной конструкции с ледяным покровом

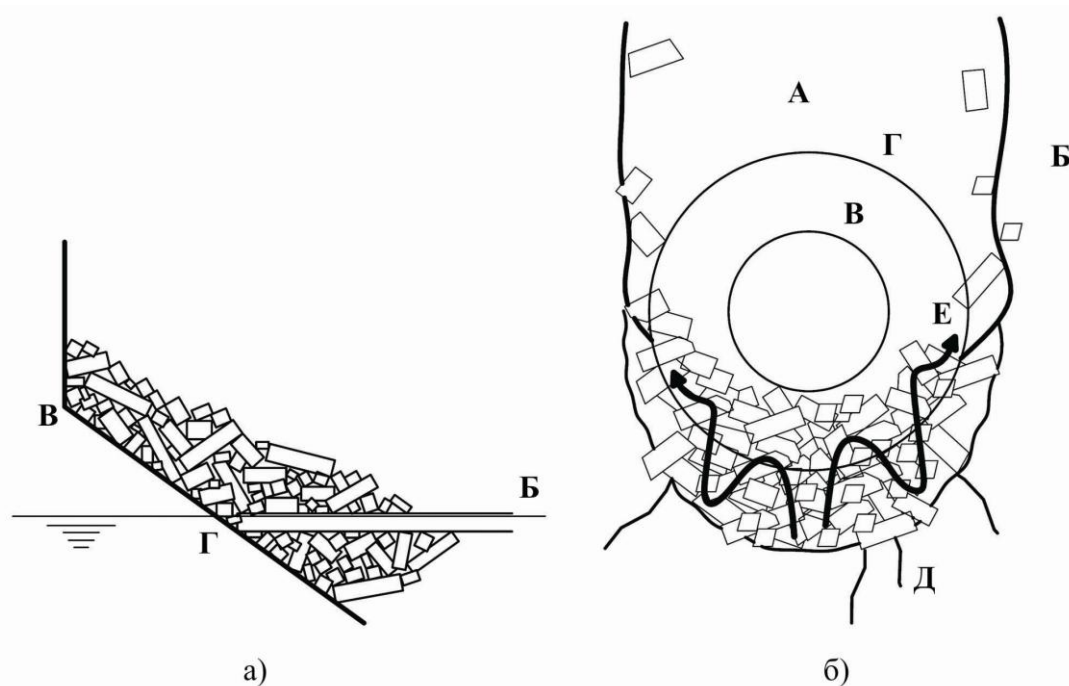
Ледяные обломки могут также накапливаться под ледяным покровом, усложняя тем самым процесс взаимодействия. Максимальная ледовая нагрузка на наклонную конструкцию является функцией нескольких параметров, включая сопротивление изгибу, сопротивление сжатию и сопротивление срезу, коэффициент трения между поверхностью конструкции и льдом, плотность льда, наличие снега, высоту и геометрию ледового образования.

Рисунок А.8.11 изображает компоненты нагрузки ровного льда для двухмерного взаимодействия с восходящей ледокольной конструкцией. Горизонтальные и вертикальные компоненты ледовой нагрузки определяются как:

$$\begin{aligned} F_H &= N \sin \alpha + \mu N \cos \alpha, \\ F_V &= N \cos \alpha - \mu N \sin \alpha, \end{aligned} \quad (\text{A.8.25})$$

где  $N$  – перпендикулярный компонент воздействия на поверхность конструкции;  
 $\alpha$  – угол наклона поверхности конструкции в горизонтали, в радианах;

$\mu$  – кинетический коэффициент трения между льдом и поверхностью конструкции  
(значения см. в А.8.2.8.7).



а) скопление ледяных обломков рядом с наклонной конструкцией

б) крошение льда и очистка от ледяных обломков вокруг конической восходящей ледокольной конструкции

А – открытая вода в кильватере конструкции

Б – надвигающийся ледяной покров

В – вид сверху наклонной плоскости конструкции

Г – ватерлиния конструкции

Д – трещины, формирующиеся в надвигающемся ледяном покрове;

Е – очистка от ледовых обломков вокруг конструкции;

Рисунок А.8.10 – Скопление ледяных обломков вокруг наклонной конструкции и очистка от них

Связь между горизонтальным и вертикальным компонентами тогда определяется следующим образом:

$$F_v = \frac{F_H}{\xi}, \quad (\text{А.8.26})$$

где  $\xi = \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}$ .

Теоретические модели, разработанные для расчета нагрузок ровного льда на наклонные конструкции, могут обеспечить получение достаточно точных оценок ледовой нагрузки при использовании соответствующих исходных данных и предпосылок.

Разработано большое количество методов определения ледовых нагрузок на конические и наклонные конструкции, два из которых описываются ниже. Первый метод основан на теории пластичности, а второй — на определении упругости при изгибе балки.

Наряду с параметрами, используемыми в уравнениях (A.8.25) и (A.8.26), в этих двух моделях применяются следующие параметры:

$H_B$  — горизонтальная нагрузка на конус при ломке льда;

$V_B$  — вертикальная нагрузка на конус при ломке льда;

$H_R$  — горизонтальная нагрузка на конус при наплывании;

$V_R$  — вертикальная нагрузка на конус при наплывании;

$\sigma_f$  — предел прочности ледяного покрова;

$h$  — толщина ледяного покрова;

$w$  — диаметр ватерлинии конуса или ширина наклонной конструкции;

$\rho_i$  — плотность льда, см. A.8.2.8.10;

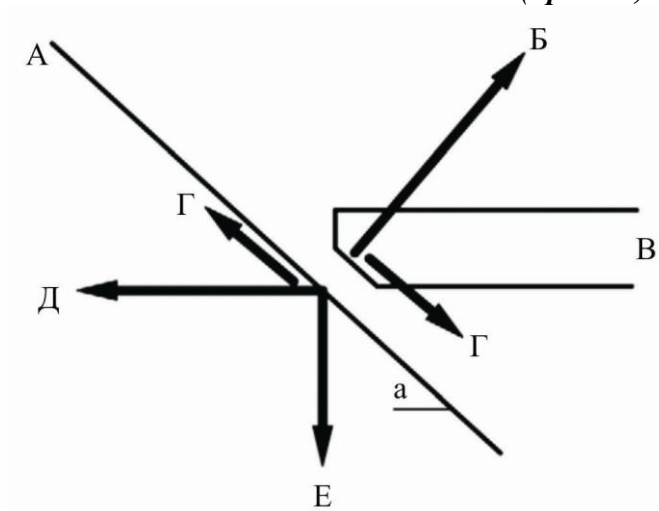
$\rho_w$  — плотность воды;

$g$  — ускорение силы тяжести;

$\nu$  — коэффициент Пуассона для льда, обычно равен 0,3.

Прочность на изгиб зависит от размера образца льда, который используется для получения этого параметра. Поэтому значения этого параметра должны приниматься по данным полевых испытаний, для которых размер образца сопоставим с проектным условием (см. A.8.2.8.3).





А – наклонная плоскость консолидации;

Б –  $N$  - перпендикулярный компонент воздействия ледовой нагрузки на конструкцию;

В –двигающийся ледяной покров;

$\Gamma - \mu N$

$\mu$  - коэффициент трения между льдом и консолидацией;

Д –  $F_H$  – вертикальный компонент ледовой нагрузки;

Е –  $F_v$  – горизонтальный компонент ледовой нагрузки;

$\alpha - \alpha$  – угол наклона плоскости конструкции относительно горизонтали;

Рисунок А.8.11– Компоненты ледовой нагрузки на наклонной поверхности  
в двухмерной постановке

#### *Метод, основанный на теории пластичности для конусов*

Метод, описанный ниже, основан на анализе предельного состояния для ровных льдов при взаимодействии с восходящими и нисходящими конусообразными ледокольными конструкциями [93]. Модель рассматривает нагрузки, обусловленные трещинообразованием при изгибах ледового покрытия и напоязания из-за большого количества обломков льда. Изгиб на восходящем ледокольном конусе аналогичен изгибу на нисходящем ледокольном конусе, если  $\rho_i$  заменить на  $(\rho_w - \rho_i)$ .

Для решения определить следующие функции:

$$f = \sin \alpha + \mu E_1 \cos \alpha, \quad (\text{А.8.27})$$

$$g_r = \frac{\sin \alpha + \frac{\alpha}{\cos \alpha}}{\frac{\pi}{2} \sin^2 \alpha + 2\mu\alpha \cos \alpha}, \quad (\text{A.8.28})$$

$$h_v = \frac{f \cos \alpha - \mu E_2}{\frac{\pi}{2} \sin^2 \alpha + \mu \alpha \cos \alpha}, \quad (\text{A.8.29})$$

$$W = \rho_i g_r h_r \frac{w^2 - w_T^2}{4 \cos \alpha}, \quad (\text{A.8.30})$$

где  $\alpha$  – наклон конструкции к горизонтали (в радианах);

$w_T$  – верхний диаметр конуса;

$h_r$  – толщина наплавляемого льда ( $h_r \geq h$ ).

Эффект накопления ледяных обломков на конусе может быть оценен по величине превышения толщины наплавляемого слоя по сравнению толщиной однородного ледяного покрова. Параметры  $E_1$  и  $E_2$  являются полными эллиптическими интегралами первого и второго рода, определенные как:

$$E_1 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \eta)^{-1/2} d\eta, \quad (\text{A.8.31})$$

$$E_2 = \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \eta)^{1/2} d\eta. \quad (\text{A.8.32})$$

При наплавании однородного ледяного покрова горизонтальная нагрузка наплавания  $H_R$  и вертикальная нагрузка наплавания  $V_R$  определяются из следующих выражений:

$$H_R = W \frac{\tan \alpha + \mu E_2 - \mu f g_r \cos \alpha}{1 - \mu g_r}, \quad (\text{A.8.33})$$

$$V_R = W \cos \alpha \left( \frac{\pi}{2} \cos \alpha - \mu \alpha - f h_v \right) + H_R h_v. \quad (\text{A.8.34})$$

Горизонтальная нагрузка изгиба  $H_B$  и вертикальная нагрузка изгиба  $V_B$  даны как:

$$H_B = \frac{\sigma_f h^2}{3} \frac{\tan \alpha}{1 - \mu g_r} \left[ \frac{1 + Y x \ln x}{x - 1} + G(x - 1)(x + 2) \right], \quad (\text{A.8.35})$$

$$V_B = H_B h_v, \quad (\text{A.8.36})$$

где  $Y = 2,711$  для предела текучести Треска или  $Y = 3,422$  для предела текучести Йохансена;

$$G = (\rho_i g w^2) / (4\sigma_f h).$$

Параметр  $x$  определяется как:

$$x = 1 + \left( 3G + \frac{Y}{2} \right)^{-1/2}. \quad (\text{A.8.37})$$

Суммарные нагрузки в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно оцениваются как:

$$F_H = H_B + H_R \quad (\text{A.8.38})$$

$$F_V = V_B + V_R \quad (\text{A.8.39})$$

#### *Модель, основанная на изгибе упругой балки*

Когда ледяной покров воздействует на откос или конус, трещинообразование при изгибе может оцениваться путем представления ледяного покрова как упругой балки на упругом (Винклеровском) основании. В дополнение в модели, описанной ниже [94, 95], могут рассматриваться трехмерные эффекты, а также наличие ледовых обломков на поверхности конструкции. Этот метод может также использоваться для нисходящих ледокольных конструкций при замене веса льда на плавучесть льда в воде. Данная модель, в которой приближенно учитываются осевые силы в ледяном покрове, а также другие более полные подходы (например, [96]) рекомендуются при их правильном использовании.

Согласно этой модели [95] горизонтальная нагрузка определяется как:

$$F_H = \frac{H_B + H_P + H_R + H_L + H_T}{1 - \frac{H_B}{\sigma_f l h}}, \quad (\text{A.8.40})$$

где  $H_B$  – нагрузка при разрушении;

$H_P$  – нагрузка, необходимая для перемещения ледяного покрова через ледовые обломки;

$H_R$  – нагрузка, необходимая для перемещения ледовых блоков вверх к откосу через ледяные обломки;

$H_L$  – нагрузка, необходимая для поднятия ледовых блоков вверх ледяным покровом до его разлома;

$H_T$  – нагрузка, необходимая для продвижения ледового блока на вершину откоса.

Нагрузка  $H_B$  определяется из:

$$H_B = 0,68 \xi \sigma_f \left( \frac{\rho_w g h^5}{E} \right)^{0,25} \left( w + \frac{\pi^2 L_c}{4} \right), \quad (\text{A.8.41})$$

где  $L_c = \left[ \frac{E h^3}{12 \rho_w g (1 - \nu^2)} \right]^{1/4},$

где  $E$  – модуль упругости;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

Объяснение другим параметрам дано выше.

Нагрузка  $H_P$  выражается как:

$$H_P = w h_r^2 \mu_i \rho_i g (1 - e) \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)^2 \cdot \frac{1}{2 \tan \theta}, \quad (\text{A.8.42})$$

где  $h_r$  – высота нагромождения;

$\mu_i$  – коэффициент трения льда по льду;

$e$  – пористость нагромождения;

$\theta$  – угол, образуемый нагромождением и горизонталью.

Нагрузка  $H_R$  задается как:

$$H_R = w P \frac{1}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}, \quad (\text{A.8.43})$$

где

$$P = 0,5\mu_i(\mu_i + \mu)\rho_i g(1-e)h_r^2 \sin \alpha \cdot \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \cdot \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + \dots$$

$$\dots + 0,5(\mu_i + \mu)\rho_i g(1-e)h_r^2 \frac{\cos \alpha}{\tan \alpha} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + h_r h \rho_i g \frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\sin \alpha}.$$

Нагрузка  $H_L$  задается как:

$$H_L = 0,5wh_r^2 \rho_i g(1-e)\xi \left( \frac{1}{\tan \theta} - \frac{1}{\tan \alpha} \right) \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right) + \dots$$

$$\dots + 0,5wh_r^2 \rho_i g(1-e)\xi \tan \phi \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right)^2 + \xi cwh_r \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \alpha} \right), \quad (\text{A.8.44})$$

где  $c$  и  $\phi$  – коэффициент сцепления и угол внутреннего трения ледового блока.

Последняя нагрузка,  $H_T$ , которая требуется для уравнения (A.8.42) задается как:

$$H_T = 1,5wh^2 \rho_i g \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}. \quad (\text{A.8.45})$$

Уравнение (A.8.40) было изменено по сравнению с исходным уравнением [94], чтобы учесть напряжение сжатия во льду под действием горизонтальной нагрузки, которое входит в знаменатель уравнения (A.8.40). Это учитывается путем использования расчетного значения горизонтальной нагрузки, для которой изменен предел прочности на изгиб следующим образом:

$$\sigma_f^{(1)} = \frac{F_H}{l_c h} + \sigma_f, \quad (\text{A.8.46})$$

где  $l_c$  – общая длина трещины по окружности, оцениваемая как:

$$l_c = w + \frac{\pi^2}{4} L_c. \quad (\text{A.8.47})$$

Соответствующая вертикальная нагрузка определяется уравнением (A.8.26).

Необходимо отметить, что оценки, полученные по этим двум моделям, приведенным выше, значительно зависят от высоты нагромождения обломков. В зависимости от угла наклона и ширины конуса количество ледовых обломков может изменяться в различном образом. Эффекты трения из-за наличия снега или неровностей ледового покрова также влияют на высоту нагромождения обломков.

Эффекты трения могут изменяться из-за различия ледовых режимов. Полевые исследования в море Бохай показали, что процесс очистки от ледовых обломков может быть очень эффективным на узких конусах, особенно при отсутствии снежного покрова. В таких условиях горизонтальная составляющая ледовой нагрузки состоит из нагрузки, обусловленной разрушением льда.

В описанной выше модели нагрузки также очень чувствительны к углу естественного откоса, предназначенного для разрушения льда. В сочетании с высотой нагромождения угол естественного откоса определяет нагрузку от массы ледяного нагромождения на откос конструкции. Движущая сила перемещения надвигающегося ледяного покрова через груды обломков и выше по склону (откосу) быстро увеличивается с этой массой. Эта сила затем передается на конструкцию и является компонентом общей ледовой нагрузки. Выбор угла естественного откоса должен основываться на опыте и наблюдении за реальными конструкциями. Испытания на моделях также позволяют получить рекомендации. В общем случае угол естественного откоса должен быть не меньше угла наклонной конструкции минус 10 градусов. Для очень высоких груд обломков, которые могут скопиться у широких конструкций, угол, примерно на 5 градусов меньше угла уклона, представляет реалистичные объемы обломков на уклоне. Необходимо учесть, что угол естественного откоса, равный углу наклона ( $\theta = \alpha$ ), влечет за собой напользание одного слоя льда на откос (склон). Углы естественного откоса круче, чем углы уклона, не могут рассчитываться по этой модели, потому что результаты приводят к отрицательной величине ледового блока на склоне.

Признано, что в природе идеальный угол естественного откоса для обломков на склоне, как правило, не наблюдается. На практике исследователи ледовой нагрузки на конусе Кеми-1 в Финляндии и моста Конфедерации в Канаде наблюдали многообразные билинейные, закругленные или прямые углы обломков [97, 92]. Геометрия формирования обломков, по-видимому, зависит от прочности льда, скорости, толщины и трения (снега на поверхности льда), а также угла конуса и диаметра ватерлинии. При использовании модели, описанной уравнениями (А.8.40 –

А.8.47), выбор угла естественного откоса должен правильно аппроксимировать объем ледяного нагромождения, который может встречаться на уклоне.

Широкая конструкция, особенно с плоской поверхностью на мелководье, способствует образованию высоких ледяных нагромождений, т. к. лед вокруг них не расчищается. В этой ситуации высота нагромождений достигает до 12–20 м. Фактически, после накопления значительного количества обломков на и перед конструкцией, ледовая нагрузка, необходимая для проталкивания напирającego льда через завал к откосу конструкции, а затем вверх по откосу становится слишком большой, так что режим разрушения льда, в конечном счете, сменится на режим разрушения льда о груды обломков перед конструкцией. Ледовая нагрузка затем определяется по методам разрушения подходящих льдин, воздействующих на ледовый массив. Для широких конструкций могут появиться нагрузки, образующие торосы (или динамические нагрузки от дрейфующего льда), которые описаны в А.8.2.4.5. Если массив обломков льда, накопившийся перед конструкцией, сел на дно и имеет время для консолидации, тогда уравнения, приведенные в А.8.2.4.3, предоставляют осторожную оценку общего давления льда. Также необходимо признать, что если лед воздействует на стамуху, расположенную перед конструкцией, фактическая нагрузка, передаваемая конструкции будет уменьшена из-за сопротивления стамухи. Сопротивление скольжению может быть оценено по площади контакта стамухи и силы сцепления грунта. Для сыпучего грунта вес стамухи, опирающейся на морское дно, умноженный на угол трения грунта, дает адекватную оценку.

#### *Влияние скорости взаимодействия*

Лабораторные и полномасштабные наблюдения показывают, что режим разрушения ледяного покрова на наклонных конструкциях при высокой скорости взаимодействия может изменяться от изгиба на сдвиг. Полномасштабные наблюдения показали также, что толщина льда меньше влияет на разрушение в результате сдвига, чем на разрушение в результате изгиба, поэтому при большой толщине льда разрушение в результате сдвига является превалирующим. Изменение

в механизме происходит из-за инерционных эффектов, которые увеличивают общую ледовую нагрузку.

Образование обломков, в особенности на узких конусах, обычно меньше при высоких скоростях взаимодействия, которые снижают общую ледовую нагрузку.

В результате указанных процессов ледовые нагрузки на наклонные конструкции зависят от скорости дрейфа. Эффект скорости достаточно сложный, его величина зависит от угла наклона, неровности наклонной поверхности и соотношений между толщиной льда и шириной ватерлинии.

Имеющаяся в наличии информация по полномасштабным исследованиям должна использоваться для определения степени влияния и величины эффекта скорости для ледовых нагрузок на наклонные конструкции. При отсутствии такой информации рекомендуется увеличить ледовые нагрузки при скоростях льда более 0,5 м/с. Некоторые рекомендации, относящиеся к эффекту скорости, определенные на основе результатов модельных испытания, приводятся в [98].

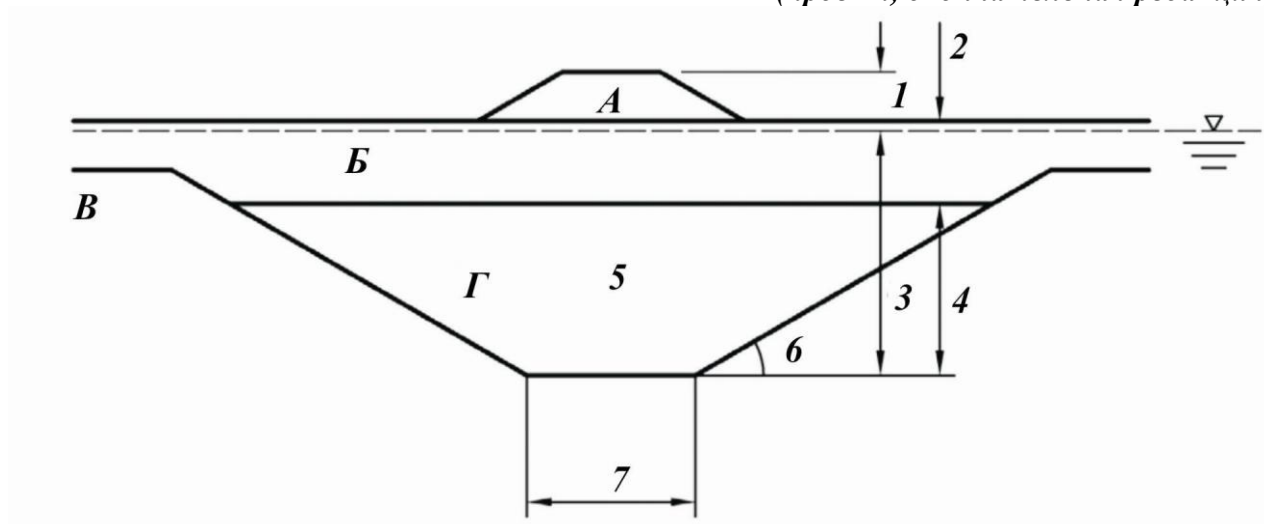
#### А.8.2.4.5. Ледовые обломки и торосы

##### *Однолетние торосы*

Однолетние торосы и поля торосов обнаруживаются везде, где формируется однолетний лед, являющийся достаточно мобильным для их образования. В зонах моря, где имеется только однолетний лед, образование торосов часто являются основным сценарием взаимодействия для проектирования ледовых нагрузок.

Однолетние торосы состоят из паруса, смерзшегося слоя и киля меньшей прочности. Киль состоит из частично смерзшихся ледовых глыб или оторванных глыб с трением только между ними. Большая часть смерзшегося слоя – это слой смерзшегося льда, где несколько более тонких исходных слоев льда повторно заморожены один над другим. Геометрические формы торосов в природе варьируются. В проекте может быть принято симметричное поперечное сечение ледового тороса, как показано на рисунке А.8.12.





А – Надводная часть тороса

Б – Консолидированный слой тороса

В – Ровный лед

Г – Киль тороса

1 –  $H_s$  – Высота надводной части тороса

2 –  $h_c$  – Толщина консолидированного слоя

3 –  $H_k$  – Глубина кия тороса

4 –  $h_k$  – Расстояние между основанием консолидированного слоя льда и основанием кия

5 –  $e$  – Пористость кия

6 –  $\theta_k$  – Наклон кия

7 –  $b_k$  – Ширина основания кия

Рисунок А.8.12 – Идеализированный эскиз однолетнего тороса

Точное теоретическое определение нагрузок, вызванных торосами, весьма затруднено. Верхняя граница оценки горизонтальной нагрузки, вызванной однолетним торосом, может быть получена из выражения

$$F_R = F_C + F_k, \quad (\text{А.8.48})$$

где  $F_c$  – компонент нагрузки, созданный консолидированной частью тороса;

$F_w$  – компонент нагрузки, созданный килем.

Нагрузка надводной части тороса незначительна по сравнению с нагрузкой кия, нагрузкой от надводной части однолетнего тороса можно пренебречь. Вклад компонента  $F_c$  можно оценить, пользуясь инструкциями А.8.2.4.3 в части

параметров консолидированного слоя ледового тороса, или инструкциями А.8.2.4.4 в части наклонных конструкций, подставляя  $h_c$  вместо  $h$ .

Для вычисления нагрузки не консолидированного кия  $F_k$  существует несколько моделей. Модели пассивного разрушения обычно используются для определения нагрузки не консолидированного кия на вертикальные или наклонные конструкции. По результатам измерений удельное сцепление кия варьируется от нуля у основания кия до максимума непосредственно под консолидированным слоем. При таких условиях нагрузка кия на вертикальные сооружения может быть вычислена из выражения [100] с внесением соответствующих изменений [101]:

$$F_k = \mu_\phi h_k w \left( \frac{h_k \mu_\phi \gamma_e}{2} + 2c \right) \left( 1 + \frac{h_k}{6w} \right), \quad (\text{A.8.49})$$

$$\mu_\phi = \tan \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right), \quad (\text{A.8.50})$$

где  $\mu_\phi$  – коэффициент статического давления;

$\phi$  – угол внутреннего трения;

$c$  – условное удельное сцепление кия, следует пользоваться значением, усредненным по всему объему кия;

$w$  – ширина сооружения;

$\gamma_e$  – эффективная плавучесть.

Эффективная плавучесть вычисляется из выражения:

$$\gamma_e = (1 - e)(\rho_w - \rho_i)g, \quad (\text{A.8.51})$$

где  $e$  – пористость кия;

$\rho_w$  – удельный вес воды;

$\rho_i$  – удельный вес льда.

В А.8.2.8.8 приводятся руководящие указания для определения параметров кия ледового тороса.

Можно вывести альтернативные выражения воздействия неконсолидированного кия  $F_k$  на наклонное сооружение. По результатам измерений сцепление кия варьируется от нуля у основания кия до максимума

непосредственно под консолидированным слоем. Для подстановки в уравнение (А.8.49) походит значение, усредненное по глубине кия.

Точка приложения нагрузки от кия однолетнего тороса предполагается расположенной в первой трети глубины кия под основанием консолидированного слоя.

Для вычисления нагрузки кия на многоопорное сооружение следует сравнить суммарное воздействие от каждой опоры с воздействием на эффективную ширину сооружения и выбрать наименьшее значение. Кроме того, следует учесть вертикальную нагрузку ледовых обломков при воздействии льда на подводную часть сооружения.

Метод предельного напряжения для нагрузок, вызванных ледовыми торосами, представлен уравнениями (А.8.49)–(А.8.51). Проектная нагрузка может быть ограничена остальными режимами разрушения, такими, как процесс торошения, разрушение от сдвига и не плоскостное разрушение тороса (А.8.2.4.2). Разрушение от затора вероятно при наличии несвязанных ледовых блоков или при неравномерном вертикальном распределении сцепления. Для таких случаев применима модель, рассмотренная в [94] и [102].

#### *Многолетние торосы*

Размер и форма многолетних торосов отличаются большим разнообразием. Многолетние торосы ближе к прямоугольным по сравнению с однолетними. Соотношение глубины кия к высоте надводной части тороса около 3,3 для многолетних торосов моря Бофорта. Уклон кия около  $30^0$ , уклон надводной части тороса около  $20^0$  относительно горизонтали. Параметры формы тороса должны определяться в зависимости от его географического расположения. При определении толщины многолетнего тороса следует пользоваться суммарной толщиной льда, надводной части и кия.

Вероятные режимы разрушения многолетних торосов, взаимодействующих с вертикальными сооружениями, включают: дробление, сдвиговую деформацию и плоскостной изгиб (А.8.2.4.2). Нагрузка, оказываемая торосом, представляет собой минимальную величину для этих режимов разрушения.

Дробящее давление многолетнего льда непосредственно на широкое сооружение (относительно толщины льда), определяется выражением (А.8.21). Разрушение льда в границах ледового поля за торосом определяется тем же выражением и параметрами. Возможно умножение этих значений давления на 1,5 с учетом условий смерзания.

Иногда на практике пользуются усредненным значением предела прочности сдвига 0,25 МПа в диапазоне 0,15–0,4 МПа для режимов сдвигового разрушения многолетних торосов. Соответственно, предел прочности на изгиб многолетнего льда может приниматься равным 0,40 МПа, хотя в некоторых случаях используются значения до 1 МПа.

Оценка давления многолетнего тороса на конические сооружения может быть произведена разнообразными методами [94, 103, 104]. Этими моделями не учитываются эффекты масштабирования. Учитывая влияние масштабирования на прочность при изгибе, для исключительно сильного давления льда следует вычислить потенциально заниженные значения давления. Пример таких вычислений приводится в приложении 3 [78].

#### А.8.2.4.6 Предельные нагрузки, вызванные процессом торошения

Для вычисления нагрузок, вызванных торошением, требуются два исходных ключевых параметра (рисунок А.8.13). Один из них – нагрузка от торошения на единицу длины ( $p_D$ ) обратной стороны льдины. Второй параметр – ширина ледового образования ( $D$ ), на которую давит паковый лед. Предельная нагрузка торошения:

$$F_B = p_D D. \quad (\text{А.8.52})$$

Наблюдения за торошением и формированием ледовых обломков перед сооружениями показывают, что лед разрушается не в плоскости при изгибе. Первые оценки предельных усилий были основаны на аналитических моделях торошения. Эксперименты проводились в 80-х и 90-х годах 20 века в море Бофорта. В некоторых сериях экспериментов приборы для измерения давления были вмонтированы в плавучие льдины. Результаты этих испытаний [105, 106] свидетельствуют, что сила торошения зависит от ширины  $D$  ледового образования, как показано на рисунке А.8.14.

Общее выражение для процесса торшения:

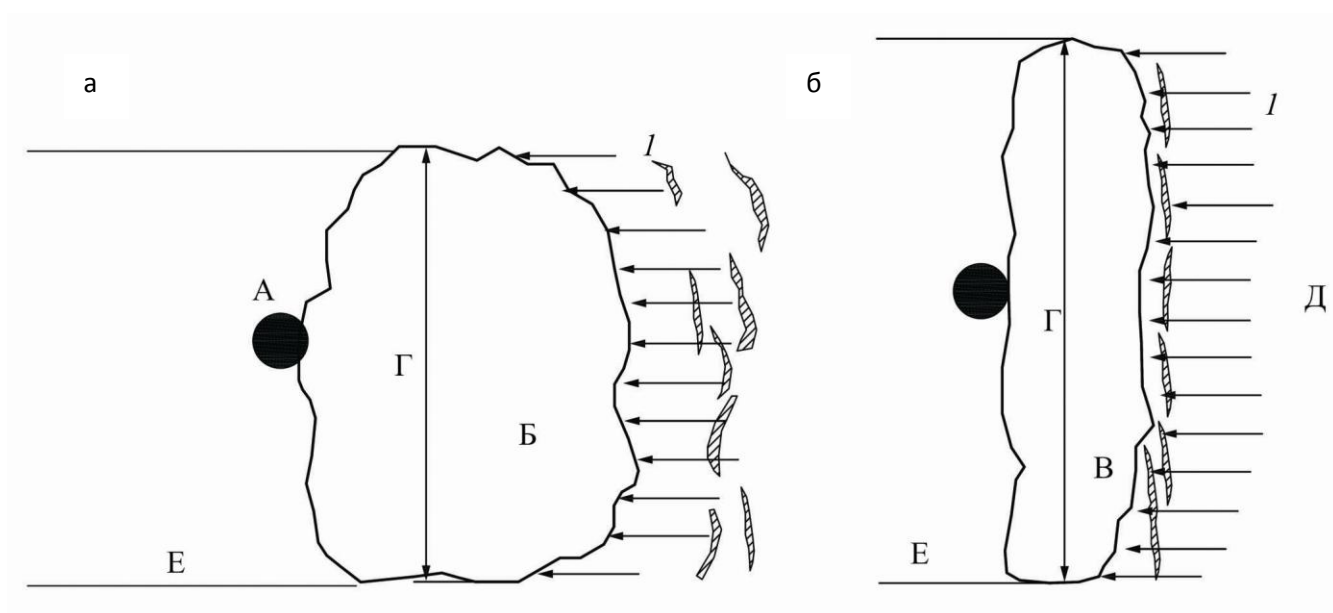
$$p_D = R h^{1,25} D^{-0,54}, \quad (\text{A.8.53})$$

где  $p_D$  – сила торшения на единицу ширины, МН/м;

$h$  – толщина ледового листа, воздействующего на более толстое ледовое образование, м;

$D$  – толщина ледяного покрова, м;

$R$  – коэффициент, см. рисунок А.8.14.



а. Образование тороса при толстом ледяном поле

б. Образование мощного консолидированного тороса

А – конструкция

Б – толстое ледяное поле

В – мощный консолидированный торос

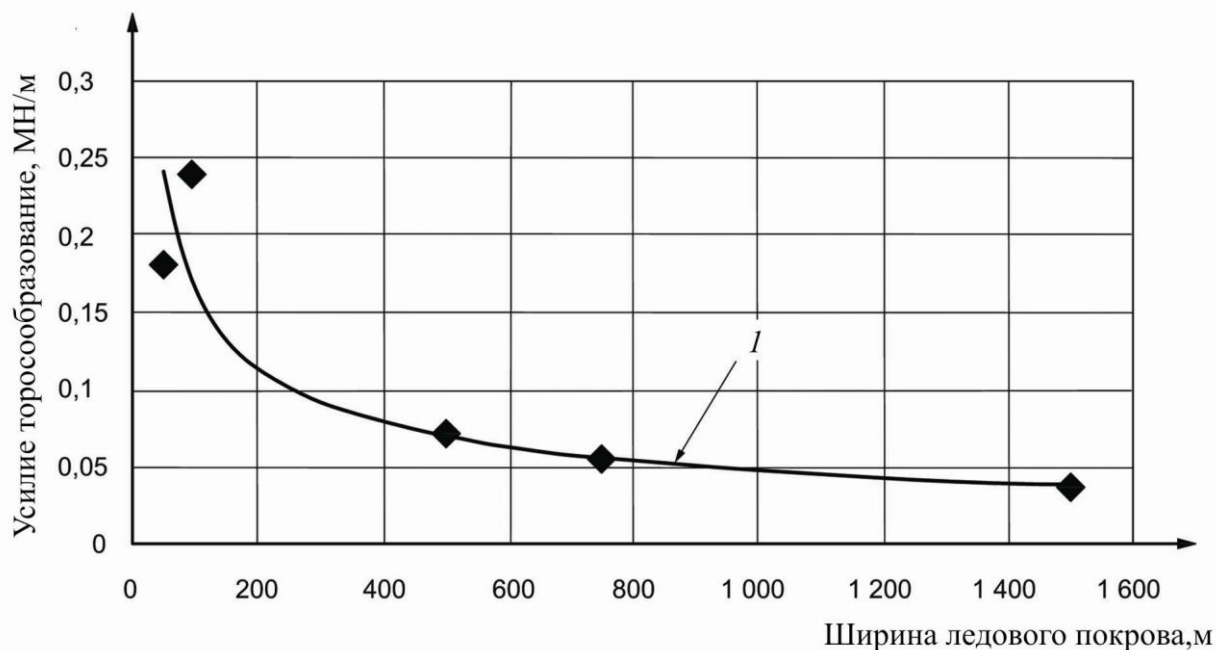
Г – ширина ледового образования, м

Д – окружающий ледяной покров

Е – открытая вода в кильватере конструкции

l –  $p_D$  – линейная нагрузка, приложенная по ширине ледового образования

Рисунок А.8.13 – Формирование торосов позади толстого ледяного покрова или тороса.



$P_D$  — усилие торосообразования, МН/м

$D$  — ширина ледового покрова, м

$$1 - P_D = 2 D^{-0,54}$$

Рисунок А.8.14 — Зависимость усилия торощения от ширины (нормированная возведением толщины в степень 1,25)

Исходя из теорий образования ледовых обломков и результатов измерения, возникло предложение о малой вероятности образования разрушений с образованием обломков при ширине менее 100 м, для таких вариантов следует использовать формулу дробления. По этой причине верхняя граница была откалибрована по результатам полевых исследований, которые приблизительно подходили для формулы дробления на 100 м ширины и толщине ледового покрова 1 м. Ряд данных для ширины, превышающей 1500 м, свидетельствует о сглаживании линейных нагрузок с ростом ширины, и применяемые линейные нагрузки торощения не должны в основном быть меньше значения, соответствующего ширине 1500 м.

На основании изложенных выше априорных соображений верхнее значение доверительной вероятности 99% достигается выбором коэффициента  $R=10$ . Исходя из принятого решения, доверительная вероятность линейного усилия торощения

50% получается из выражения (А.8.53) при  $R=6$ . При использовании вероятностных методов рекомендуется равномерное распределение этого параметра в диапазоне от 2 до 10.

Выражение (А.8.53) базируется в основном на данных по нагрузкам однолетних льдов. Это выражение может также использоваться для мест, где однолетний лед толщиной 2 м окаймляет плавучую многолетнюю льдину диаметром, равным или превышающим 300 м. Рекомендуется задать масштабный коэффициент  $R=10$ . Ситуация смерзания может быть учтена умножением усилия торошения на 1,5. Если диаметр многолетней льдины менее 300 м, может использоваться выражение (А.8.21).

#### А.8.2.4.7 Общие ледовые нагрузки ограниченной энергии

##### *Данные полномасштабной модели*

Соответствующие программы измерения на полномасштабной модели, где кинетическая энергия ледового образования ограничивает ледовую нагрузку, включают:

- Программа ударного воздействия многолетних льдин на острове Ганса, 1980-1983 гг.
- Несколько подробно документированных случаев ударного воздействия на сооружения платформы Моликпак в 1986 г.
- Наблюдения ударных воздействий плавучей льдины на искусственный остров в Татарском проливе в 1992 г.
- Испытание на удар небольшого айсберга в Антарктике в 1990 г.
- Испытательные столкновения с айсбергами в заливе Ньюмена (1992 г.) и на острове Граплинг в 1995 г.
- Испытательные столкновения ледокола «Терри Фокс» с айсбергами в 2001.

За исключением данных по воздействию многолетних плавучих льдин, большая часть данных полевых исследований получена как результаты экспериментов со сравнительно небольшими ледовыми образованиями массой от нескольких сотен до нескольких тысяч тонн. При экстраполяции этих данных в

технические решения, касающиеся ледяных образований массой от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов тонн, необходимо делать поправку на неопределенность.

#### *Затраты кинетической энергии на вращение ледового образования*

Значительная часть кинетической энергии может израсходоваться на вращение ледового образования при скользящих ударах, смягчая нагрузку по сравнению с лобовыми ударами. Если  $E_0$  – начальная кинетическая энергия ледового образования, то сниженная вращением кинетическая энергия для удара о стационарную конструкцию может быть представлена выражением [107]:

$$E_k = \frac{E_0}{1 + \frac{\varepsilon_z^2}{r_z^2} + \frac{\varepsilon_y^2}{r_y^2}}, \quad (\text{A.8.54})$$

где  $\varepsilon_z, \varepsilon_y$  – эксцентриситеты в вертикальной и горизонтальной плоскости соответственно;

$r_z$  и  $r_y$  – это соответствующие радиусы вращения ледового образования.

Эксцентриситеты представляют собой расстояния между точкой контакта и центром массы ледового образования относительно направления движения непосредственно перед ударом. Радиусы вращения должны отражать внесенные инерционные воздействия. Для ударных воздействий ледяных образований можно пренебречь членом  $\varepsilon_z^2 / r_z^2$ .

Для вероятностного и полувероятностного анализа эксцентриситеты и радиусы вращения должны быть случайными параметрами, отражающими диапазон размеров ледяных образований, геометрию контакта и направления дрейфа относительно конструкции. Снижение ударной энергии за счет вращения ледового образования может быть сделано для детерминистского анализа или для конкретной конструкции и геометрии ледяных образований.

#### *Ударные воздействия*

Ударные ледовые нагрузки могут быть оценены численными методами или аналитически. Оба варианта оценки базируются на следующем предположении:



ударное воздействие достигает своего максимума при прекращении проникновения, а номинальная площадь контакта становится максимальной.

Аналитические решения и численные модели требуют представления мгновенного ударного воздействия как функции глубины проникновения. Такая функция может быть представлена связью площадь–давление, описывающей прочностные свойства льда, и связью площадь контакта–глубина проникновения, зависящей только от конструкции и геометрии ледового образования.

Аналитическое решение возможно получить, когда каждая из этих связей представлена степенной зависимостью. Связь давление–площадь для основных форм ледового образования может быть представлена выражением

$$p = C_p A_N^{D_p}, \quad (\text{A.8.55})$$

где  $A_N$  – номинальная площадь контакта;

$C_p$  и  $D_p$  – коэффициенты.

Связь площадь контакта–глубина проникновения может быть представлена выражением:

$$A_N = C_A \delta^{D_A}, \quad (\text{A.8.56})$$

где  $\delta$  – глубина проникновения конструкции в лед;

$C_A$  и  $D_A$  – коэффициенты.

Максимальное конечное усилие взаимодействия может быть представлено выражением:

$$F_E = a \left[ \frac{b+1}{a} E_K \right]^{\frac{b}{b+1}}, \quad (\text{A.8.57})$$

где  $E$  – это ударная энергия с поправкой на вращение ледового образования;

$$a = C_p C_A^{D_p+1};$$

$$b = D_A (D_p + 1) \text{ для } b > 0 \text{ [107]}.$$

Давление плавучих льдин или ледяных образований постоянной толщины может быть представлено выражением:

$$p = C_h h^{D_1} w^{D_2}, \quad (\text{A.8.58})$$

где  $h$  – толщина льда;

Соответствующая зона контакта может быть представлена выражением:

$$A_N = h C_w \delta^{D_w}, \quad (\text{A.8.59})$$

где  $C_w$  и  $D_w$  – коэффициенты.

В этом случае коэффициенты выражения (A.8.57):  $a = C_h C_w^{D_2+1} h^{D_1+1}$  и  $b = D_w (D_2 + 1)$ . Коэффициенты  $C_w$  и  $D_w$  определяются геометрией сооружения и ледовых формирований. При отсутствии особенностей геометрии сооружения и ледяных образований можно воспользоваться простыми геометрическими фигурами.

Показанные выше связи площади контакта могут использоваться для отражения разнообразия геометрии сооружений и ледяных образований, они не ограничиваются небольшими глубинами проникновения, поскольку имеются соответствующие степенные зависимости. Параметры  $C_w$  и  $D_w$  плавучих льдин должны базироваться на измерении плоскости льдин в заданном регионе и форме сооружения. Параметры  $C_w$  и  $D_w$  плавучих льдин большой массы, например, айсбергов, должны базироваться на измерениях конкретного ледового образования и форме сооружения. При отсутствии данных о геометрии сооружения и ледяных образований можно воспользоваться простыми геометрическими фигурами. Для круглых плавучих льдин и плоских или округлых фасадов сооружений хорошей аппроксимацией является степенная зависимость, отражающая неглубокие проникновения относительно радиусов плавучей льдины и сооружения.

В детерминистских решениях давление, площадь контакта и коэффициенты ширины контакта являются постоянными величинами. В качестве первичной аппроксимации воздействия морской плавучей льдины можно принять параметр  $C_h$  равным параметру  $C_R$  в выражении (A.8.21). При определенных сочетаниях параметров значения, меньшие  $C_R$ , могут в принципе оказать более весомые воздействия, поэтому рекомендуется проверять диапазон значений, меньших и равных  $C_R$ . В отсутствии результатов измерений можно сопоставить экспоненты  $D_1$  и  $D_2$  параметрам выражения (A.8.21) как  $D_1 = n-m$  и  $D_2 = m$ .

Для вероятностных решений весовые параметры могут быть случайными, а площади контакта или ширина должны отражать распределения форм измеренных ледяных образований и направление ледового воздействия относительно конструкции. Распределение давления должно отражать среднее ударное давление для каждого взаимодействия. Для ударных ситуаций случайные значения коэффициентов давления  $C_P$  и  $D_P$ , приводятся в А.8.2.4.3 (общее давление льда по таранным судовым испытаниям).

#### *Гидродинамические воздействия*

Гидродинамические воздействия, связанные с перемещением ледяных образований вблизи сооружения могут быть значительными, особенно в условиях низкой концентрации льда и относительно небольших ледяных образований, воздействующих на широкие сооружения. Из-за гидродинамических воздействий более мелкие ледяные образования могут замедляться по мере приближения и вращения вокруг сооружения. Необходимо учитывать присоединенную массу воздействующего ледового образования с должным учетом наличия морского дна и сооружения [108]. При заметном смещении сооружения в ходе взаимодействия необходимо принимать во внимание его присоединенную массу.

#### *Податливость сооружения*

Податливость сооружения сложным образом влияет на ударное воздействие. Максимальное ударное действие меньше для податливого сооружения, поскольку часть кинетической энергии воздействующего ледового образования расходуется на деформацию или перемещение сооружения. С другой стороны, воздействия на швартовую систему или фундамент сооружения могут возрасти из-за инерционных сил, если продолжительность воздействия сравнима с периодом первой гармоники собственных колебаний конструкции.

В приведенных выше выражениях податливость сооружения не учитывается. Подобным случаям следует уделять особое внимание.

#### А.8.2.4.8 Плавучие сооружения

Плавучие сооружения, находящиеся среди айсбергов и морского льда, уникальны, поскольку практически все они допускают отклонение и эксплуатируются при ледокольной поддержке и контроле над ледовой обстановкой. Эти мероприятия координированы планом контроля ледовой обстановки, включающим систему тревожного оповещения для поэтапного аварийного останова согласно описанию разделов 13, A.13, 17 и A.17.

Для подключенного плавучего сооружения необходимо учитывать общее воздействие льда на систему позиционирования и корпус, поскольку распределение параметров связано с ледовым воздействием. Особое значение эти параметры имеют для верхнего участка интервала распределения контролируемого льда, на что рассчитана система жизнеобеспечения станции. Необходимо также учитывать воздействие льда на корпус в отключенном состоянии сооружения, а также при его транспортировке. Факторы воздействия на плавучие сооружения перечислены в 13.4.

Для айсбергов формирующие воздействия льда можно определить по частоте ударов и по совместному распределению размеров айсберга, относительной скорости айсберга и плавучего сооружения при ударе, давлению льда, участку контакта и дополнительным условиям. Поскольку обработка ледового окружения и отсоединение сказываются на частоте и распределении параметров ударов, процедура вычисления воздействия льда на плавучие сооружения аналогична процедуре для неподвижных сооружений. Главное отличие заключается в необходимости заложения в расчеты гибкости системы позиционирования для рассеивания кинетической энергии удара. Прочие условия системы для системы позиционирования перечислены в 13.7.

В море, среди ледового окружения обработка льда и отсоединение могут снизить частоту тяжелых ледовых происшествий. Лед, достигший сооружения, обычно представляет собой пульпу ледовых обломков с включением более крупных плавучих льдин и, возможно, ледникового или многолетнего льда. Расчетные операции обычно определяются толстыми ледовыми формированиями, которые невозможно обнаружить под коркой окружающего льда, они гораздо труднее

поддаются обработке, чем предполагалось; на расчетные операции влияют также взаимодействия с боковыми поверхностями сооружений корабельной формы при стесненном маневрировании.

Воздействия обрабатываемого льда лучше всего определяются на основе полномасштабных данных. В источнике [109] приводится метод с использованием полномасштабных данных конической буровой платформы Кулук (море Бофорта), где ледовые воздействия связаны с размером и толщиной обрабатываемого льда. Этот метод приводится также в источнике [110]. Поскольку другие методы, основанные на полномасштабных испытаниях ледокольных судов, находятся в стадии разработки, они еще не опубликованы в общедоступной литературе.

Несмотря на упомянутые выше эмпирические методы прогнозирования поведения льда в условиях ледового контроля, совершенно очевидна необходимость дополнительных полномасштабных исследований.

#### А.8.2.4.9 Многоопорные сооружения

Метод расчета, рассмотренный ниже, основан в основном на лабораторных исследованиях. Общее предельное напряжение многоопорного сооружения для получения квазистатического воздействия на опору может быть на первом этапе определено с помощью руководства в А.8.2.4.3 или А.8.2.4.4. Общее воздействие определяется следующим выражением:

$$F_s = k_s k_n k_j F_1, \quad (\text{А.8.60})$$

где  $F_1$  – ледовая нагрузка на опору;

$k_s$  – учитывает помехи и укрытия;

$k_n$  – учитывает эффект неравномерного разрушения;

$k_j$  – учитывает образование заторов.

Ледовая нагрузка зависит от расстояния  $L$  между опорами переднего ряда, взаимодействующих со льдом. Если это расстояние большое, опоры взаимодействуют с ледовым покровом независимо от других опор. В этом случае укрывающий фактор  $k_s$  достигает величины  $n$ , равной количеству опор. Когда все опоры перпендикулярны направлению дрейфа ледового пласта, данные испытаний

усеченной модели дают возможность предположить, что опоры действуют независимо друг от друга, если соотношение между зазором  $L$  между опорами и шириной  $w$  отдельной опоры находится в диапазоне  $L/w > 5$ . Экспериментальные данные по мосту Конфедерации позволяют предположить некое взаимодействие опор для отношения  $L/w$  около 10. Для типовой многоопорной конструкции, опоры которой не расположены в одном ряду, они становятся независимыми при повышенном значении  $L/w$ . Для типовой многоопорной конструкции с четырьмя опорами максимальный укрывающий коэффициент варьируется от 3,0 до 3,5. Воздействие льда зависит от угла атаки дрейфующего льда. Некоторые руководящие указания по распределению нагрузки между опорами многоопорной конструкции, основанные на испытаниях модели, приводятся в [111].

Пиковые значения нагрузок на разные опоры не возникают одновременно, если только конструкция не очень податлива. Это можно учесть понижающим коэффициентом  $k_n$ . В отсутствии экспериментальных данных этот параметр принимается  $k_n = 0,9$ .

Заторы между опорами вероятны при  $L/w < 4$ . Это может привести, хотя и не обязательно, к значительному увеличению ледовой нагрузки. Экспериментальные данные могут объяснить влияние образования заторов для конкретной конструкции. При наличии любого шанса образования заторов между опорами, необходимо принимать во внимание оба возможных варианта – образование и отсутствие заторов, и выбирать максимальную величину воздействия льда. При анализе варианта образования заторов нагрузка предельного напряжения должна быть проверена для каждой опоры, чтобы обеспечить траекторию действия нагрузок. Заторы наиболее вероятны из годовичных торосов, поскольку на их киль налипают ледовые обломки. Критическое расстояние может быть шире.

Необходимо отметить, что воздействия, возникающие в условиях предельного напряжения, рассмотренных выше, могут быть ограничены другим механизмом разрушения, рассмотренным в А.8.2.4.2. Оценивая эти механизмы, необходимо учитывать возможность остановки изолированной плавучей льдины после взаимодействия с ведущей опорой. Остановка может также произойти позднее, до

того как все опоры вступят во взаимодействие с ледовым полем. Для оценки предельной кинетической энергии  $F_E$  можно воспользоваться руководящими указаниями А.8.2.4.6. На основании этого анализа исходная оценка величины типовой нагрузки выбрана как минимум  $F_E$  и  $F_S$ , полученных из выражений (А.8.57) и (А.8.60).

При остановке плавучей льдины после начального взаимодействия с многоопорной конструкцией проникновение может еще продолжаться, если процесс образования торосов (А.8.2.4.2, А.8.2.4.6) активизируется и предельное силовое воздействие  $F_F$  полученное из выражения (А.8.52) ( $F_F = F_B$ ) превысит  $F_E$ . При таком условии типовое воздействие на многоопорную конструкцию выбрано как минимум  $F_S$  и  $F_F$ . Дополнительные руководящие указания по многоопорным конструкциям приводятся в источнике [112].

#### А.8.2.4.10 Явления намерзания

##### *Намерзание льда на сваях и опорах*

Лед может намерзнуть на опору кольцом там, где амплитуда прилива достаточна для периодического разрушения льда вокруг конструкции (рисунок А.8.15). Обычно новое образование льда располагается в диапазоне от максимальных до минимальных приливно-отливных уровней. Скорость намерзания льда может быть до 2,5 см за период прилива-отлива, а толщина этого образования может достигать нескольких метров. При достаточном расстоянии между сваями или опорами сооружения может начаться намерзание льда между сваями.

Подробная информация приводится в [113].

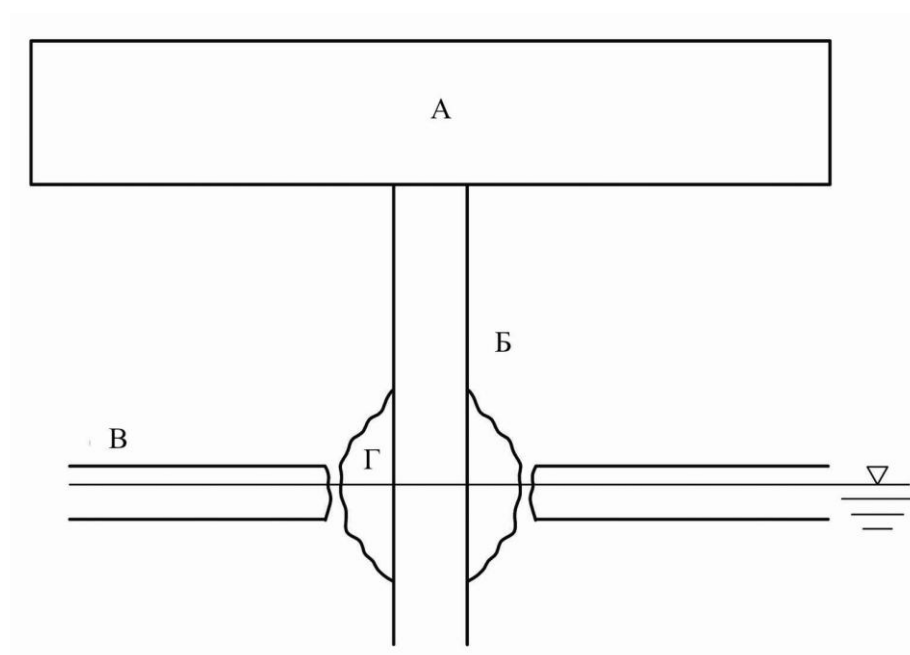
##### *Горизонтальные воздействия по причине смерзания*

Ледовые кольца могут вызвать увеличение максимального значения горизонтальных нагрузок льда. Во-первых, это обусловлено возрастанием площади контакта. Во-вторых, нарастание льда на поверхности наклонных конструкций способно создать контактный угол подступающей массы льда, что приводит к возрастанию вертикальной и горизонтальной составляющей нагрузки вследствие вероятного дробления льда вместо изгибного разрушения.

Еще одно явление смерзания – намерзание конструкции под гладким ледовым полем. Это может произойти в следующих ситуациях:

*Расположение конструкции в защищенной зоне.*

Расположение конструкции в открытом море при весьма ограниченном приливно-отливном изменении уровня воды или атмосферного давления и исключительно медленном перемещении льда или длительной остановке ледяных образований.



А - Причальное сооружение

Б - Свая

В - Поверхность льда

Г - Ледовый затор

Рисунок А.8.15 – Схема образования ледового затора на сваях

С началом движения льда горизонтальные нагрузки могут превысить нагрузки дрейфующего ровного льда с такими же параметрами за счет увеличенной толщины льда, намерзшего вблизи сооружения. Возрастание ледовой нагрузки может также произойти после остановки производственной деятельности, когда лед не примерзает к сооружению. Причиной такого явления может стать затягивание трещин, существующих в кромке льда.



Обломки льда, возникающие при взаимодействии ледового поля и наклонной конструкции, могут смерзнуться друг с другом и примерзнуть к конструкции. В результате такого явления может возникнуть ложный форштевень сооружения. Ложные форштевни толщиной 2 м и шириной 3 м наблюдаются в районе сваи диаметром 1,8 м. Последующие разрушения льда могут создать ситуации, не прогнозируемые моделями для наклонных конструкций. Наличие достаточной массы намерзшего льда вызывает необходимость учета такой массы в эффективном диаметре сваи при вычислениях.

*Вертикальные воздействия, вызванные намерзанием*

Ледовое кольцо, сформировавшееся на сваях конструкции, создает дополнительные вертикальные нагрузки, которые должны быть проверены при проектировании. Толщина ледового кольца достигает предельной величины через некоторое время после формирования под воздействием высокого прилива. С изменением уровня воды ледяной покров, примерзший к конструкции, изгибается и создает вертикальную нагрузку на конструкцию. Максимальная величина этой нагрузки ограничивается адгезионной прочностью или прочностью на изгиб намерзшего льда.

Подъем сваи легких сооружений при изменениях уровня воды может стать причиной серьезного внимания. Примерзший лед выталкивает сваи вверх, грунт сползает в полость под основание сваи и блокирует погружение сваи на исходную глубину после снижения уровня воды. Нарушение адгезии или разрушение при изгибе позволит удалить лед со сваи. При повторном намерзании и изменениях уровня воды свая постепенно поднимается. Перемещения сваи на 2 м наблюдались при колебаниях уровня воды менее 20 см.

Естественные процессы, снижающие разрывную нагрузку:

- медленная начальная нагрузка ограничивает ледовую нагрузку,
- последовательное неравномерное нарушение прочности связи.

**А.8.2.4.11 Тепловое воздействие**

В закрытых зонах на прибрежных участках воздействие льда вызывается повышением температуры за счет ограничения расширения льда неподвижными сооружениями или иными препятствиями. Полномасштабные измерения в российских и канадских акваториях показывают, что морские льды не расширяются при температуре выше минус 10°C, если соленость больше 3 частей на триллион или выше минус 7°C для солености более 1 части на триллион.

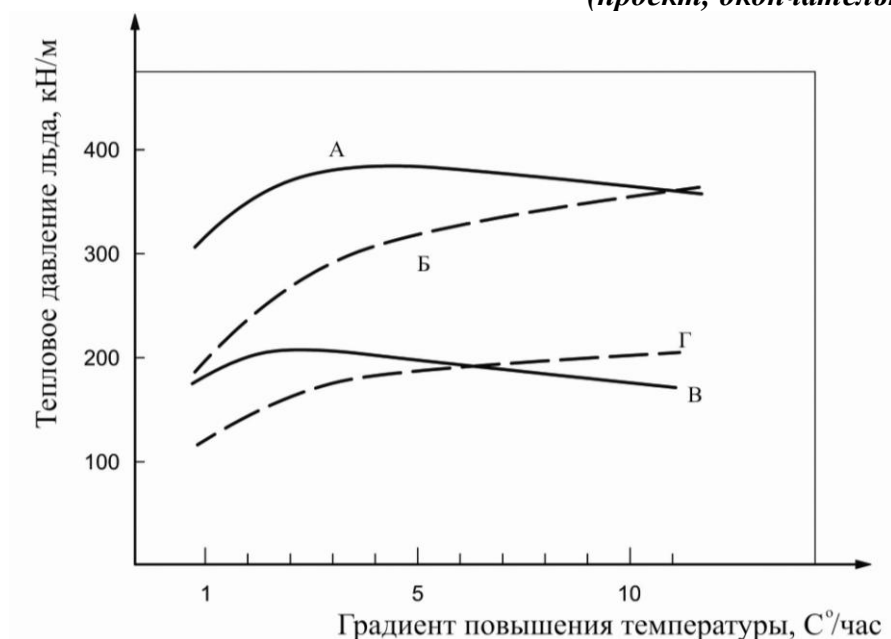
Тепловое воздействие льда зависит главным образом от исходной температуры поверхности льда и градиента роста температуры. Эта зависимость для пресноводных льдин с полным боковым ограничением показана на рисунке А.8.16.

Для предварительной оценки теплового воздействия независимо от толщины льда могут использоваться ориентировочные значения в диапазоне от 150 кН/м до 300 кН/м. Тепловые воздействия сказывается на пресноводных льдах сильнее, чем на морских льдах.

**А.8.2.5 Локальные ледовые нагрузки**

**А.8.2.5.1 Обзор локальных ледовых нагрузок**

В то время как общие нагрузки рассчитаны исходя из среднего давления для номинальной площади контакта, может существовать множество площадей, подверженных более высокому локальному давлению, см. рисунок А.8.8. Следовательно, общее усредненное давление не может быть использовано для локального проектирования и требуется отдельный учет локального давления. Локальные давления следует использовать, например, при проектировании каркаса или элементов жесткости, как показано на рисунке. А.8.17. Аналогичный подход к нагруженным участкам применяется к бетонным сооружениям.



А –  $T = -30^{\circ}\text{C}$  и  $h = 1,0$  м

Б –  $T = -30^{\circ}\text{C}$  и  $h = 0,5$  м

В –  $T = -20^{\circ}\text{C}$  и  $h = 1,0$  м

Г –  $T = -20^{\circ}\text{C}$  и  $h = 0,5$  м

$P_T$  – тепловое давление льда, кН/м

$r_T$  – градиент повышения температуры,  $^{\circ}\text{C}/\text{час}$

$h$  – толщина льда

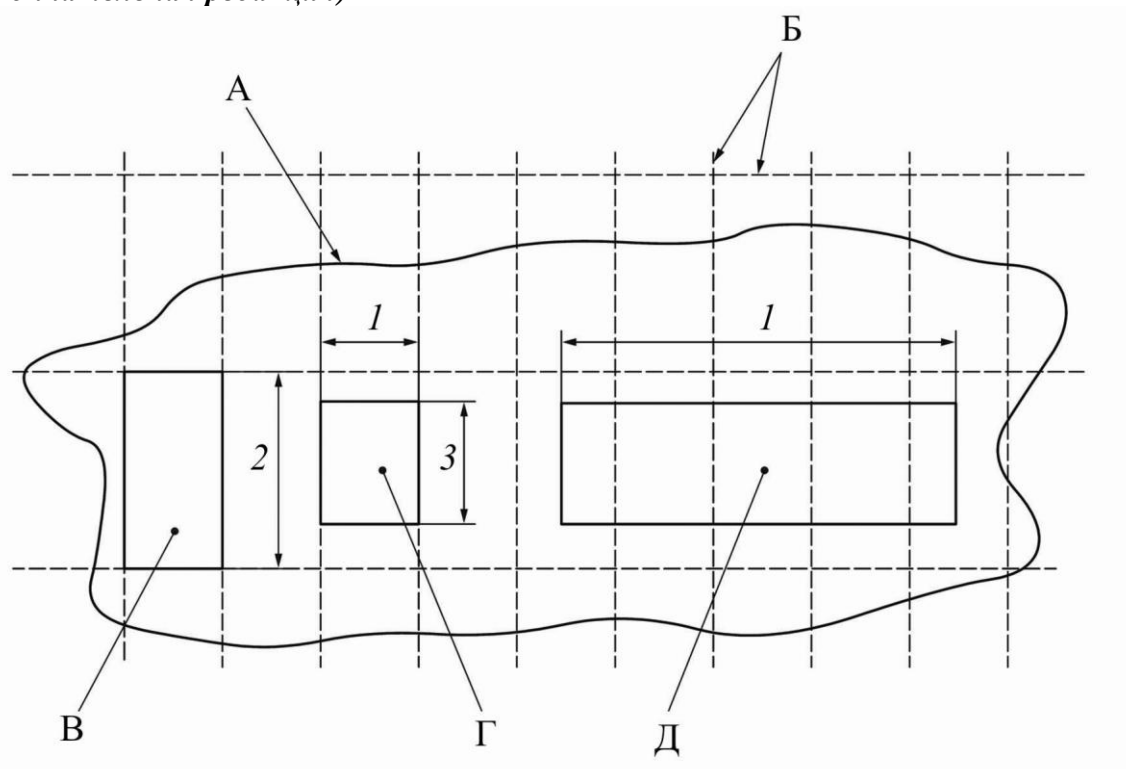
Рисунок А.8.16 – Зависимость тепловой нагрузки от градиента роста температуры поверхности льда (из [114])

Взаимодействия льда могут вызвать локальное давление, которое не следует считать постоянным для площади:

$$A = a \cdot w_L, \quad (\text{А.8.61})$$

где  $a$  и  $w_L$  – высота и ширина площади, находящейся под нагрузкой.

Максимальные нагрузки обычно создаются, когда высота  $a$  площади под нагрузкой равна высоте локальной проектной площади  $a_d$  (рисунок А.8.17). Для гладкого льда  $w_L$  меньше толщины льда в 4 раза [117].



А – общая площадь взаимодействия (возрастает по мере продолжения взаимодействия)

Б – корпуса и элементы жесткости

В – участок для плиты

Г – участок нагрузки для плиты

Д – участок нагрузки для элемента жесткости

1 –  $w_L$  – ширина нагружаемого участка

2 –  $a_d$  – зазор корпуса

3 –  $a$  – высота нагружаемого участка

Рисунок А.8.17 – Определение нагружаемых участков местных воздействий.

Локальное давление льда различается в зависимости от толщины льда, сталкивающегося с сооружением. Давление морского льда толщиной до 1 м ограничивается близостью верхней и нижней свободной поверхности (см. А.8.2.5.2). В отличие от этого толстый многолетний лед и айсберги достаточно спрессованы, чтобы создать повышенное давление на ту же самую площадь (см. А.8.2.5.3). В приведенных ниже пунктах рассматриваются методы оценки локального давления в каждом случае. Методы А.8.2.5.2 и А.8.2.5.3 относятся к оценке давления в условиях ELIE, тогда как методы А.8.2.5.4 пригодны для оценки давления как в

условиях ELIE, так и ALIE. Оценка ударных давлений отдельных ледяных образований и ледниковых структур приводится в А.8.2.5.4. Следует подчеркнуть, что связь А.8.2.5.2 и А.8.2.5.3 основывается на массивах данных, полученных в различных окружающих условиях. В результате не достигается точного совпадения, и при равных местных давлениях льда одинаковой толщины результаты могут отличаться. В решении данной прикладной задачи следует руководствоваться здравым смыслом.

#### А.8.2.5.2 Локальные нагрузки, создаваемые тонким однолетним льдом

##### *Обзор*

Данный пункт посвящен методу определения локального давления, создаваемого однолетним льдом толщиной около 1,5 м. Метод применяется к гладкому льду, наслоенному льду и слежавшимся слоям однолетнего льда. Благодаря полномасштабным измерениям гладкого и наслоенного льда имеется достаточный объем информации. Измерение среднего давления на площади около 1 м по всей толщине льда производилось панелями давления. На основании этих данных наибольшие нагрузки на вертикальные конструкции имеют место при низких скоростях льда. В таких ситуациях локальное разрушение льда происходит одновременно для значительной части толщины льда из-за эластичных свойств. Такой подход базируется на методике [117].

##### *Характерные значения локальных нагрузок*

Локальные нагрузки могут быть оценены с применением нагрузки,  $F_L$ , приложенной равномерно по всей локальной проектной площади:

$$F_L = 3,72 \cdot \sqrt{a_d} \cdot w_L, \quad \text{при } a_d \geq 0,14 \quad (\text{А.8.62})$$

где  $a_d$  и  $w_L$  – соответственно высота и ширина локальной проектной площади, м;  
 $F_L$  – нагрузка, МН.

Эти выражения действительны для:

$w_L/a_d \leq 10$  и  $a_d \leq 0,4h_E$ , где  $h_E$  – характеристика толщины льда по ELIE.

Если высота локальной проектной площади превышает  $0,4h_E$ , выражения (А.8.63) и (А.8.64) могут быть использованы для определения локальных нагрузок. Локальные нагрузки не подлежат оценке при  $w_L/a_d > 10$ .

*Локальное давление при полной толщине*

Локальное давление при полной толщине связано с полной толщиной ледового листа (плавучей льдины). Выражение (А.8.62) основано на обработке данных с Ботнического залива [118], вывод выражения основан на верхнем граничном значении давления при полной толщине  $p_F$ , МПа:

$$\begin{aligned} p_F &= 2,35h^{-0,50} & \text{для } h > 0,35\text{ м,} \\ p_F &= 4,0 & \text{для } h \leq 0,35\text{ м,} \end{aligned} \quad (\text{А.8.63})$$

где  $h$  – толщина, м.

В конструкциях с произвольными решениями локальное давление, действующее на участок приложения давления (см. выражение А.8.61):

$$p_L = \gamma_L p_F, \quad (\text{А.8.64})$$

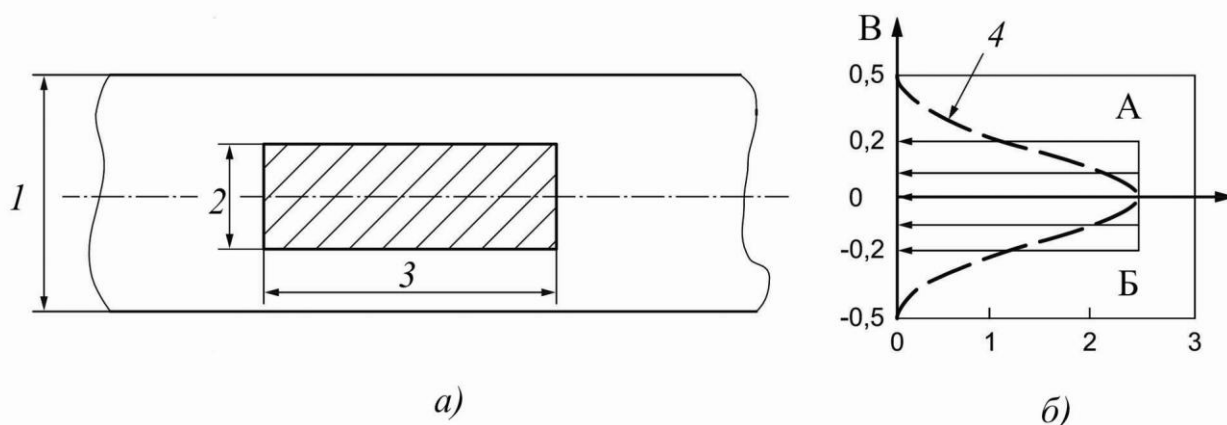
где  $\gamma_L = 2,5$ ;

$p_F = p_F(h)$  – давление полной толщины по выражению (А.8.63).

Коэффициентом  $\gamma_L$  отображается упрощенное вертикальное распределение давления полной толщины на участок нагрузки,  $A = aw_L$ , как показано на рисунке А.8.18.

*Проектирование пограничных участков сооружения*

Вблизи пограничных участков сооружения, таких, как углы прямоугольной конструкции, могут возникать местные концентрации механического напряжения. На таких участках давление полной толщины может в 2,5–3 раза превышать штатное давление полной толщины. Следует принимать повышенное давление приложенным к горизонтальному участку, равному толщине льда, считая от угла конструкции.



а) область приложения нагрузки

б) распределение давления

$l - h$  – толщина льда

$2 - a$  – высота нагружаемого участка

$3 - w_L$  – ширина нагружаемого участка

$A - \gamma_L = 2,5$  – коэффициент распределения давления

$B - a/h = 0,4$

$B - z/h$  – расстояние от середины внутренней части льда

Рисунок А.8.18 – Распределение давления полной толщины на площадь приложения нагрузки (пунктирной линией обозначены данные полевых измерений)

### Вероятностное локальное проектирование

Приведенным выше методом можно пользоваться также для вероятностного анализа, определяя функцию плотности суммарной вероятности толщины льда и местное давление полной толщины, а затем пользуясь руководящими указаниями А.8.2.2.

#### А.8.2.5.3 Локальное давление толстых и массивных ледяных образований

Локальные давления массивных ледяных образований толщиной более 1,5 м могут быть определены с использованием данных, приведенных на рисунке А.8.19 [120]. Эти данные были получены в результате измерения твердости льда по Бринеллю в море Бофорта и измерений панелями давления льда платформу Моликпак в той же зоне.

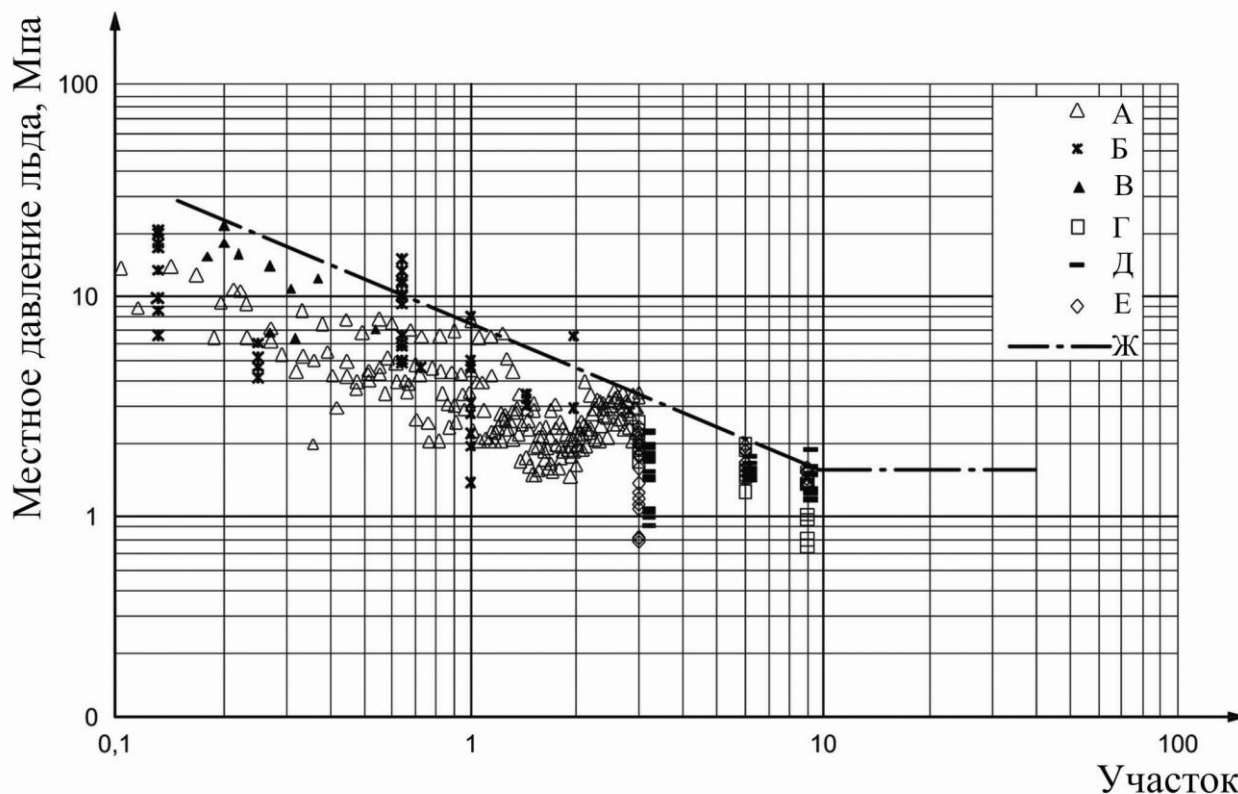
На основании этих данных, локальное давление,  $p_L$  [МПа], действующее на участок приложения нагрузки:

$$p_L = 7,40 A^{-0,70}, \text{ для } A \leq 10 \text{ м}^2,$$

(A.8.65)

$$p_L = 1,48, \text{ для } A > 10 \text{ м}^2,$$

где  $A$  – локальная проектная площадь,  $\text{м}^2$ , (рисунок А.8.17).



А – 3  $\text{м}^2$  результат испытаний на вводе в изолированный водоем

Б – испытания плоским гидравлическим домкратом

В – результаты испытаний в отсутствии выбора, 1989 г.

Г – данные с платформы Моликпак, юго-западное направление

Д – Моликпак, северный фасад

Е – Моликпак, восточный фасад

Ж –  $p_L = 7,40 A^{-0,70}$  (среднее значение + 3-х кратное стандартное отклонение),  $A < 10 \text{ м}^2$ ;

$p_L = 1,48$ ,  $A > 10 \text{ м}^2$

$p_L$  – местное давление льда, МПа

Участок – контактный участок,  $\text{м}^2$

Рисунок А.8.19 – Подбор данных давления льда как функции площади приложения нагрузки



#### А.8.2.5.4 Вероятностная модель локального давления льда

Вероятностная модель локального давления льда разработана на основании данных по столкновениям судов с многолетними плавучими льдинами [91]. Данные в основном получены по измерениям преодоления многолетних льдов ледоколом «Кайгорьяк», дополнительные данные были сняты с других судов. Модель дает распределение вероятностей максимального годового давления  $p$ , в соответствии с годовым воздействием  $\mu$ . Воздействие выражается отношением усредненной длительности воздействия 0,7 с испытательных таранных ударов ледокола «Кайгорьяк». Например, при длительности ежегодного воздействия 7 с коэффициент экспозиции будет равен  $\mu = 7 \text{ с} / 0,7 \text{ с} = 10$ .

Приведенное ниже распределение интегральной вероятности представляет снижение давления (МПа) в пределах площади и может использоваться для локального давления  $p$ , приложенного к площади  $A$  (м<sup>2</sup>):

$$F_p(p) = \exp[-\mu \exp(-p/\alpha)], \quad (\text{А.8.66})$$

где:

$$\alpha = A^{-0,7}. \quad (\text{А.8.67})$$

Выражение (А.8.66) применимо для варианта однопанельной конструкции. При необходимости  $n$  панелей вместо  $\mu$  следует подставить  $n\mu$ .

Такой подход применим для разрозненных воздействий в течение года, он распространяется на воздействие крупных обломков айсберга и многолетнего льда на плавучие конструкции. При наличии результатов полевых исследований можно учесть влияние скорости на локальное давление.

#### А.8.2.5.5 Сочетания локального ледового давления

Локальные воздействия льда на корпус сооружения будут иметь место в различных географических точках, различных контактных участках, как было показано выше. Принципиальная схема приведена на рисунке А.8.17. Локальное давление льда  $p_L$  прикладывается к участку  $A$ , а давление  $p_0$  воздействует на гораздо большую часть корпуса сооружения через участок  $A_0$ . В общем случае это давление представляет собой общее давление льда, полученное из выражения (А.8.21). Более

высокое локальное давление, называемое иногда «горячей точкой», получается из выражений (А.8.58), (А.8.59) или (А.8.61). Давление  $p_L$  представляет собой общее давление в данном месте и не суммируется с  $p_0$ .

Давление  $p_0$  можно получить также из выражений (А.8.58), (А.8.59) или (А.8.61) и использовать его на более обширном участке, чем  $p_L$ . Например, усредненное давление  $p_0$  следует прикладывать к участку между перемычками сооружения, а локальное давление  $p_L$  выполняет роль давления на оболочки между элементами жесткости. С учетом уравнивания усилий давление вокруг локального участка меньше  $p_0$  и может быть получено из выражения

$$p_0^p = \frac{p_0 A_0 - p_L A_L}{A_0 - A_L}. \quad (\text{А.8.68})$$

На рисунке А.8.20 показан метод сочетания локального давления с давлением, приложенным к большей площади. При сочетании давлений в процессе проектирования следует руководствоваться здравым смыслом. Некоторые сочетания могут оказаться более критическими, чем другие, и процедура перебора сочетаний представляет собой процесс проб и ошибок. Из-за разнообразия конструкций корпусов сооружений невозможно задать нормативный набор сочетаний.

#### **А.8.2.6 Динамические ледовые воздействия**

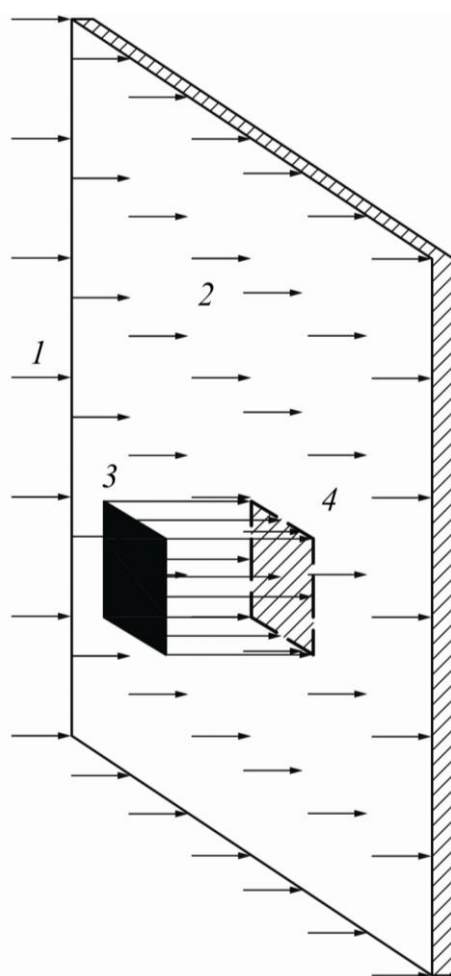
##### **А.8.2.6.1 Динамические воздействия на вертикальные конструкции**

###### *Общие сведения*

Руководящие указания данного пункта основаны большей частью на данных измерений полномасштабной модели узких конструкций. Они включают *периодическое дробление льда, вибрации с захватыванием частоты и случайные вибрации при непрерывном дроблении льда*. Основная цель динамического анализа – убедиться, что не произойдет захвата частоты конструкцией (резонансные автоколебания).

Динамическое взаимодействие льда с конструкцией, известное как резонансные автоколебания, может возникать при непрерывном воздействии ледового покрова, движущегося с умеренной скоростью от 0,04 м/с до 0,1 м/с, на

вертикальную конструкцию. Постоянная вибрация, возникающая вследствие захвата частоты, может вызвать низкоциклическую усталость стальных конструкций, а также разжижение грунта под сооружением. Вибрации могут также сказываться на надстройках сооружений, таких, как факельные стрелы, см. 15.1.1.3. Следовательно, статический расчет должен быть дополнен динамическим расчетом при наличии риска захвата частоты конкретной конструкцией. Исходя из полевых экспериментов, конструкции с собственной частотой в диапазоне 0,4–10 Гц склонны к подтвержденным автоколебаниям, если общее демпфирование сооружения (как часть критического) ниже 3%.



1 –  $p^p_0$  – требуемое давление фонового льда

2 –  $A_0$  – фоновый участок

3 –  $p_L$  – траектория локального давления льда

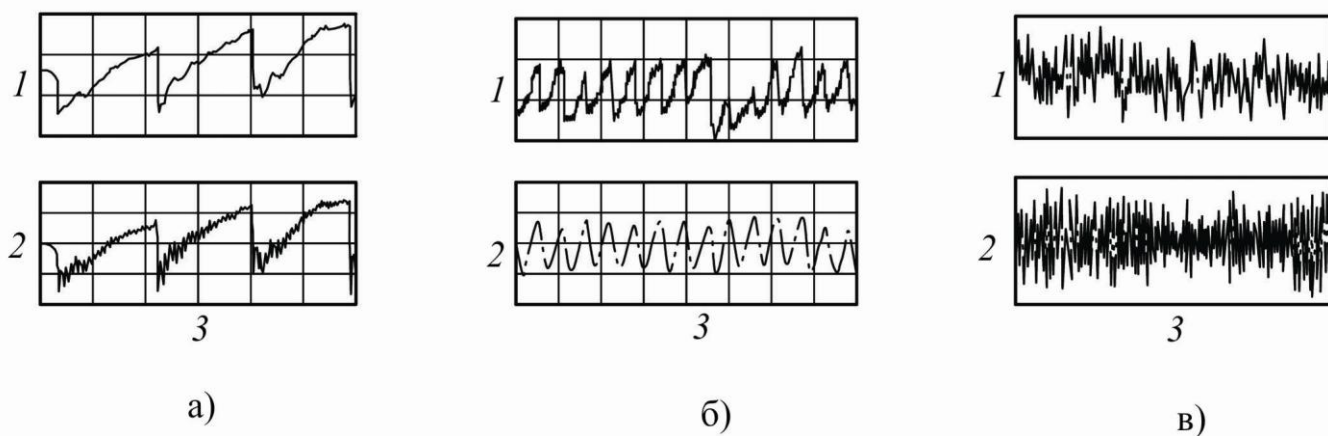
4 –  $A_L$  – местный контактный участок, м<sup>2</sup>

Рисунок А.8.20 – Метод сочетания локального давления с давлением, приложенным к большей площади

Для оценки вибраций широких сооружений требуется более подробное изучение. Узкие вертикальные конструкции могут быть очень чувствительны к некоторым видам динамических взаимодействий льда с сооружением.

Изменяющиеся во времени процессы взаимодействия

Динамический процесс взаимодействия льда с сооружением подвержен влиянию скорости льда и осадки плавучего сооружения. На рисунке А.8.21 показаны три основных модели взаимодействия, выраженные усилием льда  $F(t)$  и соответствующим водоизмещением  $u(t)$  по результатам измерений реальных сооружений в Бохайском заливе.



а) периодическое дробление льда

б) захват частоты

в) непрерывное хрупкое разрушение

1 –  $F(t)$  – ледовая нагрузка

2 –  $u(t)$  – осадка сооружения

3 –  $t$  – время

Рисунок А.8.21 – Модели изменяющейся во времени нагрузки вследствие дробления льда и соответствующей динамической реакции компонентов конструкции.

Эффект взаимодействия, известный как *периодическое дробление льда*, изображенный на рисунке А.8.21 (а), возникает под воздействием ледового образования, движущегося с невысокой скоростью, на податливую конструкцию. Взаимодействие делится на фазу нагрузки и фазу разгрузки. В фазе нагрузки

конструкция перемещается в одном направлении со льдом. Кромка льда подвержена эластичным деформациям, а ледовая нагрузка постепенно возрастает. Внешняя ледовая нагрузка и внутренние усилия конструкции обычно находятся в состоянии статического равновесия, когда ледовая нагрузка достигает своего максимального значения. При пиковой ледовой нагрузке хрупкое разрушение начинается от кромки льда, приводя к затухающим колебаниям конструкции, исчезающим в фазе разгрузки. Скорость затухания зависит от общего демпфирования, обеспечиваемого грунтом и конструкцией.

**Резонансное колебание**, изображенное на рисунке А.8.21 (б), может происходить при средней скорости льда по мере адаптации изменяющихся во времени воздействий льда к частоте колебаний водоизмещения сооружения. При таких условиях вибрации сооружения обычно синусоидальные. Аналогично периодическому дроблению, взаимодействие льда с конструкцией подразделяется на изменяющиеся фазы пластичной нагрузки и хрупкой разгрузки. Динамика изменения ледовой нагрузки зависит от параметров льда и сооружения.

На рисунке А.8.21 (в) показаны типовые записи ледовой нагрузки и реакция конструкции на **непрерывное хрупкое дробление**. Это происходит при большей скорости льда, обычно  $v > 100$  мм/с. Как ледовая нагрузка, так и реакция являются случайными процессами. При необходимости описания ледовой нагрузки ответная реакция конструкции может быть рассчитана в диапазоне частот с помощью функции спектральной плотности мощности.

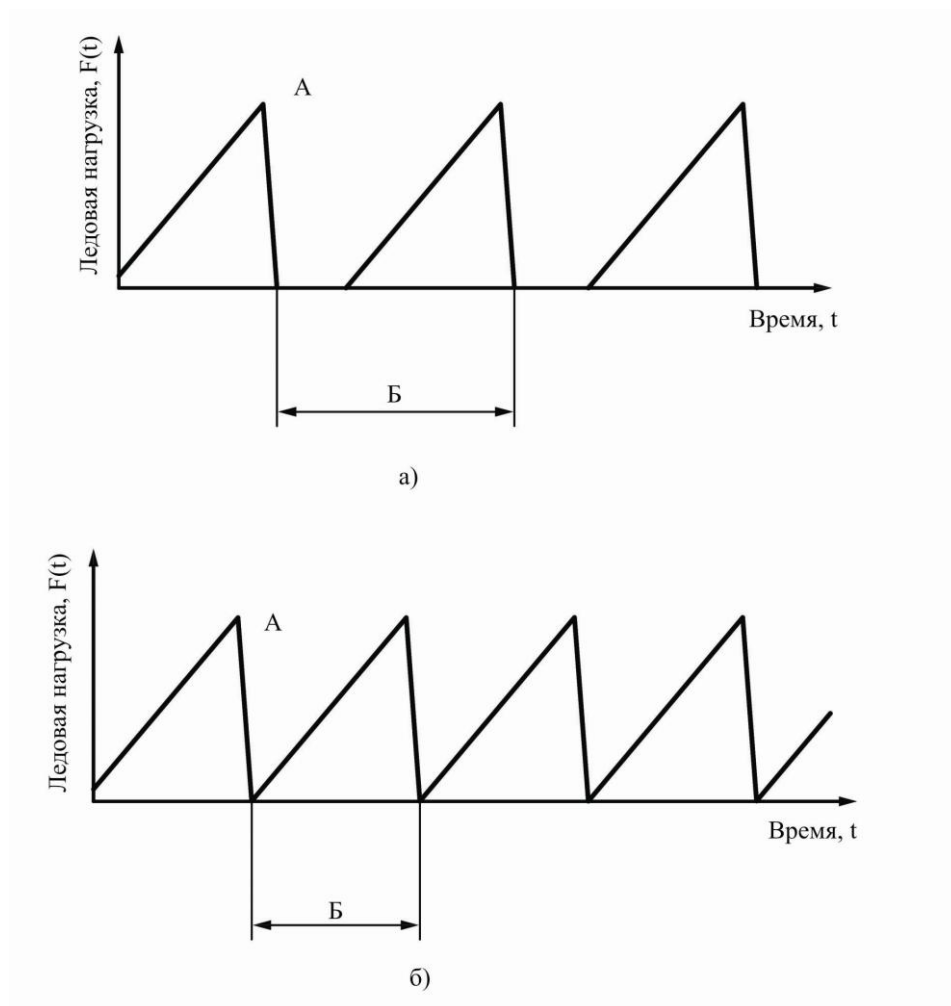
#### Динамическая реакция на периодическое дробление

На рисунке А.8.22 показана идеализированная динамика ледовых нагрузок, вызванных периодическим дроблением. Период ледовой нагрузки  $T$  значительно превышает самый длительный период собственных колебаний конструкции. Динамика, показанная на рисунке А.8.22 (а) также может вызываться режимом деформации от раскалывания, при этом период  $T$  ледовой нагрузки превышает длительность цикла нагрузки-разгрузки.

Программное обеспечение общего назначения Finite Element может использоваться для расчетов реакции конструкции на ледовые нагрузки.

Максимальная величина  $F_{max}$  может быть определена методом, описанным в 8.2.4.3 как общая статическая ледовая нагрузка  $F_G$ .

Целью динамического анализа являются эффекты затухающих колебаний. Поэтому динамического анализа часто бывает достаточно для определения ответной реакции на однократный цикл нагрузки.



а) период ледового воздействия, превышающий цикл нагрузки-разгрузки

б) период ледового воздействия, равный циклу нагрузки-разгрузки

$A - F_{max}$  – максимальная величина ледовой нагрузки

$B - T$  – период ледовой нагрузки

Примечание –  $F_{max}$  и  $T$  являются случайными величинами.

Рисунок А.8.22 – Идеализированная диаграмма динамики изменения ледовой нагрузки, вызванной периодическим дроблением

*Подверженность захвату частоты*

На основании полевых исследований и наблюдений, частота разрушения льда захватывается только для некоторых самых нижних собственных колебаний конструкции. В сложных конструкциях захват частоты не обязательно проявляется явно и для вычисления частоты захвата требуется анализ характеристического значения. Для оценки восприимчивости того или иного вида собственных колебаний к наведенным вибрациям может служить условие динамической стабильности [122], [123]. Для обеспечения динамической стабильности собственного колебания  $n$ , коэффициент относительного затухания конструкции  $\xi_n$  должен превышать обратный вклад ледового воздействия в динамическую стабильность. Коэффициенты затухания  $\xi_n$  самых низких собственных колебаний конструкции должен быть настолько велик, чтобы обеспечивать рассеивание энергии ледового воздействия, т.е:

$$\xi_n \geq \frac{\phi_{nC}^2}{4\pi f_n M_n} \cdot h \cdot \theta, \quad (\text{A.8.69})$$

где  $\xi_n$  – общее затухание собственных колебаний как доля критического;

$\phi_{nC}$  – ненормированная собственная амплитуда в точке ледового воздействия;

$M_n$  – истинная собственная масса, кг;

$f_n$  – частота собственных колебаний, Гц;

$h$  – толщина льда, м;

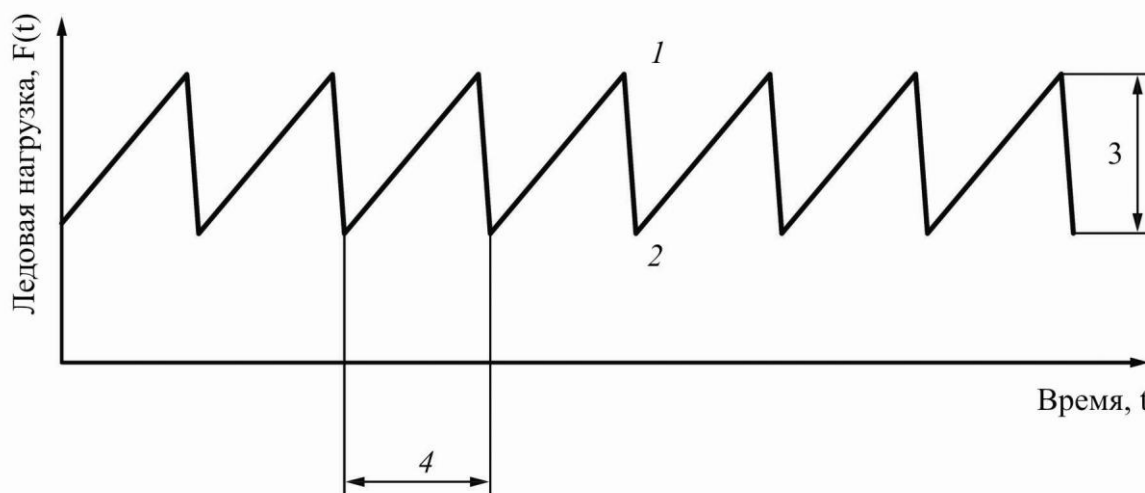
$\theta$  – коэффициент, рекомендуемое значение  $\theta = 40 \cdot 10^6 \text{ кг}^2 / \text{м} \cdot \text{с}$ .

Рекомендуемое значение  $\theta$  получено при исследовании жестких и узких конструкций в Балтийском море. Для широких или податливых конструкций необходимо подобрать соответствующее значение  $\theta$ .

Этапы методики расчета вибраций захвата частоты:

- Нахождение характеристических значений и режимов вибрации.
- Определение самых нижних режимов, подверженных захвату частоты.
- Вычисление динамической реакции приведенным ниже методом.

Определение реакции конструкции при вибрациях с захватом частоты можно произвести с помощью упрощенной задающей функции, показанной на рисунке А.8.23. По этому методу частота задающей функции  $f=1/T$  принимается равной частоте одного из нестабильных собственных режимов с собственной частотой ниже 10 Гц в соответствии с выражением (А.8.69). Пиковые значения  $F_{max}$ , так же как удвоенная амплитуда  $\Delta F = F_{max} - F_{min}$  считаются постоянными. Пиковые значения могут быть определены как общая ледовая нагрузка  $F_G$  на конструкцию (А.8.2.4.3). Для получения в результате анализа установившейся реакции задающая функция должна быть достаточно длительной.



1 —  $F_{max}$  — максимальная величина ледовой нагрузки

2 —  $F_{min}$  — минимальная величина ледовой нагрузки

3 —  $\Delta F$  — разность между максимальной и минимальной ледовой нагрузкой

4 —  $T$  — период ледовой нагрузки

Рисунок А.8.23 — Предполагаемая динамика ледовой нагрузки в условиях захвата частоты

Удвоенная амплитуда  $\Delta F$  зависит от собственных колебаний конструкции и скорости льда. Она может быть выражена как частью  $q$  пиковой нагрузки  $F_{max}$ , следующим образом:

$$\Delta F = qF_{max} \quad (\text{А.8.70})$$



Исходное значение можно подобрать под коэффициент  $q$  из диапазона от 0,1 до 0,5. Затем по результатам анализа реакции следует масштабировать коэффициент  $q$  так, чтобы добиться реакции по скорости на уровне ватерлинии, в 1,4 раза превышающей наивысшую скорость льда  $v_t$ , при которой происходит захват частоты. Эта скорость может быть получена из выражения:

$$v_t = \gamma_v f_n, \quad (\text{A.8.71})$$

где  $\gamma_v = 0,060$  м.

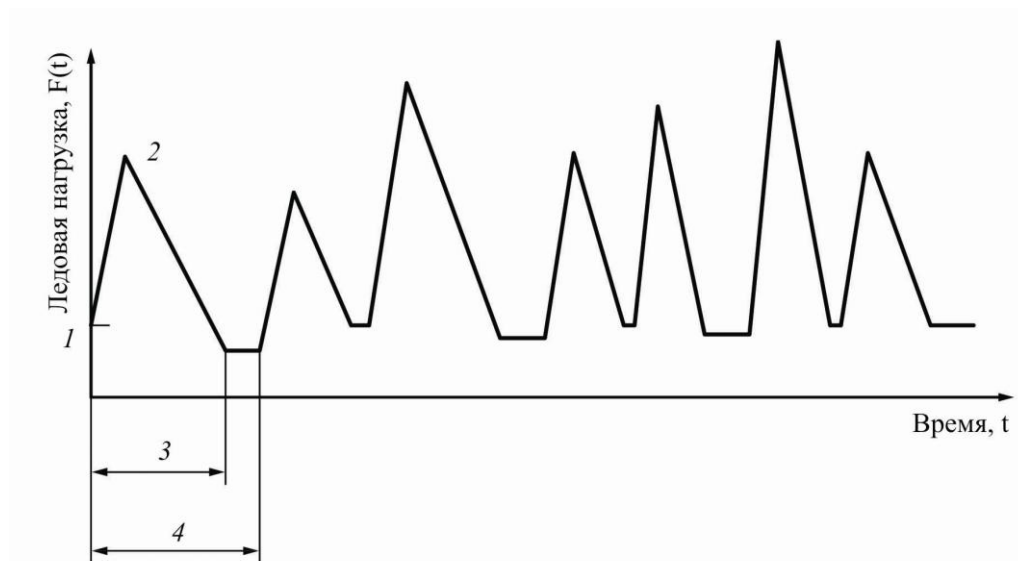
Это отношение основано на данных полевых исследований узких конструкций с частотой собственных колебаний до 5 Гц.

#### А.8.2.6.2 Динамические воздействия на конические конструкции

Полномасштабные измерения в Бохайском заливе показали, что коническая геометрия ватерлинии снизит величину вибраций, вызванных льдом по сравнению с соответствующей вертикальной конструкцией. С другой стороны, те же данные показывают, что конструкции с узким конусом на ватерлинии все же подвержены вибрациям ледового происхождения. Вибрации усиливаются, когда на передней поверхности конуса не образуется постоянный ледяной нарост. Динамика изменений для этого типа ледовой нагрузки показана на рисунке А.8.24. Динамическая реакция конструкции, вызванная этим типом случайной задающей функции меньше, чем вызванная захватыванием частоты аналогичной вертикальной конструкции.

Изменяющаяся во времени нагрузка  $F(t)$  является функцией нескольких параметров, включая ширину конструкции, угол наклона и усилие торможения. Компонент стационарного воздействия  $F_{\min}$  возникает в основном от ледового обломка, имеющегося у конической или наклонной конструкции. Вибрации записывались для ледового режима многоопорных конструкций Бохайского залива, с конусными опорами диаметром по ватерлинии 4 м. Благодаря эффективной расчистке ледовых обломков компонент стационарного действия этих сооружений находился в пределах  $F_{\min} < 0,1F_{0,\max}$ . Другие измерения конических конструкций

диаметром по ватерлинии 10 м в Балтийском море не выявили сильных вибраций. В этой ситуации преобладающий компонент стационарного действия был обнаружен вблизи  $F_{\min} = 0,45F_{0,\max}$ .



1 —  $F_{\min}$  — минимальное значение ледовой нагрузки

2 —  $F_0$  — пиковое значение ледовой нагрузки

3 —  $\tau$  — продолжительность цикла нагрузки-разгрузки

4 —  $T$  — период ледовой нагрузки

Рисунок А.8.24 — Идеализированная динамика горизонтальной ледовой нагрузки на коническую конструкцию

Пиковая нагрузка  $F_0$  может считаться случайным параметром, распределенным по нормальному закону. Оценка максимального значения  $F_{0,\max}$ , этого параметра может быть произведена по инструкциям пункта А.8.2.4.4. В соответствии с данными полевых исследований узких конусов с очень малым компонентом нагрузки  $F_{\min}$ , коэффициент изменения пиковых значений в различных ситуациях может находиться в диапазоне от 0,20 до 0,60. Следовательно, коэффициент изменения удвоенной амплитуды  $\Delta F = F_0 - F_{\min}$  динамического воздействия принимается равным 0,40. Предполагая, что максимальное значение соответствует не превышаемой вероятности 0,95, среднее значение случайного пикового воздействия можно выразить как:

$$F_{0,mean} = F_{\min} + 0,56(F_{0,\max} - F_{\min}) \quad (\text{А.8.72})$$

Период между максимальными нагрузками может быть вычислен как:

$$T = \frac{l_b}{v}, \quad (\text{A.8.73})$$

где  $l_b$  – длина разрушения льда ледового покрова;

$v$  – скорость льда.

Длина разрушения льда,  $l_b$ , является функцией толщины льда, прочности льда, диаметра конструкции и скорости дрейфа ледового образования. Она колеблется от 3-х до 10-кратной толщины льда, этот коэффициент обычно уменьшается с толщиной и скоростью льда. Период между двумя отдельными пиковыми значениями представляет собой случайный параметр с коэффициентом изменения от 0,40 до 0,70. В качестве средней величины стандартное отклонение предполагается равным 0,50 среднеквадратичной ошибки периода воздействия.

Скважность, или отношение длительности импульса фактического воздействия  $g$  к усредненному периоду  $T$  может изменяться от 0,3 до 1,0.

#### А.8.2.6.3 Нарастание усталостных повреждений от ледовых нагрузок

Усталость конструкции морской платформы и ее фундамента (9.4.7, 11.8 и 12.3.5.3) является следствием совокупного воздействия волн, ветра и ледовых нагрузок. Усталость от ледовых нагрузок, следует анализировать так же подробно, как и усталость, вызванную метеорологическими условиями. Усталость следует оценить в течение всего расчетного срока службы на основании разности между максимальными и минимальными напряжениями, зафиксированными в течение непрерывного периода.

За базовый эксплуатационный период оценки усталости можно принять один год. Различные типы ледовых воздействий, происходящие за этот период, классифицируются путем определения ряда процессов воздействия  $F^k(t)$  ( $k=1, 2, \dots$ ).

#### *Состав характерных процессов*

- Изменяющиеся во времени квазистатические нагрузки, вызванные образованием трещин от изгибов льда.
- Воздействия торосов.

– Изменяющиеся во времени нагрузки, вызванные периодическим дроблением льда.

– Динамические воздействия, вызванные постоянным разрушением льда.

– Вибрации, вызванные дроблением льда и образованием трещин от изгибов гладкого и смерзшегося льда.

Каждый из процессов проанализирован статистически. Анализ дает ряд спектров ледовой нагрузки  $\Delta F(\eta^k)$ , где  $\eta^k$  – количество ледовых нагрузок, амплитуда которых изменяется на  $\Delta F$  за годичный период эксплуатации. Амплитуда  $\Delta F$  ледовой нагрузки определяется как разность между пиковым значением и последующим минимальным значением. Если в процессе воздействия начнется возрастание вибраций, следует учесть эффекты динамического умножения при определении спектра.

Накопление усталостных повреждений определяется отдельно для каждого спектра нагрузки. Общая накопленная поврежденность вследствие ледовых воздействий может быть определена как сумма поврежденностей от спектров отдельных нагрузок:

$$D_{ice} = \sum_k D^k, \quad (\text{A.8.74})$$

где  $D_k$  – накопленная поврежденность от спектров отдельных нагрузок;

$D_{ice}$  – общая накопленная поврежденность от всех ледовых воздействий.

В зависимости от параметров рассматриваемого сооружения рекомендации по оценке общей поврежденности могут различаться.

#### **A.8.2.7 Технологические операции снижения ледовых нагрузок**

Изменение частоты и амплитуды ледовых воздействий может быть достигнуто разнообразными процедурами. Активные технологии ледовой обработки рассматриваются в разделе 17 и A.17, а пассивные технологии (например, брызговой лед и другие барьеры) рассматриваются в разделе 16 и A.16. Это может иметь значительное влияние на типовые этапы проектирования и позволяет

эксплуатировать в ледовых условиях плавучие установки добычи и незначительно усиленные сооружения.

При использовании технологических операций снижения ледовых нагрузок исключительно важно дать количественную оценку этим операциям. Предварительная оценка успеха затруднена, поэтому мерилom успеха может служить успешное применение в условиях эксплуатации. Наблюдения за обработкой льда платформы Куллуk свидетельствуют о снижении нагрузок в 5-10 раз по сравнению с ситуацией, когда меры очистки не применяются.

Операции с расчисткой морского льда могут повлечь за собой специальную обработку ввиду больших объемов колотого льда. Лучший метод – использовать полномасштабные данные, а анализ ледовых воздействий должен отражать определенные ледовые условия и ожидаемые ресурсы для управления.

#### **А.8.2.8 Физические и механические свойства льда**

##### **А.8.2.8.1 Обзор физических и механических свойств льда**

Физические и механические свойства льда полезны для расчета ледовых нагрузок на сооружения. Кроме того, их знание требуется для сравнения различных измерений на полномасштабной модели ледовых нагрузок и для имитации естественных условий при испытаниях модели.

В результате многолетних исследований механических свойств льда были установлены однозначные зависимости между физическими свойствами льда (температура, соленость, плотность) и его параметрами прочности. Проектировщики располагают этими зависимостями, что избавляет от необходимости новых испытаний прочности. Если проектировщиком все же принимается решение о новых испытаниях прочности, такие испытания должны производиться согласно руководящим указаниям Международной ассоциации разработки и исследования гидравлических устройств (IAHR) [124].

Для расчета ледовых воздействий на морские платформы в зависимости от плана воздействия может потребоваться знание следующих физических и механических свойств:

- прочность на сжатие;

- прочность на растяжение/сгиб;
- ударная вязкость;
- трение, адгезия;
- прочность на сдвиг и сцепление фрагментированного льда;
- модуль эластичности;
- удельная плотность;

Некоторые сценарии воздействия от сдвига могут вызвать разрушения по всему ледовому покрову. В подобных ситуациях для установления критерия прочности следует пользоваться прочностью на сжатие и прочностью на растяжение. Поэтому прочность на сдвиг, как независимый параметр материала, здесь не рассматривается.

Локальные ледовые слои состоят из вертикальных столбиков со случайными ориентированными горизонтальными осями. При постоянном направлении течения горизонтальные оси смогут ориентироваться в одном направлении, что сказывается на прочностных свойствах. Столбики увеличиваются с глубиной ледового покрытия.

Кроме столбчатого льда, ледовое покрытие может состоять из гранулированного льда. Внутреннее строение кристаллов морского льда, отличающегося от пресноводного льда, состоит из параллельных пластинок, между которыми распределены солевые карманы. За счет таких солевых карманов прочность морского льда ниже прочности пресноводного льда. Объем солевых карманов зависит от температуры, которая приводит к возрастанию прочности льда с уменьшением температура льда. Доля рассола в морском льде определяется выражением [125]):

$$\nu_b = S \left( \frac{49,18}{|T|} + 0,53 \right), \quad (\text{A.8.75})$$

где  $\nu_b$  – доля рассола;

$S$  – соленость льда как доля объема солей при таянии льда;

$T$  – температура льда, °C.

Из большинства механических свойств льда только для прочности установлена экспериментальная связь с объемом морской воды или объемом морской воды и воздуха. Это означает, что некоторые из свойств прочности могут быть рассчитаны при наличии результатов измерений солености, доли воздуха и температуры льда.

#### А.8.2.8.2 Прочность на сжатие

##### *Общие замечания*

Прочность на сжатие морского льда зависит от объема рассола, содержания пузырьков воздуха, направления воздействия относительно образца и (или) ориентации кристаллов, зернистости, скорости деформации, температуры и типа льда (столбчатый или гранулированный).

Наиболее распространено в механических свойствах льда одноосное сопротивление на сжатие, которое используется для теоретических расчетов нагрузок льда на морские сооружения. Так как реальное взаимодействие льда с конструкцией вызывает трехмерное напряженное состояние, более уместно использовать в этих теоретических расчетах другую концепцию – пространственный критерий прочности, в котором учтены данные по двумерному и трехмерному пределу прочности на сжатие и растяжение.

Одномерная прочность на сжатие для однолетнего льда.

Одномерная прочность на сжатие максимальна при скорости деформирования около  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} 1/c$ , где лед разрушается при переходе от упругой к хрупкой деформации.

Проводились интенсивные исследования влияния кристаллической структуры и направления воздействия на одномерную прочность на сжатие. Для горизонтально нагруженного столбчатого льда (состоящего из столбчатых кристаллов) одномерная прочность [МПа] задается выражением:

$$\sigma_c = 37 \dot{\varepsilon}^{0,22} \left[ 1 - \sqrt{\frac{v_T}{0,27}} \right]. \quad (\text{А.8.76})$$

Для вертикально нагруженного столбчатого льда одномерная прочность:

$$\sigma_c = 160 \varepsilon^{0,22} \left[ 1 - \sqrt{\frac{v_T}{0,20}} \right]. \quad (\text{A.8.77})$$

Для гранулированного (мелко зернистого) морского льда (состоящего из гранулированных кристаллов со случайной ориентацией горизонтальной оси однонаправленная прочность задается как:

$$\sigma_c = 49 \varepsilon^{0,22} \left[ 1 - \sqrt{\frac{v_T}{0,28}} \right]. \quad (\text{A.8.78})$$

В этих выражениях,  $v_T$  – общая доля свободного объема (рассол и воздух), а скорость деформирования,  $\varepsilon$ , выражена в [1/с]. Эти выражения дают несколько заниженные результаты, если общая доля свободного объема заменена объемной долей рассола  $v_b$ . Диапазон скоростей деформации, на который распространяется действие этих выражений, варьируется от  $\varepsilon = 10^{-7}$  1/с до  $\varepsilon = 10^{-3}$  1/с.

**Примечание** – При необходимости получения максимального усилия на сжатие величина  $\varepsilon^{0,22}$  может быть заменена коэффициентом 0,22. Можно также в общем случае пользоваться выражением (A.8.78) вследствие гранулированности морского льда.

#### *Одномерное усилие на сжатие многолетнего льда*

Измерения усилия на сжатие многолетнего льда показали, что (1) значения сопротивления на сжатие многолетнего льда изменяются от 4 до 12 МПа в зависимости от скорости деформирования; (2) прочность многолетнего льда аналогична прочности сильно охлажденного однолетнего льда (например, до минус 20°C), но (3) многолетний лед значительно прочнее однолетнего льда при более высокой температуре.

#### *Прочность льда, определенная по месту скважинным домкратом*

Испытания скважинным домкратом интенсивно применялись для того, чтобы получить характеристики прочности льда по месту и для определения индекса относительной прочности. Скважинный домкрат представляет собой гидравлический цилиндр из высокопрочной нержавеющей стали с поршнем двойного действия, который давит на стены скважины во льду.



Испытания по месту методом скважинного домкрата позволяют судить о трехмерной прочности льда. Часть экспериментов [127] показала, что предельная прочность,  $p_u$ , полученная скважинным домкратом, ограничивается:

$$2\sigma_c \leq p_u \leq 4\sigma_c, \quad (\text{A.8.79})$$

В результате других испытаний [128] был выявлен диапазон предельной прочности  $3,5 \sigma_c \leq p_u \leq 5 \sigma_c$ . При получении дополнительных данных диапазон может измениться.

Скважинные домкраты использовались для изучения изменения прочности на сжатие весной и летом вследствие повышения температуры льда [129]. Теми же скважинными домкратами исследовался профиль сопротивления зимников по морскому льду и формирований гряд торосов.

#### А.8.2.8.3 Прочность на изгиб

Прочность на изгиб ледовых покровов, наслоенного льда и консолидированного слоя торосов используется для оценки нагрузок на наклонные сооружения. Прочность на изгиб характеризует собой напряжение крайних волокон при растяжении. Существует два различных метода испытаний: упрощенное испытание на изгиб с 4-точечной нагрузкой и предпочтительный вариант испытания консольной балки, вырезанной на месте из ледового покрова, которая загружается силой на свободный конец консольной балки. Прочность морского льда на изгиб снижается с увеличением доли морской воды, что включает влияние температуры льда [131].

$$\sigma_f = 1,76 \exp(-5,88\nu_b^{1/2}), \quad (\text{A.8.80})$$

где  $\nu_b$  – доля соленой воды;

$\sigma_f$  – предел прочности на изгиб, МПа.

Значения прочности на изгиб ( $\sigma_f$ ) морского льда по месту 0,3 МПа – 0,5 МПа характерны для зимы, тогда как значения 0,2 МПа характерны для более теплого времени года [125]. При проведении исследований применительно к месту или ограничении объема исследований для [125] следует учитывать влияние объема испытаний на полученные значения прочности на изгиб.

## А.8.2.8.4 Предел прочности на разрыв

Предел прочности на разрыв измеряется непосредственно на образце типа перемычки, при этом расширенные части образца заморожены в концевые чашки, соединенные с испытательной установкой. Предел прочности на разрыв почти не зависит от скорости деформации в диапазоне от  $10^{-5}$  1/с до  $10^{-3}$  1/с.

Предел прочности на разрыв в направлении роста (вертикальном) столбчатого льда почти в два раза выше, чем в горизонтальном направлении (таблица А.8.4). Предел прочности на разрыв зависит от доли рассола в льдине. Сведения о пределе прочности на разрыв гранулированного льда приводятся в [133].

Т а б л и ц а А.8.4 – Значения предела прочности на разрыв

Температура, °C	Тип льда	Соленость, ‰	Предел прочности в зависимости от направления воздействия, МПа	
			Вертикальное	Горизонтальное
-10	морской лед	4–6	1,7	0,9
-10	лед Балтийского моря	0,2	2,2	1,0

На основании данных таблицы А.8.4, предел прочности на разрыв может быть выражен как:

$$\sigma_f(\text{вертикальный}) = 2,2[1-(v_b/0,31)^{1/2}], \quad (\text{А.8.81})$$

$$\sigma_f(\text{горизонтальный}) = 1,0[1-(v_b/0,14)^{1/2}], \quad (\text{А.8.82})$$

где  $v_b$  – доля рассола;

$\sigma_f$  – предел прочности на разрыв, МПа.

## А.8.2.8.5 Предел прочности на сдвиг

Разрушение, вызванное разрывом, может послужить ограничивающим механизмом соответствующего воздействия, пример показан на рисунке А.8.7. Состояние сдвига ледового образования очень редко встречается в чистом виде, при вычислении разрушающего воздействия льда следует учитывать воздействие на сооружение и эффекты разрыва и нормального сжатия.

Документально зафиксированные значения предела прочности на сдвиг находятся в диапазоне от 0,2 до 2,5 МПа. Ширина этого диапазона обусловлена

сложностью исключения эффектов нормального напряжения из величин предела прочности на сдвиг. Ограниченный объем проверенных данных свидетельствует, что предел прочности на сдвиг изменяется в диапазоне от 0,4 до 1,3 МПа.

Объем полномасштабных экспериментальных данных недостаточен. С помощью балки испытания на скручивание (в форме кости) создается чистое сдвиговое усилие без побочных эффектов, обусловленных нормальными напряжениями или концентрацией напряжений. С помощью испытательных балок *по месту* ориентировочным сечением 0,4 м<sup>2</sup> для льда Балтийского моря (соленость 1%) получен предел прочности на сдвиг 0,6 МПа [136].

Предел прочности на сдвиг зависит также от доли соленой воды или общей рыхлости льда. Испытания ограниченного объема, описанные в [137], показывают, что предел прочности на сдвиг может быть представлен выражением:

$$\tau = 1,5 \left[ 1 - \sqrt{\frac{v_t}{3,9}} \right], \quad (\text{A.8.83})$$

где  $v_t$  – общий объем фракции (соленая вода и воздух);

$\tau$  – предел прочности на сдвиг, МПа.

#### А.8.2.8.6 Стойкость к излому

Стойкость к излому  $K_{Ic}$  льда зависит от размера разрушаемого ледового образования, длины трещины, температуры, состава льда и скорости нагрузки. В лабораторных условиях обычно фигурирует значение  $K_{Ic}=100$  кПа·м<sup>1/2</sup>. При испытаниях на месте образцов льда крупнее 3 м получено значение  $K_{Ic}=250$  кПа м<sup>1/2</sup>. Поскольку  $K_{Ic}$  достаточно слабо зависит от размера образца, коэффициент стойкости к излому можно непосредственно использовать в вычислениях, если значения  $K_{Ic}$  были измерены в соответствующем масштабе [138]. В противном случае вязкоупругая модель трещинообразования может использоваться для прогноза  $K_{Ic}$  как функции длины трещины любой геометрии.

#### А.8.2.8.7 Коэффициент трения

На ледовых нагрузках, приложенных к наклонным и коническим сооружениям, сказываются эффекты трения. Испытание на трение было проведено в

лабораториях, а также в естественных условиях для того, чтобы установить коэффициент трения между льдом и поверхностью материалов, таких как бетон, сталь в различных эксплуатационных состояниях (корродированная, гладкая, окрашенная, с низкофрикционными покрытиями).

В лабораторных условиях можно исследовать влияние следующих параметров: зависимость статического и кинетического трения, нормальной нагрузки, относительной скорости, шероховатости поверхности, температуры льда и поверхностной смазки морской водой. По результатам испытаний:

- Коэффициент статического трения может в пять раз превышать коэффициент кинетического трения на скорости ледового образования 0,1 м/с.
- Коэффициент кинетического трения снижается с увеличением контактного давления.
- Коэффициент кинетического трения возрастает с уменьшением скорости скольжения и также с уменьшением температуры.
- Морская вода, которая может присутствовать во взаимодействии льда и конструкции, не оказывает значительного влияния на кинетическое трение.

Результаты лабораторных измерений коэффициентов кинетического трения льда по стали и бетону приведены в таблице А.8.5 (на основании [140] и [141]). Допускается использовать другие значения, подтвержденные экспериментальными данными.

Таблица А.8.5 – Измеренные значения коэффициента кинетического трения

Конструкционный материал	Влияние скорости скольжения					
	$v_s < 0,01$ м/с		$v_s = 0,1$ м/с		$v_s = 0,5$ м/с	
	средн.	ст. отклон.	средн.	ст. отклон.	средн.	ст. отклон.
Гладкая сталь	0,10	0,02	0,05	0,01	0,05	0,01
Гладкий бетон	0,12	0,02	0,05	0,015	0,05	0,01
Корродированная сталь	0,15	0,03	0,10	0,03	0,10	0,03
Необработанный бетон	0,22	0,05	0,10	0,03	0,10	0,03

#### А.8.2.8.8 Параметры материала килей торосов

Прочностные свойства килей торосов могут быть охарактеризованы как свойства материала Мора-Кулона с внутренним трением и параметрами сцепления. Обработка результатов большей части лабораторных и полномасштабных испытаний была произведена по этой модели.

Диапазон документально зафиксированных углов внутреннего трения торосов варьируется от  $10^\circ$  до  $80^\circ$ . Причиной такого большого изменения является смерзаемость кия, за счет этого сложно выделить относительный вклад внутреннего трения и сцепления в усилие сдвига. Смерзаемость может весьма быстро увеличить роль сцепления после сжатия обломков под давлением. Как правило, принимаются значения угла внутреннего трения от  $20^\circ$  до  $40^\circ$ .

Официально зарегистрированная величина сцепления ледовых обломков изменяется от 0 до 100 кПа. Оба крайних значения можно подтвердить в специальных условиях. Нулевое сцепление ледовых обломков имеет место, например, после разрушения кия одновременно с очисткой сооружения от обломков льда. Более высокие значения связаны с частично смерзшимся слоем, как, например, у севших на мель торосов. По результатам полномасштабных наблюдений среднее значение сцепления однолетнего тороса составляет 5–7 кПа, при этом одновременно оценивался ненулевой угол трения.

Внутренняя температура ледовых торосов определяет глубину консолидированного слоя и его прочность, зависящую от доли морской воды и температуры.

Пористость кия прямо пропорциональна давлению, обусловленному давлением между плавучими льдинами, следовательно, пределу прочности кия на сдвиг. Чем меньше пористость, тем больше объемное сжатие под давлением. Опубликованные данные пористости кия варьируются от 10% до 50 %. Пористость кия обычно увеличивается с глубиной, начиная обычно с 20% сразу под консолидированным слоем, увеличиваясь до 50% у основания низа кия.

## А.8.2.8.9 Модуль упругости

Модуль упругости льда зависит от общего объема пустот  $v_T$  согласно следующему выражению:

$$E = E_0 \left(1 - \sqrt{v_T}\right)^4, \quad (\text{А.8.84})$$

где  $v_T$  – общий объем фракции (рассол и воздух), или фракции пустот;

$E_0$  – модуль упругости пресноводного льда, значения которого находятся в диапазоне от 9 до 10 ГПа. Характерное значение модуля упругости проектных естественных ледовых нагрузок изменяется в диапазоне между от 2 до 6 ГПа. Модуль упругости возрастает с уменьшением температуры.

## А.8.2.8.10 Удельная плотность

Удельная плотность льда измеряется несколькими различными способами. Наиболее распространенный способ – массо-объемный, когда от льдины отделяется ледяной блок, подгоняется под стандартный размер, обеспечивающий объем  $V$ . При взвешивании образца получается масса  $M$ . Затем удельная плотность вычисляется из выражения:

$$\rho_i = M/V, \quad (\text{А.8.85})$$

Измерения, производимые многими исследователями [142], показывают, что:

- удельная плотность морского льда изменяется от 720 до 920 кг/м<sup>3</sup>;
- удельная плотность *в естественных условиях* различна над ватерлинией и под ней;
- над ватерлинией удельная плотность однолетних льдов изменяется от 840 до 910 кг/м<sup>3</sup>, многолетних льдов – от 720 до 910 кг/м<sup>3</sup>;
- ниже ватерлинии удельная плотность более постоянна и изменяется от 900 до 920 кг/м<sup>3</sup> для обоих типов льда.

**А.8.3 Нагрузки от гидрометеорологических факторов****А.8.3.1 Гидрометеорологические нагрузки на сооружения**

## А.8.3.1.1 Общие сведения

Руководящие указания и требования относительно нагрузок от ветра, волн, течений сооружения со стальным решетчатым каркасом, большие платформы и

платформы гравитационного типа, плавучие сооружения и швартовые приспособления приводятся в ИСО 19901-1 (гидрометеорология), ИСО 19902 (стационарные стальные сооружения), ИСО 19903 (бетонные сооружения), и ИСО 19904-1 (плавучие сооружения).

#### А.8.3.1.2 Нарастание льда на сооружении

##### *Общие сведения*

Руководящие указания по атмосферному и брызговому морскому льду приводятся в А.6.3.5.

Части плавучих льдов могут нарастать и располагаться между элементами конструкции в местах пересечения с поверхностью воды. Гидродинамические нагрузки льда передаются сооружению и складываются с горизонтальной нагрузкой.

Нарастание льда на сваях (ледовое кольцо) также увеличивает участок ватерлинии и поэтому вызывает увеличение горизонтальных нагрузок от волн и течений. Когда уровень воды снижается, вода, оставшаяся на сваях, замерзает и происходит нарастание льда. Аналогично, нарастание льда на поверхности наклонных сооружений делает эти конструкции более отвесными, и, возможно, приводит к нелинейному смещению отметок подпорного уровня воды. Ледовые нагрузки, связанные с ледовыми поясами, рассматриваются в А.8.2.4.10.

##### *Нагрузки, вызванные волнами и течениями*

Руководство отсутствует.

##### *Ветровые нагрузки*

Руководство отсутствует.

##### *Динамические и статические ответные реакции*

Информация по статическому, динамическому анализу и анализу устойчивости приводится в стандарте, соответствующему типу конструкции, т.е. ИСО 19902, ИСО 19903 и ИСО 19904-1. Дополнительная информация по устойчивости плавучих сооружений в ситуациях ударов и повреждений приводится в 13.6 и А.13.6.

Наличие льда может привести к неожиданным воздействиям, например, возникновению незапланированного крутящего момента из-за неравномерного ледового нараста.

Масса ледяной корки увеличивает дополнительные статические вертикальные нагрузки, способные привести к значительному смещению центра тяжести конструкции, свободной от льда. Вертикальные нагрузки могут влиять на статическое положение, устойчивость, сопротивление другим нагрузкам и динамическую реакцию. Увеличение осадки и уменьшение надводного борта плавучего сооружения может увеличить вероятность накрывания палубы сплошной массой воды (или плавучего льда). Изменения метацентрической высоты могут сказаться на устойчивости, поперечной и продольной жесткости и ответных реакциях.

#### A.8.3.1.3 Особые требования к сооружениям большого объема

Общие сведения по испытаниям моделей и сооружений большого объема приводится в документе ИСО 19903. Некоторые нелинейные характеристики, связанные с воздействием волн на сооружения большого объема, приводятся в [143].

Гидродинамические ударные ледовые воздействия рассматриваются в A.8.2.4.7.

#### A.8.3.1.4 Подъем надводного борта и палубы

Руководство отсутствует.

#### A.8.3.2 Движение ледяных образований под воздействием волн

Увеличение скорости волнений и течений является векторным процессом. Наибольшее суммарное значение получено путем комбинирования течения с колебательной скоростью либо на гребне, либо на впадине волны. Относительная амплитуда двух вариантов зависит от различий направления волны и течения.

Для осколков плавучих льдин с горизонтальными размерами в 1/15 часть собственной длины волны или больше вычисление скоростей производится решением уравнения движения. Для расчета волновой нагрузки на лед можно воспользоваться дифракционным анализом (включая эффекты прямолинейного движения и дрейфа). Влияние ветра, течения и волнового сопротивления можно



получить из моделей определения сопротивления. Применимы также вычислительные методы гидродинамики и испытание моделей.

Склоны и изменения глубины моря могут стать причиной увеличения количества набегающих волн из-за эффекта рефракции. Это увеличивает скорости на поверхности воды и, следовательно, скорости удара плавучей льдины. Описание этого эффекта приводится в [144].

Описание процедуры предусматривает вычисление распределения вероятности скорости ледовой массы при наличии волн [145]. При таком подходе предполагается соответствие массы льда и колебательной скорости воды, скорость от волнения воды распределена по нормальному закону, а скорость продольного сноса при ударе пропорциональна сумме дрейфа и скорости, вызванной действием волн. На основании этих предположений можно определить, что скорость столкновения льда распределена по специальному закону Релея.

При оценке последствий ледового удара для сооружения следует обращаться к разделу, посвященному столкновениям и ударным повреждениям рассматриваемого сооружения.

#### **А.8.4 Сейсмические нагрузки**

Руководство отсутствует.

### **А.9 Проектирование основания**

#### **А.9.1. Общие положения**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.2. Изыскания на объекте**

##### **А.9.2.1. Цель и объем изысканий**

Для дальнейших рекомендаций по проведению полевых изысканий в водах умеренного пояса следует использовать ИСО 19901-4. В последующих разделах не содержится никаких руководств, кроме тех, которые связаны со спецификой арктических и северных регионов.

##### **А.9.2.2. Батиметрия**

Руководство отсутствует.

### **А.9.2.3. Геофизические изыскания**

Руководство отсутствует.

### **А.9.2.4. Геотехнические изыскания**

Руководства по описанию мерзлого грунта содержатся в [146] в таблице 2.1. Это таблица содержит подход к описанию видимого и невидимого льда в пробах грунта, используемого в дополнение к стандартному описанию грунта и классификационным методам (например, [147]).

Многолетнемерзлые грунты и слои льда могут быть определены с помощью конического пенетromетра (CPT) [148]. Мерзлый грунт обычно оказывает высокое сопротивление конусу пенетromетра. Температурные измерения во время пенетрации могут быть полезны для определения мерзлых грунтов [149], но измерения должны учитывать нагрев пенетromетра и окружающего грунта в результате процесса пенетрации [150]. В [151] приведен пример использования метода испытаний с применением пенетromетра для песчаных образований или илистых отложений с вкраплениями слоев льда. В случае слоя чистого льда, сопротивление конуса и поровое давление были высокими, в то время как трение конуса было незначительно.

Специальные пробы и методы обработки могут потребоваться для определенных отложений, таких как газообразные отложения, многолетнемерзлые грунты и отложения мягкого грунта. Газ в отложениях либо в жидком виде, либо в пузырьках может расшириться и вызвать повреждение образца. Также тяжело взять пробу многолетнемерзлых грунтов с относительно высокой температурой и не повредить ее, потому что температура отложения близка к граничной температуре замораживания-оттаивания, лежащей между 0°C и минус 2°C.

В [152] содержится раздел по проведению изысканий в условиях многолетнемерзлых грунтов. Дальнейшие сведения по методикам и методам могут быть получены из трудов специальных конференций, касающихся районов с холодным климатом. Примеры таких конференций:

- международные конференции ASCE по строительству в районах крайнего севера;

- канадские конференции, касающиеся многолетнемерзлых грунтов;
- международные конференции, касающиеся многолетнемерзлых грунтов;
- международные конференции по строительству портов и морскому строительству в условиях Арктики (РОАС);
- ежегодные международные морские и полярные инженерные конференции (ISOPE);
- конференция ASCE "Arctic '85" в Сан-Франциско, Калифорния, 25–27 марта, 1985 г.

Следует обратить внимание, что термальное нарушение проб многолетней мерзлоты при температуре близкой к замерзанию почти невозможно предотвратить. Поэтому для оценки поведения свай в многолетней мерзлоте при полевых испытаниях используются конический пенетромтр или тест по продавливанию грунта. Из-за чувствительности многолетнемерзлого грунта к скорости пенетрации, стандартное испытание, выполненное с помощью конического пенетромметра со скоростью 20 мм/с, не подходит. Для определения параметров ползучести требуются специальные методы испытаний, такие, как испытания с увеличивающейся нагрузкой, в которых нагрузка на конус увеличивается пошагово и удерживается постоянной на каждом шаге в течение определенного времени [153]. Недавние испытания с контролируемой скоростью, выполненные с помощью конических пенетромметров (CPT), были проведены в многолетней мерзлоте со скоростью от 1 мм/с до 10-3 мм/с для определения стратиграфических данных и характеристик ползучести [154]. Примеры применения испытаний с пенетромметром и тестов по продавливанию грунта для оценки поведения свай приведены в [153], [155] и [156]. Для определения параметров упругих свойств в условиях многолетнемерзлых грунтов можно успешно измерять скорости сейсмических волн (сдвиг и сжатие) [157].

Если предполагается многолетнемерзлый грунт, должна быть измерена его температура. Наиболее надежный подход – установить цепочку термисторов в скважине и считывать показания приборов, как только температура

стабилизируется. Менее точный метод – измерять температуру каждого образца грунта на месте сразу после его получения. Измерения температуры с применением пенетрометра также были описаны в [158].

Для многолетнемерзлых грунтов необходимы специальные методы лабораторных испытаний [152].

### **А.9.3. Характерные свойства материалов**

Выбор расчетных свойств материалов для проектирования морских арктических сооружений требует внимательного рассмотрения всего накопленного опыта и тщательно проведенных изысканий на площадке, включая натурные и лабораторные испытания. Кроме того, требуется понимание степени неопределенности в измерениях и аналитических моделях, используемых для выбора нормативных значений, обеспечивающих необходимую надежность конструкции для каждого предельного состояния в настоящем международном стандарте.

Самая большая неопределенность в измерении технических параметров происходит по причине нарушения структуры полученных образцов, особенно образцов, полученных на шельфе в условиях многолетнемерзлых грунтов. Образцы подвергаются не только механическому воздействию, но и тепловому (таяние или замерзание), кроме того, может иметь место выделение газов (из поровой воды или замороженных гидратов). Аналогичная неопределенность существует при интерпретации данных натурных испытаний.

### **А.9.4. Некоторые аспекты проектирования**

#### **А.9.4.1. Общая информация**

Многолетнемерзлые грунты и газогидраты являются особой проблемой в некоторых районах арктического шельфа.

Многолетнемерзлые грунты подвержены локальному таянию и возможным осадкам грунта при продолжительной добычи теплых углеводородов в ходе разработки. Это может привести к осадке добычных систем верхнего строения, нагрузке на обсадные колонны и снижению устойчивости основания.

Особые вопросы:

- общая и относительная осадка, связанная с таянием;
- уменьшение предела прочности грунта на сдвиг, связанное с таянием;
- оседания тяжелых конструкций, связанные с ползучестью, для многолетнемерзлых грунтов с большим содержанием льда.

Проектирование обычно включает:

- анализ степени таяния или замерзания;
- анализ деформаций для оценки степени и зависимости от времени осадки основания;
- анализ стабильности для учета возможных последствий уменьшения предела прочности основания на сдвиг. Ограничения аналитических методов должны быть учтены в подобных анализах.

Факторы, которые должны быть учтены при термоанализе:

- толщина и температурный профиль многолетнемерзлых грунтов;
- давление и температура гидратов [158];
- тепловые свойства грунтов с учетом понижения температуры замерзания и солености поровой воды [159, 160];
- тепловые граничные условия, связанные с вышележащей водой, конструкциями, скважинами и геотермическим градиентом;
- диапазон режимов работ скважины.

Факторы для учета в анализе деформаций следующие:

- степень и скорость таяния;
- мгновенные значения и временные зависимости для величин, которые изменяются при таянии;
- изменяющиеся граничные условия, которые влияют на перераспределение поровых флюидов и консолидация, в частности сдвигающаяся граница талый грунт – мерзлый грунт;
- изменения механических свойств грунта основания во время и после таяния [161];
- характеристики ползучести многолетней мерзлоты.

Факторы для учета при анализе стабильности многолетнемерзлых грунтов и деградации гидрата:

- изменение прочности грунта в результате таяния;
- зависимость от времени изменения в прочности тающего грунта, связанные с рассеиванием или формированием избыточного порового давления;
- влияние на грунт и его свойства больших объемов газа и высоких давлений газа, образующегося при разложении гидратов.

#### **А.9.4.2. Коэффициенты нагрузок**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.4.3. Коэффициенты надежности по материалу и сопротивлению**

В инженерно-геологической практике по всему миру используются два подхода для расчета сопротивления в расчете по предельным состояниям. Первый состоит в применении коэффициента надежности по материалу для определения характерной недренированной прочности,  $s_u$ , или тангенса угла внутреннего трения,  $\tan(\varphi')$ , а также расчета сопротивления основания с использованием расчетной прочности. Второй представляет собой расчет сопротивления основания с использованием нормативной прочности; затем сопротивление основания умножается на коэффициент надежности по сопротивлению для получения расчетного сопротивления. Также предложен гибридный метод, сочетающий коэффициент надежности по материалу и коэффициент надежности по сопротивлению.

Оба подхода являются приемлемыми для стандарта. ИСО 19901-4 использует коэффициент надежности по материалу, т. е. нормативная прочность грунта уменьшается посредством коэффициента надежности по материалу до выполнения расчета проектной несущей способности основания. В ИСО 19902 для глубоких свайных оснований используется коэффициент надежности по сопротивлению, т. е. сопротивление сваи рассчитывается с использованием нормативных значений прочности и затем уменьшается посредством коэффициента надежности по сопротивлению.

Для анализа недренированного или общего напряжения коэффициент надежности по материалу и коэффициент надежности по сопротивлению в большинстве случаев дает один и тот же результат и использование того или иного подхода предлагается на выбор. При анализе эффективного напряжения может возникать значительная разница, т. к. сопротивление основания является нелинейной функцией угла внутреннего трения. Поэтому для коэффициента надежности по материалу при анализе эффективного напряжения обычно указывается также метод анализа, что позволяет избежать снижения достоверности.

Т. к. ледовые нагрузки на арктические морские сооружения приводят к большему значению горизонтальной составляющей нагрузки по сравнению с другими климатическими зонами, а несущая способность основания является сильно не линейной функцией отклонения нагрузки, подход к проектированию, основанный на коэффициенте надежности по сопротивлению, с большей вероятностью обеспечит надежность основания. Это, в частности, относится к конструкциям, в которых нагрузка передается на основание несколькими способами (например, через трение свай, продольное и поперечное сопротивление и через скольжение и надавливание кессонных конструкций на основание, и статическое давление на грунт). Во многих случаях для оснований морских сооружений в Арктике также сложно указать один метод анализа.

#### **А.9.4.4. Анализ влияния динамических воздействий**

Примеры проектирования оснований с учетом циклических нагрузок от волн при расчете несущей способности, а также жесткости и смещения основания можно найти в ссылках от [162] до [164].

#### **А.9.4.5. Основное предельное состояние**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.4.6. Предельное состояние по критерию пригодности к нормальной эксплуатации**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.4.7. Предельное состояние по критерию усталости**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.4.8. Особое (чрезвычайное) предельное состояние**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.4.9. Закрепленные грунты**

Для увеличения прочности и жесткости грунтов основания можно рассмотреть возможность применения методик укрепления грунта. Следует учесть, что некоторые из этих методов применялись только для наземных проектов и их применение на шельфе может быть непрактичным. Возможные методики включают:

- глубокое смешивание, состоящее из впрыска под давлением, плюс механическое смешивание вяжущего вещества с грунтом для увеличения прочности;
- искусственное замораживание, которое использовалось в качестве временной опоры конструкции для проходки туннелей и шахт или в качестве метода поддержания многолетнемерзлых грунтов под основанием;
- уплотнение.

#### **А.9.4.10. Строительство и установка**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.5. Сооружения гравитационного типа**

Общие комментарии и руководство см. в ИСО 19901-4 и ИСО 19903.

#### **А.9.6. Свайные сооружения**

Общие комментарии и руководство см. в ИСО 19902.

Руководство по проектированию свайных конструкций в многолетней мерзлоте можно найти в [152] и [165].

#### **А.9.7. Плавающие конструкции**

##### **А.9.7.1. Общая информация**

Общие положения проектирования см. в ИСО 19901-7, а конкретные рекомендации см. в [166].

##### **А.9.7.2. Плавающие якоря**

Более подробные конструктивные соображения для плавучих якорей см. в [166].



#### **А.9.7.3. Самозасасывающиеся якоря**

Более подробные конструктивные соображения для самозасасывающихся якорей см. в [166] и [167].

#### **А.9.7.4. Свайные якоря**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.7.5. Демонтаж**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.8. Водная эрозия**

Руководство отсутствует.

#### **А.9.9. Контроль и мониторинг**

Измерительные системы и методы контроля, установленные на стационарных сооружениях на канадском шельфе, описаны в [168].

#### **А.9.10. Сейсмический анализ**

##### **А.9.10.1 Основные положения**

Основное направление сейсмического анализа для сооружений на мелководье, таких как сооружения с основанием гравитационного типа – это соответствующая интерпретация динамических взаимодействий грунт – конструкция (SSI). Анализ взаимодействий может быть классифицирован исходя из:

- последовательность анализа, прямой метод или метод импеданса;
- область анализа, с учетом времени или частоты;
- поведение грунта, эквивалентный линейный или нелинейный анализ.

Таблица А.9.1 содержит сводку стандартных типов SSI-анализа (интерпретация динамических взаимодействий) вместе с соответствующей областью анализа и моделирования грунта. Также приведены разнообразные вопросы, которые требуют внимательного рассмотрения для каждого метода.

##### **А.9.10.2 Прямой метод**

SSI-анализ, основанный на прямом методе, состоит из разработки модели, учитывающей взаимодействие «грунт – конструкция» со значительной частью грунта, и определения начального движения от землетрясения на верхней и нижней границах модели. Границы движения должны совмещаться с проектными

изменениями во времени землетрясений, свойствами грунтов и предполагаемым типом волны. Протяженность контура грунта должна обеспечить, чтобы ложное отражение волны на границах не влияло на вызванные колебания.

### А.9.10.3 Метод импеданса

Метод импеданса, также известный как трехступенчатый метод, включает:

- Определение начального движения основания, что является реакцией безынерционного основания на случайную группу сейсмических волн.
- Установление динамической жесткости или импеданса основания для диапазона частот.
- Применение связанной модели, учитывающей взаимодействие конструкция–основание, для рассчитанного начального движения.

Таблица А.9.1 – Обобщение стандартных типов SSI-анализа вместе с соответствующей областью анализа и моделированием грунта.

<i>Тип анализа</i>	<i>Область анализа</i>	<i>Моделирование грунта</i>	<i>Вопросы</i>
Прямой метод	Область времени	Эквивалентный линейный или нелинейный	Размер компонента грунта Моделирование гистерезисного уменьшения Протяженность контура грунта Начальное пограничное движение Многолетняя мерзлота/тающая мерзлота
Метод импеданса	Область частоты	Эквивалентный линейный	Размер компонента грунта Вторичная нелинейность грунта Многолетняя мерзлота/тающая мерзлота
Метод импеданса	Ступени 1,2 – область частоты Ступень 3 – область времени	Ступени 1,2 – эквивалентный линейный Ступень 3 – эквивалентный линейный или нелинейный	Размер компонента грунта Добавленная масса грунта Взаимное влияние Мощность основания Моделирование гистерезисного уменьшения Жесткость основания Вторичная нелинейность грунта Многолетняя мерзлота/тающая мерзлота

### А.9.10.4 Область анализа и поведение грунта

В прямом методе обычно используется FE-модели в области времени. Они, следовательно, подходят для рассмотрения нелинейности грунта, но требуют внимательного выбора размеров компонентов грунта и его свойств, а также точного определения расположения верхних и нижних границ.

Первая и вторая ступени метода импеданса обычно выполняются в области частоты с эквивалентными линейными свойствами грунта. Это происходит по причине существования постоянных границ передачи для различных типов сейсмических волн, которые предотвращают случайные отражения волн на границах и, следовательно, избавляют от необходимости использовать большую модели грунта. Третья ступень может быть выполнена в области частоты или времени.

- В области частоты зависимость импеданса от частоты сохраняется также как взаимное влияние различных степеней свободы, особенно взаимосвязи между качанием и горизонтальной импедансной функций.

- В области времени зависимость импеданса от частоты может быть аппроксимирована с использованием пружин с линейной характеристикой, возможно, с добавленной массой грунта. Взаимное влияние требует специального рассмотрения.

- Нелинейная жесткость основания может быть введена на третьей ступени метода импеданса с использованием пружин с нелинейной характеристикой, представляющих общее поведение основания. Последнее должно быть установлено с использованием нелинейного анализа системы основания–грунта с учетом прослоек и юбок.

Также предлагаются альтернативные методы, отличные от прямого метода и метода импеданса, например метод онлайн-реакций, который включает физическое тестирование и анализ в реальном времени. Это метод анализа сосредоточенной массы, совмещенный с прямым испытанием на сдвиг для грунта, взятого с места строительства морской платформы. Более детальную информацию по этому методу можно найти в [169] и [170].

## **А.10 Искусственные острова**

### **А.10.1. Общая информация**

Руководство отсутствует.

### **А.10.2. Типы островов**

Руководство отсутствует.

### **А.10.3. Основные аспекты проектирования искусственных островов**

#### **А.10.3.1. Общие конструктивные соображения**

##### **1) Общая информация**

Руководство отсутствует.

##### **2) Технические условия**

Руководство отсутствует.

##### **3) Междисциплинарный подход**

Руководство отсутствует.

##### **4) Общие соображения для искусственных островов**

– Общая информация

Руководство отсутствует.

– Форма и направление

Руководство отсутствует.

– Устройства

Руководство отсутствует.

–Защита от аварийных проливов

Острова в основном строятся из натуральных (естественных) пористых материалов - заполнителей. В случае разлива на поверхности острова нефть или любая другая жидкость проникает в заполнитель и может принести вред окружающей среде. Возможное смягчение угрозы – не пропускающая жидкость поверхность, обладающая определенной способностью аккумулировать нефть, в качестве первой линии защиты, и геотекстильная мембрана (геомембрана) внутри

заполнителя с соответствующей закрытой дренажной системой, в качестве второй линии защиты. Глубина размещения геомембраны должна быть выбрана на основании предполагаемого уровня воды, расположения фронта (границы) замерзания и легкости удаления при прекращении эксплуатации.

– Морской доступ

Руководство отсутствует.

#### **A.10.3.2. Проектирование с учётом ледовых нагрузок**

##### **A.10.3.2.1. Сценарии взаимодействия конструкции со льдом**

Ледовые обломки, которые образуются перед островом в результате подвижек льда, могут рассматриваться как дополнительное сопротивление ледовым нагрузкам, увеличивая массу и соответственно повышая общую устойчивость сооружения. Для широких конструкций появление ледовых обломков на наклонной поверхности более вероятно, чем для узких вертикальных конструкций. Подходящий к сооружению лед выталкивается через это поле обломков на некоторую высоту. Максимальная высота обломков в определенной мере зависит от геометрии конструкции, глубины воды, толщины льда, а также от режима льда.

##### **A.10.3.2.2. Ледовые нагрузки**

Руководство отсутствует.

##### **A.10.3.2.3. Вторжение льдов**

Наползание (надвиг) льда случается, когда лед выталкивается на конструкцию другими приближающимися ледовыми полями. При длинной наклонной поверхности откоса острова свободный надвиг льда может распространяться на значительное расстояние, что может угрожать верхнему строению на рабочей площадке острова или путям эвакуации. Подплыв льда под конструкцию может произойти, если лед искривлен вниз, особенно когда ледяной обломок сформировался рядом с конструкцией.

Нагон льда обычно происходит, когда обломки льда встречают на своем пути неустойчивый надвиг льда. Вместо того чтобы подниматься вверх по наклонной конструкции, лед собирается, образуя ледовые нагромождения, часто очень быстро (в течение нескольких минут). Предпочтительнее вызывать нагон льда вблизи

ватерлинии, чтобы ограничить надвиг льда на конструкцию. Нагон льда может также произойти по периметру конструкции острова.

### **A.10.3.3. Геотехнический анализ**

#### **1) Геотехнические изыскания**

Руководство отсутствует.

#### **2) Определение характеристик грунтового материала - заполнителя**

Руководство отсутствует.

#### **3) Циклические нагрузки**

Руководство отсутствует.

#### **4) Изменение температурных условий**

Руководство отсутствует.

#### **5) Режимы разрушения**

Требуется проведение анализа для следующих режимов разрушения:

- **Общее скольжение.** При общем скольжении следует учитывать все возможные сценарии взаимодействия льдов в течение зимнего периода времени.

- **Срезание верхней части.** В конструкции волнолома и искусственных островов с низким гребнем должна быть учтена возможность срезания верхней части. Срезание верхней части конструкции, которое относится к распространенным типам горизонтальных разрушений, может быть связано с наличием слоя, расположенного сразу же под замерзшим гребнем сооружения. В этом случае сопротивление может быть рассчитано с учетом веса сползающего гребня, трения и смякания по плоскости скольжения. Точное место расположения плоскости скольжения определяется с использованием результатов анализа величины проникновения зоны замерзания в сочетании с результатами геотехнических анализов. Должна быть рассмотрена возможность срезания верхней части конструкции с учетом ледовых условий (толщина, давление и скорость льда в местах приложения нагрузки), возможных в течение всего срока службы конструкции.

– Пассивное разрушение кромок. Значения нагрузок, соответствующих результатам анализа разрушения кромок, определяются с учетом крупности фракций грунта (камня) материала покрытия, угла наклона(к горизонту) и шероховатости поверхности откоса, толщины и прочности льда на изгиб. В целом, гребень сооружения должен быть, по крайней мере, в два раза выше номинальной толщины льда, расположенного над средним уровнем высокой воды, а толщина армированного слоя должна превышать номинальную толщину льда. Повреждение кромки – это характерное локальное повреждение каменной наброски в виде нескольких отдельных камней, вызванное большой локальной ледовой нагрузкой, которая в некоторых случаях может быть значительно выше общей нагрузки от льда, неровностями поверхности откосов, надвигом или изгибом льда при наплывании на откос острова.

– Разрушение пассивного расклинивания. Высота островов, укрепленных ограждающей конструкцией из шпунтовых свай, должна быть достаточно большой, чтобы предотвратить разрушение зоны пассивного расклинивания, находящейся за шпунтовым ограждением, под воздействием ледовых нагрузок.

– Сопротивление шпунтовых свай. Конструкция из шпунтовых свай должна обладать достаточным сопротивлением ледовым нагрузкам, обусловленным прочностью конструкции и сопротивлением грунта. Конструкция шпунтовой сваи должна быть проверена на локальные воздействия льда, пластическую текучесть и деформацию формы профиля.

6) Деформация

Руководство отсутствует.

7) Подготовка грунта

Руководство отсутствует.

**A.10.3.4. Инженерные аспекты защиты прибрежной зоны**

**A.10.3.4.1. Метеорологические и океанологические факторы**

1) Уровень воды

Уровень воды для проектируемого острова изменяется под влиянием астрономических приливов, штормового нагона воды и увеличения осадки острова, изменений атмосферного давления, долгосрочных колебаний уровня воды, вызванных сезонными, климатическими и гидрологическими явлениями. Последнее может быть особенно важно в закрытых морях и озерах. Кроме того, острова, построенные в прибрежных зонах или рядом с ними, будут испытывать краткосрочные колебания в ответ на гидрологические явления, связанные с течением.

2) Волны

Руководство отсутствует.

3) Ветер

Руководство отсутствует.

4) Течение

Руководство отсутствует.

5) Воронки размыва дна

Размыв дна в форме воронки происходит, когда вытекающие речные потоки затопляют прибрежный лед и через трещины и промытые отверстия в морском льду вытекают в виде вращающегося нисходящего потока воды – водоворотов (см. 6.6.4). Вихревые водовороты могут эродировать (размывать) морское дно и создавать кратеры – воронки размыва в морском дне. Так как приливные трещины обычно образуются в ледовом покрове вдоль откосов морских островов, воронки размыва обнаруживаются вблизи островов. В то время как армированные крепления откоса устойчивы к повреждениям или смещениям, вызванных водоворотами, незащищенное грунтовое основание армированного откоса острова может быть эродировано в виде воронок размыва. В результате таких воздействий может произойти смещение арматуры крепления в направлении склона.

*А.10.3.4.2. Профиль боковых откосов*

Основное отличие в проектировании креплений откосов островов и конструкций берегоукрепления для холодных морских регионов по сравнению с другими незамерзающими регионами – это присутствие льда. Лед оказывает как



положительное, так и отрицательное воздействие. С одной стороны, присутствие льда ограничивает влияние волн и эрозию (размыв) донного грунта. С другой стороны, лед может повредить защиту откоса, может произойти его надвиг на конструкцию, способный повредить верхнее строение острова (или береговые наземные сооружения). Волноломы, сконструированные для противостояния волнам, вместе с тем, как правило, могут выдержать и ледовые нагрузки. В этой связи, конструкция волнолома (профиль и степень шероховатости боковой наклонной поверхности) проектируется с учетом обеспечения минимизации ледовой нагрузки и движения единичных обломков за счет стимулирования изгиба льда при надвиге, а также снижения волновой нагрузки за счет рассеивания (гашения) энергии волн.

Ограничение наката волн и перехлеста выше допустимого уровня требует учета воздействия волн на выбранную конструкцию откоса острова при проектировании. Реализация возможных сценариев надвига и нагона льда требует анализа взаимодействия морского льда и откоса острова. Выбор профиля острова является важным фактором контроля предотвращения перехлеста волн и вторжений льда на рабочую площадку. Откосы острова могут быть постоянного профиля (с постоянным уклоном по длине откоса) с включением в качестве основного крепления систем армированной защиты в зоне наиболее интенсивного воздействия волн и льда. Откосы переменного профиля с уступами (горизонтальными бермами) вблизи расчетного уровня воды успешно применяются для уменьшения наката и перехлеста волн на рабочую площадку и с целью воздействия на процессы надвига и нагона льда.

В настоящее время искусственные острова защищаются сборными армированными железобетонными плитами и бетонными блоками, матами из бетонных блоков и мешками из синтетического материала, заполненных песком или гравием.

Армированные плиты могут выдержать нормальное напряжение и напряжение от сдвига вдоль всей поверхности откоса. В свою очередь, эти напряжения вызывают перемещения, сдвиг отдельных плит. Учитывая данное обстоятельство,

желательно, чтобы поверхность этих армированных соединенных между собой плит была относительно ровной. Угловые блоки обладают тенденцией скапливаться и сцепляться друг с другом. Ровные поверхности плит уменьшают напряжение сдвига. Недостатком неровного откоса с относительно большой поверхностью из отдельных плит является возможность при действии твердой замерзшей льдины вырвать армированную плиту и переместить ее на новое место.

#### А.10.3.4.3. Укрепление откосов

##### 1) Общие положения

Режимы локального разрушения защитных систем креплений откоса включают локальное повреждение или смещение, вызванное волновой или ледовой нагрузкой. Следует своевременно выявлять такие разрушения и проводить периодическое техническое обслуживание и ремонт. Если такое разрушение устранено вовремя, оно не угрожает целостности конструкции острова.

Более сильное разрушение может произойти в результате одного или нескольких событий, связанных с внешними воздействиями, и функционированию острова может быть нанесен вред. Значительное количество локальных разрушений, оставленных без внимания, также могут нанести вред функционированию острова. Большие потери или перемещения армированных конструкций даже на небольшой площади могут привести к ослаблению защиты в данном секторе острова, приводя, в свою очередь, к большим потерям материала - заполнителя, сильным перехлестам волн или вторжению льда на рабочую площадку.

Крупномасштабные разрушения с возможно глобальными последствиями могут произойти, если в результате перехлеста волн будет затоплена рабочая поверхность острова. Также в результате широкого по фронту сооружения наступления и надвига льда может возникнуть опасность для производственных мощностей верхнего строения острова, рабочего персонала и окружающей среды и.

См. подробное описание в [171].

##### 2) Карьерный бутовый камень

Существует ограниченный опыт по выбору необходимого размера камня из условия предотвращения возможности перемещения отдельных камней под

воздействием льда, в соответствии с которым минимальный размер камня должен соответствовать расчетной толщине льда.

### 3) Геотекстильные мешки с песком или гравием

Геотекстильные мешки, заполненные песком или гравием, могут использоваться в качестве креплений откосов в регионах, где карьеры с бутовым камнем отсутствуют. Такие геотекстильные защитные мешки обычно имеют емкость от 1,5 до 3 м<sup>3</sup> и вес от 2 до 6 тонн. Могут быть выбраны различные конфигурации расположений мешков из условий: максимальной площади покрытия (без наложения друг на друга) или улучшения стабильности их устойчивости под воздействием волновой нагрузки (с наложением друг на друга). Грамотный выбор ткани мешков может обеспечить срок их эксплуатации, сопоставимый со сроком службы проектируемой конструкции, или предусматривать периодическую замену поврежденных мешков. Дополнительная информация по мешкам из геоткани содержится в [172].

### 4) Бетонные соединенные маты

Бетонные маты, состоящие из отдельных бетонных блоков, соединенных друг с другом, успешно используются в прибрежных защитных сооружениях. Отдельные блоки могут быть физически соединены друг с другом с помощью кабеля либо цепями или соединительными скобами. В этой системе, состоящей из отдельных бетонных блоков, соединение является критическим фактором. Если блоки не соединены, они могут быть перемещены под действием волновых и ледовых нагрузок. Соединенные маты выступают как единая конструкция в зонах действия ледовой и волновой нагрузки. Соединенные маты более устойчивы к ледовым нагрузкам по сравнению с более мягкими системами защиты из геотекстильных мешков. Гладкие и ровные откосы, которые имеют бетонные маты, ограничивают возможность перемещения отдельных блоков при действии льда. Система сцепленных матов укладывается на прочную специальную фильтрующую ткань для удержания материала-заполнителя тела острова. Накат волн на эти гладкие поверхности может быть чрезмерным, приводя к выравниванию переменного (составного) профиля откоса с неровными защитными блоками, установленными в

верхней части откоса. Модульность системы бетонных матов обеспечивает достаточно быструю их установку и локализованный ремонт в случае повреждения. Повреждение соединенных бетонных матов может произойти в результате воздействия льда или волн, и этот механизм должен быть учтен при разработке конструкции. Дополнительная информация по соединенным бетонным матам содержится в [173].

#### **5) Сборные бетонные блоки**

Крупногабаритные бетонные сборные конструкции заводского изготовления обеспечивают защиту откоса острова. Существует большой выбор этих конструкций, различающихся формой, размерами, весом и степенью сцепления. Использование этих типов защиты в ледовых условиях ограничено.

##### **A.10.3.4.4. Накат и захлестывание волн**

Руководство отсутствует.

##### **A.10.3.4.5. Устойчивость берега**

Устойчивость береговой линии очень важна при выборе места расположения и проектировании береговых площадок и сооружений. Береговые линии и береговые откосы могут быть подвержены долгосрочным изменениям, которые значительно варьируются в краткосрочных периодах. Процессы, происходящие с изменением береговой линии, должны быть учтены на ранних стадиях проектирования. Учитывая срок службы конструкции, следует располагать береговые площадки на безопасном расстоянии от побережья или обрывистого берега, чтобы изменения береговой линии не оказывали влияния на конструкции или вспомогательные сооружения.

#### **A.10.4. Сейсмостойкое проектирование**

Сейсмостойкое проектирование искусственных островов включает предотвращение общего и локального разрушения (повреждения) грунтового материала – заполнителя тела острова. Также необходимо оценивать повреждение системы защиты – системы обеспечения устойчивости острова.

Для обеспечения сейсмостойкости конструкций островов должны быть рассмотрены следующие вопросы, которые в обобщенном виде приведены ниже:

– **Общее проектирование** (предотвращение состояния полной непригодности островного сооружения, его конструкции и основания, к эксплуатации). Включает оценку и разработку мероприятий по предотвращению общего разрушения сооружения на уровне дна моря, выше дна или для сооружения в целом под воздействием горизонтальной сейсмической нагрузки для обеспечения несущей способности и устойчивости системы «сооружение – грунтовое основание». Используются доступные линейные и нелинейные методы – 2-D или 3-D.

– **Локальное проектирование** (предотвращение состояния непригодности к нормальной эксплуатации). Включает оценку величин осадок (особенно для неравномерных осадок) для отдельных локальных областей грунтового основания вследствие его консолидации или разжижения во время землетрясений. Требуется рассмотрения горизонтальные смещения (колебания) грунтового материала тела острова во время землетрясений.

– **Системы защиты, проектирование которых должно выполняться из условий недопущения общего и локального разрушения сооружения.** Включают оценку прочности и устойчивости (несущей способности) для различных типов и конструкций креплений откосов островов, в том числе оконтуренных защитными (ограждающими) конструкциями, во время землетрясений. Для естественных (пологих) и искусственных (укрепленных с обжатым профилем) откосов должны применяться типовые методы обеспечения устойчивости. Для оценки системы удержания в виде шпунтового ограждения острова должны использоваться методы, предназначенные для проектирования дамб и причалов. Для оценки системы удержания в виде кессонных ограждающих конструкций рекомендуется использовать методы, разработанные для подпорных стенок. В некоторых случаях отдельные кессоны могут действовать как небольшая гравитационная опора с мелководным основанием, и в этом случае должны использоваться методы, содержащиеся в разделе 9.

#### **А.10.5. Строительство**

Руководство отсутствует.

#### **A.10.6. Мониторинг и обслуживание**

Руководство отсутствует.

#### **A.10.7. Вывод из эксплуатации и рекультивация**

Пример из практики, описывающий консервацию острова Mukluk Island в море Бофорта на Аляске, предоставлен в [174].

### **A.11 Стационарные стальные сооружения**

#### **A.11.1. Общие положения**

В дополнение к положениям стандарта ISO 19902 проектирование конструктивных элементов, которые работают как балки, колонны, балки-стойки, может быть выполнено в соответствии с национальными и региональными стандартами, например [175, 176, 177, 178, 179].

#### **A.11.2. Общие требования к проектированию**

Руководство отсутствует.

#### **A.11.3. Моделирование и расчет сооружения**

Руководство отсутствует.

#### **A.11.4. Прочность трубчатых элементов и соединений**

Руководство отсутствует.

#### **A.11.5. Прочность панелей с ребрами жесткости**

Примеры норм проектирования для ребер жесткости см. в [180] и [181].

Ссылки, относящиеся к мембранной нагрузке, применимы только для листовых панелей, но не для ребер жесткости или основных конструкций, поддерживающих эти панели.

Следует избегать применения методов расчета мембран без тщательного учета влияния величины  $\rho$ -дельта, связанного с основными путями нагружения и максимальной деформацией под нагрузкой при наличии и отсутствии постоянной деформации. У классификационных обществ имеются правила для расчета деформации перемычек под гидростатическим воздействием, которые могут не

соответствовать локальным проектным ледовым нагрузкам, содержащимся в положениях настоящего стандарта.

#### **A.11.6. Прочность железобетонных стен**

Руководство отсутствует.

#### **A.11.7. Сейсмостойкое проектирование**

##### **A.11.7.1. Сооружения со стальным каркасом**

Руководство отсутствует.

##### **A.11.7.2. Стальные конструкции из листов с ребрами жесткости**

Так как информация по сейсмостойкому проектированию стальных конструкций из листов с ребрами жесткости на основании гравитационного типа в ИСО 19902 ограничена, приемлемы также общие принципы сейсмостойкого проектирования, применимые к стальным трубчатым каркасным конструкциям. Ниже приводятся рекомендации общего порядка:

а) Пластичность при низких температурах. При проектировании элементов конструкции, которые подвержены воздействию температуры окружающей среды, должна использоваться хладостойкая сталь, которая должна выдержать пластические деформации при землетрясениях. Такой материал должен быть способен выдержать пластические деформации при проектной температуре.

б) Механизм общей пластичности. Формирование механизмов пластичности совместно с расположением и действием пластичных шарниров в конструкции должно быть четко определено и проверено, чтобы удостовериться, что они не приведут к общему разрушению.

в) Общие деформации. Из-за отсутствия полномасштабных экспериментальных данных проектировщики полагаются на FE-модели стальной конструкции для получения общих деформаций в зонах пластичности.

г) Локальная деформация. Общие деформации должны преобразоваться в локальные с использованием детальных FE-моделей. Ограничения для полной деформации должны устанавливаться на основании данных по материалу.

д) Сейсмическая детализация. Для подтверждения способности локальных компонентов противостоять пластическим деформациям, детализация

компактного профиля должна производиться в соответствии с положениями ИСО 19902.

е) Контролируемый изгиб. В некоторых случаях возможно достичь удовлетворительной пластичности даже при изгибе некоторых компонентов. В таких случаях удовлетворительное исполнение должно быть продемонстрировано с использованием признанных инженерных решений.

ж) Проектный запас. Компоненты пластичной конструкции основания гравитационного типа должны четко рассчитываться по усилию и перемещению.

з) Фундаментные «юбки». Рекомендуется проектировать стальные ребристые элементы – «юбки» таким образом, чтобы расчетная поверхность сдвига проходила по низу конструкций «юбок» в несущем слое грунта с предотвращением локального развития зон предельного состояния в грунтовом основании для обеспечения общей устойчивости сооружения гравитационного типа; конструктивные параметры верхней части юбок должны быть учтены при проектировании нижней части фундамента сооружения. Допускаемые напряжения (нагрузочные эффекты) в стальных «юбках» должны быть определены исходя из совместной работы сооружения с фундаментом гравитационного типа и грунтового основания для наиболее неблагоприятного расчетного сочетания нагрузок. При применении конструкций платформ погружного типа напряжения, возникающие в «юбках» на этапах установки и снятия платформ с точки при возможных расчетных сочетаниях нагрузок, должны соответствовать диапазону упругопластических деформаций с обеспечением прочности элементов конструкции фундамента, поскольку деформированные юбки будут препятствовать нормальной эксплуатации сооружения.

#### **A.11.8. Усталость материала**

Анализ усталости, связанный с воздействием льда, см. в A.8.2.6.3. Высокая цикличность, низкая амплитуда циклических напряжений может быть вызвана частыми низкими по интенсивности воздействиями ледовых нагрузок.

Следует обратить внимание на достоверность кривых лето-зима при воздействии низких температур.



### **А.11.9. Материалы, испытания и неразрушающий контроль**

Особое внимание следует обратить на сваи, которые нужно будет погружать в замороженный грунт при низких температурах.

Температуры испытания материалов, указанные в ИСО 19902, соответствуют определению термина LAST в этом международном стандарте. Если в региональных нормативных требованиях указаны другие температуры, должна быть гарантирована согласованность с температурами испытаний.

### **А.11.10. Защита от коррозии и абразивного износа**

#### **А.11.10.1. Катодная защита**

Руководство отсутствует.

#### **А.11.10.2. Абразивное действие льда**

Руководство отсутствует.

#### **А.11.10.3. Коррозия на стыках**

Имеющиеся сегодня данные показывают, что возможно минимизировать разность металлургического и электрического потенциала между зоной сварки и исходными листами до такой степени, чтобы избежать коррозии на стыках. Различные электрические методы демонстрируют, что определенные уровни разности потенциалов между различными металлами хорошо согласуются со скоростью разрушения. Дополнительные ускоренные испытания на коррозию могут проводиться на образцах пробной сварки для подтверждения, что степень металлургической разницы в зоне сварки (являющаяся результатом процесса сварки) не приведет к последующей высокой скорости износа.

#### **А.11.11. Сварка**

Руководство отсутствует.

## **А 12 Стационарные железобетонные сооружения**

### **А.12.1. Общие требования**

Руководство отсутствует.

### **А.12.2. Нагрузки и нагрузочный эффект**

### **A.12.3. Расчет конструкции**

#### **A.12.3.1. Динамический расчет**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.3.2. Перепады давления**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.3.3. Физическая модель**

##### **A.12.3.3.1. Взаимодействие грунт–конструкция**

Руководство отсутствует.

##### **A.12.3.3.2. Другие условия опирания**

Может быть предусмотрено дополнительное усиление против поперечного сдвига для передачи нагрузки на противоположную поверхность с целью предотвращения разрушений, обусловленных вытягиванием или продавливанием в случае, когда загружена только часть толщины конструктивного элемента.

##### **A.12.3.3.3. Тепловое воздействие**

Деформационные нагрузки, вызванные влиянием разности температур или температурными градиентами, как правило, определяются на основе линейного анализа. Нелинейные упругие свойства железобетона способствующие трещинообразованию под действием нагрузок также должны быть учтены поправочными коэффициентами при линейно-упругом расчете воздействия нагрузки. Для расчетов по предельному состоянию SLS (для предельных состояний ULS и FLS тепловыми воздействиями, за исключением сдвигающих усилий, обычно пренебрегают) значение поправочного коэффициента менее 1,0 является общепринятым, при подтверждении соответствующими документами. Для проверки требуемой плотности и расчета ширины трещин по предельному состоянию SLS, температурные напряжения должны рассматриваться с учетом разных осевых жесткостей для растянутой и сжатой сторон поперечного сечения.

#### **A.12.3.4. Типы расчетов**

##### **A.12.3.4.1. Упруго-линейный статический расчет**

Оценка жесткости элемента конструкции, используемая для структурного анализа, проводится либо для поперечного сечения области, содержащей только бетон, либо с учетом влияния стальной арматуры. Модуль упругости Юнга должен соответствовать типу нагрузки (статическая или динамическая), а также возрасту бетона.

Влияние деформационных воздействий, таких как температурные или осадка фундамента, должны учитываться в виде напряжений, а не усилий, на основе упругого поведения. Например, при расчете ширины трещины напряжения от температурных деформаций должны быть добавлены к напряжениям, вызванным другими воздействиями. Для долгосрочных температурных перепадов необходимо учитывать благоприятное, в данном случае, воздействие нагрузки, связанной с ползучестью бетона.

#### **A.12.3.4.2. Нелинейный расчет**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.3.5. Требования к проведению расчетов**

##### **A.12.3.5.1. Расчеты для стадии строительства**

В зависимости от размера и формы бетонная конструкция может быть сооружена частично в сухом доке и частично наплаву. Конструкция может быть сооружена наплаву (наливной док) в заранее определенной последовательности, чтобы оптимизировать график строительства с учетом с различных задержек и ограниченным количеством подъемников для подачи бетонной смеси. Различные этапы бетонирования наплаву приводят к аккумулярованию воздействий и напряжений в нижних частях конструкции (так называемые "запертые" или "внутренние" силы и напряжения), которые могут на завершающей стадии значительно отклоняться от распределений сил и нагрузок, соответствующих идеальной схемы одноэтапного строительства. Рассмотрение различных этапов строительства должно быть выполнено с использованием метода FE в соответствии с последовательностью строительства. В качестве альтернативы для детального проектирования бетонной конструкции на различных этапах может быть применена усовершенствованный метод FE с использованием, например, суперэлементов.

#### **А.12.3.5.2. Обеспечение ремонтпригодности в процессе эксплуатации**

При расчете ширины трещин давление льда в трещинах обычно не учитывается.

#### **А.12.3.5.3. Расчет на выносливость**

Руководство отсутствует.

#### **А.12.3.5.4. Анализ аварийных и аномальных ситуаций**

Руководство отсутствует.

### **А.12.3.6. Сейсмика**

Руководство отсутствует.

## **А.12.4. Бетонные работы**

### **А.12.4.1. Проектирование**

#### **А.12.4.1.1. Принципы расчета элементов оболочки**

Руководство отсутствует.

#### **А.12.4.1.2. Принципы расчета усталости**

Руководство отсутствует.

#### **А.12.4.1.3. Принципы расчета долговечности**

Руководство отсутствует.

#### **А.12.4.1.4. Циклы замораживания и оттаивания**

##### **1) Общая информация**

Для изменения прочностных и деформационных характеристик бетона во время циклов замораживания и оттаивания достоверных данных нет, потому что пределы прочности на сжатие и растяжение известны только при нормальных температурах. В частности, прочность сцепления между камнями заполнителя и цементными камнями, а также связь между прочностью сцепления и циклами замораживания и оттаивания не определены.

Основные факторы, влияющие на прочность бетона, – это расстояние между воздушными порами, объем воздушных пор, соотношение воды и цемента, тип связующего вещества, расположение бетонного изделия в конструкции. Наиболее

существенный фактор – степень критического водонасыщения бетона. При её превышении бетон может быть поврежден во время замораживания.

## 2) Обзор процесса абразивного воздействия льда

Ледовые нагрузки могут воздействовать на камни заполнителя, выступающие из поверхности бетона в случае его истирания. Кроме того, лед, намерзший на бетоне, приводит к внешним механическим воздействиям на заполнитель. Величина воздействий зависит как от свойств льда, так и от размера бетонных камней. Из-за процессов разрушения льда могут происходить повторные воздействия.

Необходимы соответствующие данные полевых наблюдений для бетона используемого типа и предполагаемой ледовой обстановки.

### *Механизмы абразивного износа*

Ледовые нагрузки могут оказывать три разных типа воздействий на поверхность бетона. После штатной отливки поверхность бетона ровная, а заполнитель покрыт цементом, и движущийся лед вызывает сжатие перпендикулярно поверхности, а напряжение трения - вдоль поверхности. Величина напряжения трения зависит от качества поверхности, т. е. коэффициента трения между льдом и бетоном. Значение коэффициента динамического трения между морским льдом и поверхностью бетона, отлитого с использованием гладких форм, как было установлено опытным путем, равно 0,24.

Лед, вмерзший в бетон, может вызвать растяжение, направленное перпендикулярно к поверхности. Вызванные нагрузки, как оказалось, достаточно небольшие. Средняя прочность сцепления бетона при его смерзании со льдом составляет около 0,3 МПа. Абразивное изнашивание поверхности бетона, вызванное этим процессом, обычно невелико и наблюдается только для нового бетона.

Фактически, абразивное изнашивание бетонной поверхности начинается, когда лед действует на заполнитель бетона, вышедшего на поверхность частично в результате абразивного изнашивания, вызванного трением льда, и частично в результате разрушения цемента под влиянием соленой морской воды и мороза. Лед, воздействующий на конструкцию, может оказывать на вышедший на поверхность

заполнитель локальное давление, значительно превышающее общее среднее давление контакта, см. 8.2 и А.8.2.

### *Ледовые процессы*

Было измерено трение между бетоном и льдом. Основные факторы, которые, как выяснилось, влияют на абразивный износ, – это температура льда, локальное давление льда на поверхность бетона, а также прочность бетона, особенно изменения прочности в результате циклов замораживания и оттаивания. Чем ниже температура льда и выше интенсивность напряжений, тем больше абразивный износ.

Для ледовых нагрузок, основными параметрами, влияющими на скорость абразивного воздействия на поверхность материала, являются (в соответствии с [182] –[188]):

- нормальная и поперечная нагрузка;
- температура льда;
- относительная скорость;
- путь трения.

Величина нормального давления может быть оценена, прежде всего, в предположении гладкой поверхности контакта. В этих условиях наивысшие давления возникают при ломке хрупкого льда. Значения локального давления получены в предположении, что ширина области контакта очень мала. Метод, описанный в А.8.2.5.2 для локального давления льда, может быть применим при допущении, что область контакта очень узкая ( $w_L \approx 0$ ), откуда следует, что коэффициент распределения давления  $\gamma_{LB} = 8,0$  (см. А.8.2.5.2).

Давление льда на очень небольшие зоны может достигать значений в диапазоне от 25 до 40 МПа. Более высокое давление, до 80 МПа, было получено при измерениях в арктической зоне Канады для зоны размером 10 мм [189]. Такое высокое локальное давление может не только привести к абразивному изнашиванию бетона, но и ускорить коррозию стальных конструкций.

В то время как скорость абразивного воздействия не чувствительна к температуре льда при температуре выше минус 10°C, эта скорость значительно увеличивается при температурах ниже минус 10°C. Поскольку коэффициент трения возрастает при низкой скорости льда, было изучено влияние скорости льда. Опытным путем было показано, что скорость скольжения оказывает незначительное влияние на абразивное воздействие льда [185, 186, 187]. С другой стороны, натурные эксперименты на маяке в Балтийском море показали, что касательное напряжение может вызывать большие разрушения, чем сжимающее давление [190, 191, 192].

Степень перемещений ледового поля вокруг конструкции может использоваться для определения пути трения между поверхностью конструкции и ледовым полем. Скорость абразивного износа бетона, как правило, уменьшается при увеличении пути трения.

#### *Испытания на абразивное изнашивание*

Изнашивание бетонных конструкций арктического шельфа происходит в результате сложной комбинации воздействий, вызываемых циклами замораживания и оттаивания в морской воде, колебаниями температуры и ледовыми нагрузками.

– Глубина абразивного износа и сопротивление бетона может быть определено с помощью диаграмм абразивного воздействия или посредством лабораторных исследований. Наилучший результат достигается при применении обоих методов. С помощью диаграмм абразивного воздействия глубина абразивного износа может быть оценена как функция прочности при сжатии бетона и движения ледового поля. Сопротивление абразивному износу может быть также измерено с помощью 10-минутного испытания на абразивное воздействие, перед которым бетонная плита должна пройти тест на циклическое замораживание – оттаивание в морской воде (50 циклов при температуре от минус 50°C до 20°C).

– Самый важный механический фактор, относящийся к измерению сопротивления абразивному износу бетона, – это прочность бетона. Прочность сцепления камней заполнителя и цементного камня и его сопротивление

повторяющимся циклам замораживания и оттаивания особенно критична. Чтобы обеспечить хорошее сопротивление абразивному износу, необходимо, чтобы прочность бетона была, по крайней мере, 70 МПа. Естественно, бетон также должен быть устойчив к замерзанию (см. 12.4.1.4.1.). Прочность бетона во время повторяющихся испытаний с замораживанием и оттаиванием наивысшая, когда соотношение вода-цемент более, чем 0,30–0,35.

– Повторяющиеся испытания с замораживанием и оттаиванием обыкновенных цементных бетонов показали, что прочность сцепления между камнями засыпки на поверхности бетона уменьшается быстрее, чем прочность на сжатие и растяжение. Очевидно, что изменения температуры, превышающие 40°C, ухудшают сцепление камней на поверхности и увеличивают трещинообразование на поверхности.

– Наилучшие результаты в испытаниях на прочность и абразивный износ получены для бетонов, содержащих кремний и доменный шлак, наихудшие результаты — для бетона на легких заполнителях.

– Сопротивление абразивному износу может быть улучшено, если предотвратить повреждения, вызванные замерзанием – или путем сохранения всей стенки или достаточно теплой, или замороженной, чтобы исключить процесс циклического замораживания – оттаивания.

– Если прочность сцепления заполнителя бетона как минимум 8 МПа, сопротивление бетона абразивному воздействию льда считается очень хорошим.

– Если глубина абразивного износа в лабораторных условиях после испытаний на циклическое замораживание – оттаивание (50 циклов) не более 10 мм, сопротивление бетона абразивному воздействию льда считается хорошим.

– Увеличение максимального размера заполнителя бетона снижает абразию бетона. Большие камни, выступающие на поверхности бетона, ломают лед до того как происходит повреждение мелкозернистых частиц.



– Использование твердого однородного бетона в абразивных зонах снижает абразивное воздействие, т. к. поверхность подвергается равномерному абразивному износу, и камни не подвергаются ледовой нагрузке.

#### *Меры по снижению абразивного износа*

В некоторых случаях на внешней стороне бетонных элементов, подверженных абразивному воздействию льда, может применяться стальная защита. Однако разработка и установка таких устройств должна выполняться с особой тщательностью, поскольку проникновение воды между поверхностью бетона и внутренней поверхностью стальной защиты в случае замерзания может привести к местным повреждениям бетона. Более того, стальные плиты защиты нуждаются в катодной защите, которая не должна подвергаться воздействию льда или быть рассчитана на такое воздействие.

##### А.12.4.1.4.3. Защитный слой бетона

Необходимо очень осторожно подходить к увеличению защитного слоя бетона с целью уменьшения абразии и износа, т. к. сверх определенных пределов слишком большой защитный слой (в диапазоне от 60 до 70 мм) может стать источником растрескивания (расслаивания), даже при умеренных воздействиях. В этом случае должно быть предусмотрено усиление наружного слоя. В качестве альтернативы могут выступать стальные листы для защиты от абразивного воздействия льда и износа без увеличения защитного слоя бетона с вытекающим отсюда недостатком в виде коррозии и необходимости коррозионной защиты.

При использовании защитных стальных листов на наружной поверхности для улучшения сопротивления абразивному воздействию льда, необходимо учитывать возможное расслаивание в результате перемещения и замерзания водяных паров под листом.

##### А.12.4.1.5. Принципы расчета изгиба

Руководство отсутствует.

##### А.12.4.1.6. Принципы расчета внешних деформаций

Руководство отсутствует.

**А.12.4.1.7. Расчет огнестойкости**

Руководство отсутствует.

**А.12.4.1.8. Частные факторы для материалов**

Руководство отсутствует.

**А.12.4.1.9. Демпфирующая способность системы**

Руководство отсутствует.

**А.12.4.1.10. Минимальное усиление**

Руководство отсутствует.

**А.12.4.2. Материалы**

При определении требования к проведению испытаний бетона на устойчивость к циклическому замораживанию – оттаиванию может использоваться [193] или эквивалентный стандарт.

Дополнительные сведения о легких заполнителях бетона необходимо сослаться, например, на [194].

Арматура в постоянно находящемся в морской воде бетоне не требует специальной защиты от коррозии, особенно, если конструкция оснащена катодной защитой. В частях конструкции, где возможна коррозия арматуры, требования к качеству бетона (сопротивление прониканию хлорида и диффузии кислорода, использование микрокремнезема и зольной пыли, добавок и т. п.), покрытий и защитного слоя являются достаточными мерами, наряду с применением арматуры с гальваническим покрытием. Если требуется более качественная арматура, то предпочтительнее использовать арматуру из нержавеющей стали, чем арматуру с эпоксидным покрытием, поскольку последняя для предотвращения повреждений требует аккуратного обращения. Допускается использовать полимерную арматуру, упрочненную волокном, принятую некоторыми национальными стандартами, такими как ACI и CSA, но ее пригодность в условиях низких температур нуждается в проверке.

Стандартные методы испытаний для определения объема и параметров воздушных пор в бетоне приведены в [195], [196] и [197].

**А.12.4.3. Производство работ**

А.12.4.3.1. Опалубка

Руководство отсутствует.

А.12.4.3.2. Предварительное и последующее напряжение

Руководство отсутствует.

А.12.4.3.3. Защитные мероприятия

Руководство отсутствует.

А.12.4.3.4. Бетонирование

Руководство отсутствует.

А.12.4.3.5. Закладные детали

Требования к проектированию закладных деталей приведены в [198].

А.12.4.3.6. Гидроиспытания

Руководство отсутствует.

А.12.4.3.7. Проведение работ в холодную и теплую погоду

*А.12.4.3.7.1. Бетонирование в холодную погоду*

Инструкции по бетонированию в холодную погоду приведены в CSA A23.1–94 [199] и ACI 306R [200]. С учетом холодной погоды при формовке и защите бетона должны соблюдаться следующие требования:

а) особое внимание должно быть уделено затвердеванию бетона для обеспечения максимального срока службы и минимального трещинообразования.

б) морская вода не должна использоваться в процессе набора начальной твердости железобетона и предварительно напряженного бетона. Через три дня бетон может быть опущен в морскую воду для окончательного затвердевания.

в) морская вода не должна использоваться для чистки опалубки.

г) для толстых массивных бетонных секций должно быть оценено тепловыделение, вызываемое гидратацией цементного материала, и приняты меры по контролю трещинообразования и остаточных напряжений в различных условиях изменения и ограничения объема.

Примечание – Меры по защите бетона от сильных изменений температуры приведены в [199] или аналогичном стандарте.

д) бетон должен находиться в условиях высокой влажности при температуре выше 10°C в течение первых трех дней или в течение времени, необходимого для набора 35% проектной прочности на сжатие, достигаемой через 28 суток. Если бетон необходимо подвергнуть нагружению и/или абразивному воздействию сразу после основного времени выдерживания (хотя рекомендуется избегать таких ситуаций), то его выдерживают в течение 4 последующих дней при минимально допустимой температуре 10°C, либо до достижения им 70% проектной прочности на сжатие, достигаемой через 28 суток.

Должны быть указаны требования к процессу и продолжительности отвердевания с подробным описанием специальных условий, выполнение которых является обязательным.

При отрицательных температурах воздуха защитное укрытие с бетона может быть снято через 12 часов после окончания необходимого времени выдерживания бетона во влажных условиях.

Отвердители не должны содержать хлоридов. Отвердители не должны использоваться на поверхностях, где должны быть уложены и связаны последующие слои бетона, если не выполняется хотя бы одно из следующих условий:

- отвердители полностью удалены по окончании периода отвердевания с помощью пескоструйной очистки или использования разрешенного растворителя;
- испытания показывают, что оставшаяся оболочка не уменьшает сцепление ниже проектных величин;
- предусмотрены подходящие механические средства, обеспечивающее полное сцепление.

Отвердители не должны использоваться на поверхности, на которую предполагается нанесение покрытия или краски, совместимость которых с покрытием не была подтверждена испытаниями.

Если температура воздуха равна или менее 5°C, или при прогнозе температуры ниже 5°C в течение 24 часов с момента укладки, все материалы и

оборудование, необходимые для обеспечения защитных укрытий, должны быть подготовлены заранее, до начала укладки.

При возведении бетонных сооружений холодная погода определяется как период трех последующих дней, в течение которых средняя дневная температура опускается ниже 5°C.

Когда температура выше 10°C удерживается в течение более половины 24 часового периода, бетон не считается холодным.

В холодную погоду должны быть предусмотрены средства для поддержания температуры только что уложенного бетона выше минимальных значений (указанных в [199]), относящихся к укладке бетона и качеству выполняемых работ, в течение минимального периода, составляющего 3 дня, или в течение необходимого времени выдерживания бетона во влажных условиях для его защиты от разрушений вследствие промерзания.

Используемый заполнитель не должен содержать снег и лед.

Снег и лед должны быть удалены до того, как будет уложен бетон. Хлорид кальция или другие противобледенительные соли не должны использоваться в качестве реагентов в формах. Бетон не должен укладываться непосредственно на поверхность или вплотную к ней, если в результате этого температура бетона может снизиться ниже минимальных значений, указанных далее.

Требуемая минимальная температура бетона сразу после укладки может быть достигнута нагреванием воды или наполнителя или сочетанием этих методов (рекомендации для холодного бетонирования см., например, в [200]).

Готовый бетон должен выдерживаться при температуре не более чем на 6°C выше минимальной температуры, указанной в таблице А.12.1.

Т а б л и ц а А.12.1– Минимальные температуры бетона после укладки

<i>Минимальные температуры бетона после укладки, °C</i>			
<i>Температура</i>	<i>Минимальные размеры секции бетона</i>		
	<i>&lt; 1 м</i>	<i>От 1 до 2 м</i>	<i>&gt; 2 м</i>
выше –1°C	13	10	7

от $-18$ до $-1^{\circ}\text{C}$	16	13	10
ниже $-18^{\circ}\text{C}$	18	16	13

Эти температуры должны поддерживаться в течение времени, которое зависит от используемых ингредиентов, их соотношения в смеси и необходимой прочности бетона. Нарастание прочности на месте укладки при холодной температуре должно контролироваться для определения времени безопасного снятия подпорок и опалубки.

А.12.4.3.7.2. Бетонирование канала предварительного напряжения в холодную погоду

Руководство отсутствует.

А.12.4.3.7.3. Укладка и гибка арматуры в холодную погоду

Руководство отсутствует.

## **А.12.5. Механические системы**

### **А.12.5.1. Введение**

Руководство отсутствует.

### **А.12.5.2. Постоянные механические системы**

#### **А.12.5.2.1. Система хранения сырой нефти**

При удовлетворении условий хрупкости могут использоваться трубы из армированного стеклопластика. Характеристики стали для такого использования можно найти, например, в [201] или другом соответствующем стандарте.

#### **А.12.5.2.2. Другие системы хранения**

Трубы из армированного стеклопластика должны использоваться с осторожностью в балластных системах и системах с морской водой из-за возможного повреждения при перемещении опорной конструкции.

#### **А.12.5.2.3. Райзеры и J-образные трубы**

Руководство отсутствует.

### **А.12.5.3. Механические системы – системы временной водяной**

#### **балластировки/дебалластировки**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.5.4. Крепления и врезания**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.5.5. Механические системы — проектирование трубных опор**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.6. Морские операции и строительство на плаву**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.7. Контроль коррозии**

Руководство отсутствует.

#### **A.12.8. Обследование и мониторинг состояния**

Руководство отсутствует.

### **A 13 Плавающие сооружения**

#### **A. 13.1. Общие положения**

В распоряжении проектировщиков плавучих сооружений, предназначенных для использования в замерзающих морских акваториях, имеются конструкторские решения как общего, так и частного характера. Возможны ситуации, когда такое сооружение не может быть логически соотнесено с конкретными разделами данного стандарта или отдельные требования могут оказаться неприменимыми. В таких случаях проектирование должно основываться на принципах, установленных в данном стандарте, при этом должен обеспечиваться уровень безопасности эквивалентный или превышающий уровень безопасности, обусловленный данным стандартом. Принципы, содержащиеся в разделе A.13, применимы как к плавучим сооружениям со стальным корпусом, так и к сооружениям, изготовленным из других материалов.

Настоящий стандарт не содержит детальных инструкций по определению надежных оценок параметров окружающей среды, которые должны быть учтены для всех проектов плавучих сооружений. В этом отношении важно учесть предыдущий опыт, включая сбор и анализ данных, статистические методы, определение ключевых факторов окружающей среды, оказывающих влияние на

конкретные системы, включая факторы, связанные с управлением ледовой обстановкой. Так как данные многолетних наблюдений по арктическим и холодным регионам часто представлены в недостаточном объеме, планы действий и мероприятий должны учитывать специфику условий окружающей среды и связанные с ней неопределенности. Привлечение экспертов по ледовым и природно-климатическим условиям, а также моряков, имеющих практический опыт операций в аналогичных условиях, является в таком случае обязательным для обеспечения безопасной и эффективной работы.

Также важно, чтобы проектировщик, в процессе использования данных по природно-климатическим условиям, был осведомлен о возможной неопределенности в предоставленных параметрах и влиянии этой неопределенности на проектируемую систему в целом. Допущения и эксплуатационные ограничения, определенные для проектов плавучих сооружений, должны использоваться в дальнейшем в качестве основы при разработке требований к эксплуатации сооружения и уточняться по мере накопления опыта.

Для платформ на натяжных опорах положения приведены в [202]. Несмотря на то, что данный стандарт не распространяется на платформы с натяжными опорами и самоподъемные установки, положения 13.3 и 13.4, касающиеся ледовых условий и их воздействия, могут быть применены для указанных сооружений.

### **А.13.2. Общая методология проектирования**

#### **А.13.2.1. Принципы проектирования**

Круг вопросов, связанных с ледовой нагрузкой, для большей части плавучих установок обычно несколько шире, чем для стационарных сооружений. Он охватывает следующие аспекты:

- взаимосвязи, существующие между проектированием и эксплуатацией плавучей установки;
- системы управления ледовой обстановкой, используемые для защиты установки;
- вероятностные характеристики эффективности указанных систем;



– различные способы, с помощью которых может быть достигнута надежность системы.

Существует много особенностей, связанных с эксплуатацией плавучих сооружений во льдах. Для плавучих сооружений судового типа существуют специфические требования, касающиеся очистки ото льда турелей, движителей и водозаборов. Различные обломки льда и небольшие льдины могут накапливаться между опорами сооружения и влиять на его эффективную размерность при определенных сценариях.

#### **А.13.2.2. Подходы к проектированию и эксплуатации**

Для плавучих установок, используемых в замерзающих акваториях, могут быть выбраны разнообразные подходы к проектированию и эксплуатации:

– Пассивные, находящиеся с одной стороны возможных подходов. Методы, при использовании которых плавучее сооружение может быть спроектировано таким образом, чтобы оно могло выдержать возможные ледовые нагрузки и другие воздействия окружающей среды (как нормальные, так и экстремальные), в пассивном режиме сохраняя неизменное местоположение (при этом плавучее сооружение поворачивается подобно флюгеру, не используя каких-либо подруливающих устройств). При пассивном подходе не применяются средства управления ледовой обстановкой и отсутствует возможность отсоединения и увода сооружения. Этот подход аналогичен подходу к проектированию, применяемому для стационарных морских сооружений и для многих плавучих установок в условиях открытой воды.

– Полуактивные. При таком сценарии также не используются технологии управления ледовой обстановкой. Для предотвращения действия ледовых нагрузок, превышающих сопротивление плавучей установки, она может быть уведена с места эксплуатации в соответствии с процедурами, определяющими порядок действий на случай ледовой опасности. Один из примеров – эксплуатация установки в течение определенного сезона, когда ледовые условия относительно легкие.

– Активные. Находятся на другой стороне возможных подходов. При использовании активных методов плавучее сооружение может эксплуатироваться таким образом, чтобы избежать определенных ледовых условий. Для этого могут использоваться, например, средства управления ледовой обстановкой, включающие процедуры, которые определяют действия на случай надвигающейся ледовой опасности. Если ледовые условия становятся слишком тяжелыми, работа установки может быть приостановлена, а она сама перемещена в другое место.

Существует широкий диапазон подходов к проектированию и эксплуатации, в которых применяются различные уровни устойчивости к ледовым воздействиям (учитывается в конструкции платформы и возможностях сохранения ею неизменного положения), различные системы отсоединения и перемещения (и необходимые для этих операций интервалы времени), а также различные уровни поддержки при управлении ледовой обстановкой.

Диапазон подходов для плавучих установок в ледовых условиях представлен на рисунке А.13.1.

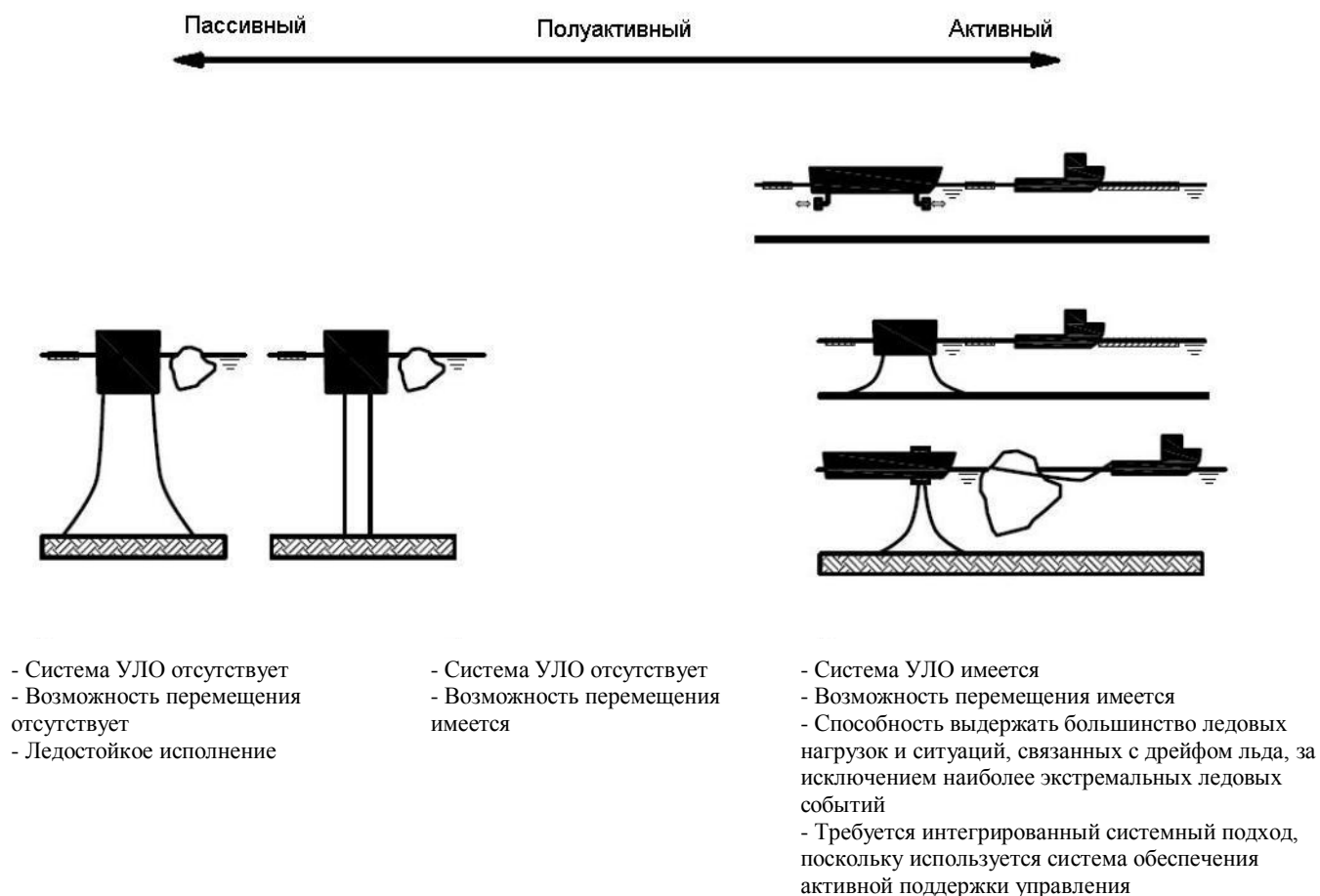


Рисунок А.13.1 - Диапазон подходов, используемых для плавучих сооружений в арктических регионах и регионах с холодным климатом

Для всех активно эксплуатируемых плавучих установок должны ясно осознаваться такие факторы, как важность надежного определения неблагоприятной факторов ледовой обстановки (айсберги, многолетние ледовые поля, большие однолетние торосы, поля ледовых нагромождений, давление льда) до того, как они вступят в контакт с конструкцией, а также и надежность систем управления ледовой обстановкой. Логическая схема, которая показывает взаимосвязи между различными факторами, приводится на рисунке А.13.2.

Некоторые плавучие установки могут быть специально спроектированы для определенных сценариев взаимодействия со льдом в соответствии с принципами классификации судов, а не в соответствии со стратегией, основанной на событиях, как подразумевается в настоящем стандарте.

Последствия воздействия ледовых нагрузок на различные компоненты плавучей установки могут быть учтены за счет процедур эксплуатации, таких как промывка выкидных линий или отсоединение подводного оборудования. Такие факторы используются при определении категории сложности, как указано в Статье 7 настоящего стандарта. Категории сложности могут устанавливаться для всей установки или ее частей, как показано в примерах в таблице А.13.1. Собственник может устанавливать более серьезные последствия в соответствии со стоимостью имущества и величиной потерь при остановке эксплуатации.

#### **А.13.2.3. Анализ вопросов проектирования**

При проектировании рекомендуется использовать комплексный и систематический подход, обеспечивающий учет всех факторов и их взаимосвязей. Этот подход должен иметь междисциплинарный характер и/или основываться на методике идентификации опасностей HAZID.

Т а б л и ц а А.13.1. Категории сложности для основных компонентов плавучих сооружений

<i>Компонент</i>	<i>Категория сложности</i>	<i>Примечания</i>
Установка в целом	L1	Нагрузки могут быть снижены с использованием системы управления ледовой обстановкой и возможности отсоединения
Хранение углеводородов	L1 в	-
Корпус	L1/L2	В тех зонах, где нагрузки представляет высокий/незначительный риск для жизни и окружающей среды
Система позиционирования	L3	-
Устье скважины	В соответствии с ИСО 19904-1	-
Трубопроводы и райзеры	В соответствии с ИСО 19904-1	-
Трубопроводы и райзеры	L3	Если их промывка является частью системы управления ледовой обстановкой, удовлетворяющей требованиям данного стандарта
Другие компоненты	L1	Нагрузки представляют высокий риск для жизни и окружающей среды
Другие компоненты	L2	Нагрузки представляют средний риск для жизни и окружающей среды
Другие компоненты	L3	Нагрузки представляют незначительный риск для жизни и окружающей среды

**А.13.3. Окружающая среда**

Дополнительное руководство отсутствует.

**А.13.4. Нагрузки****А.13.4.1. Применимость**

Дополнительное руководство отсутствует.

**А.13.4.2. Сценарии ледовых нагрузок**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.4.3. Факторы взаимодействия**

Прикладываемый ток (катодной защиты), покрытия с низким коэффициентом трения, другие покрытия, подходящие для использования в ледовых условиях, или ледовый пояс из нержавеющей стали могут использоваться для защиты корпуса от абразивного воздействия или коррозии.

#### **А.13.4.4. Определение ледовых нагрузок**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.4.5. Другие соображения по поводу ледовых нагрузок**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.4.6. Изменения нагрузок**

Дополнительное руководство отсутствует.

### **А.13.5. Целостность корпуса**

#### **А.13.5.1. Принципы проектирования конструкции**

Некоторые правила, применяемые для судов с ледовым подкреплением, включая использование ледокольных механизмов и методов уравнивания нагрузок, более подходят для движущихся судов, чем для стационарных сооружений в форме судна. Стационарные плавучие сооружения не могут уклоняться от экстремальных ледяных образований и обладают ограниченной маневренностью. Поэтому их проектирование должно проводиться с учетом данных факторов.

При проектировании судов, предназначенных для сезонной эксплуатации, необходимо учитывать ледовые нагрузки, которым судно может подвергаться при установке на месторождении и в процессе демобилизации.

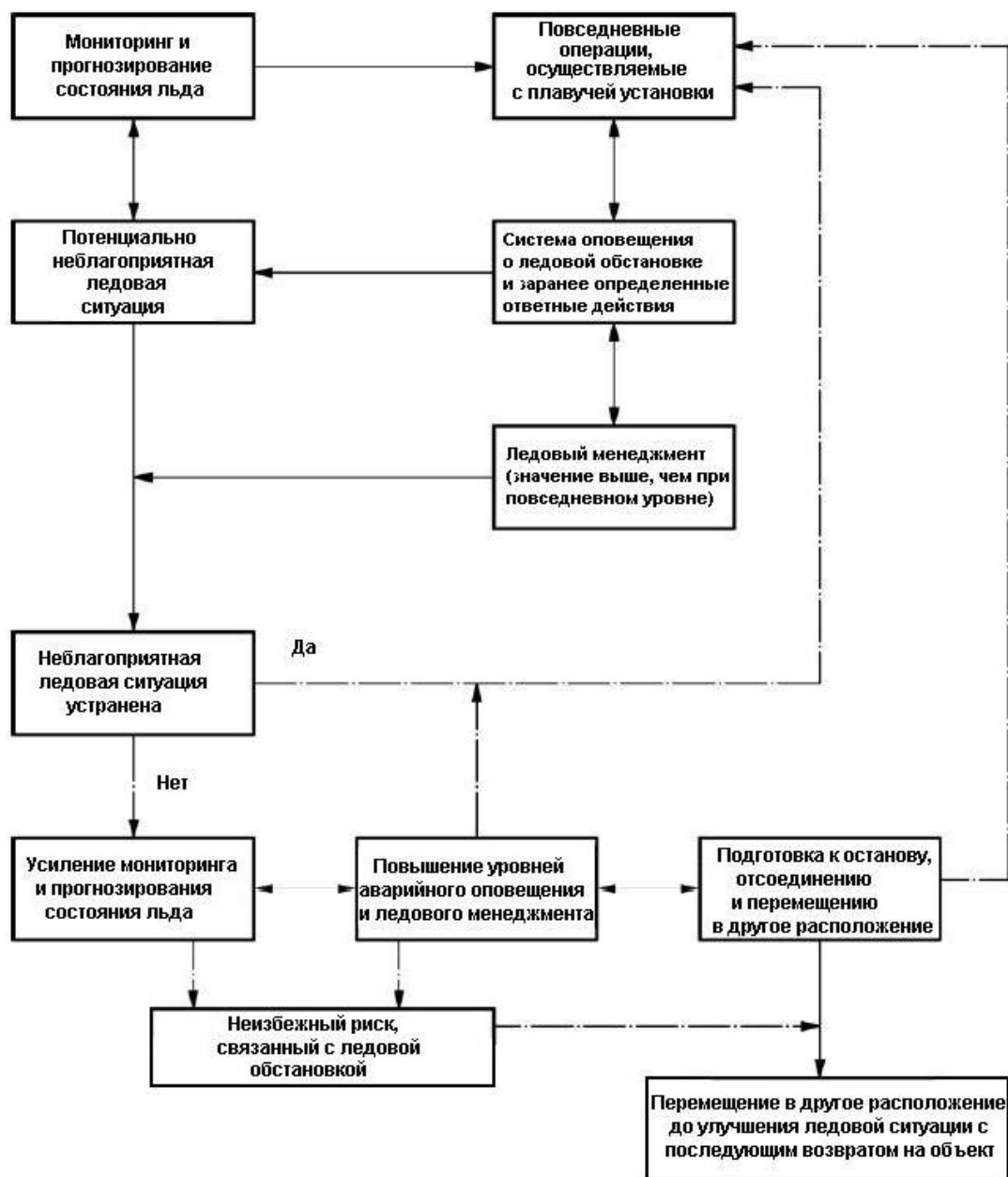


Рисунок А.13.2— Взаимосвязи между различными факторами при эксплуатации плавучих сооружений в ледовых условиях)

#### А.13.5.2. Трещиностойкость материала корпуса

При проектировании зон, подверженных действию низкой температуры воздуха, должны использоваться пластичные материалы, пригодные для эксплуатации в указанных условиях окружающей среды. В случае если проектная рабочая температура оказывается ниже рассчитанной проектной температуры материала, может потребоваться использовать для обшивки и внутренних

элементов, присоединенных к этой обшивке, конструкционные стали, соответствующие более высоким требованиям.

#### **А.13.5.3. Анализ прочности конструкции и проектирование**

Для локальных ледовых нагрузок, максимальная площадь, на которую воздействуют локальные нагрузки, может быть ограничена номинальной площадью контакта, связанной с общей ледовой нагрузкой.

Отдельные нагрузки от глетчерного льда, торосов и других ледяных образований могут привести к разрушению льда и повреждению корпуса судна. В тех случаях, когда возможно значительное повреждение корпуса, необходимо проводить полный расчет на динамическую нагрузку.

#### **А.13.5.4. Положения по конструкции сооружения**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.5.5. Мониторинг состояния**

Дополнительное руководство отсутствует.

### **А.13.6. Остойчивость корпуса**

#### **А.13.6.1. Элементы конструкции**

Общие рекомендации для судов, эксплуатируемых в ледовых условиях, и частные требования к продольным элементам конструкции приведены в [203].

Двухкорпусные суда имеют конструкции с двойной стенкой, двойной стенкой и двойным дном и с одним дном. В некоторых случаях, например, для плавучих бетонных сооружений, для их защиты от повреждений не требуется обязательно применять двойное дно. Решения должны соответствовать уровню ледовых нагрузок.

#### **А.13.6.2. Остойчивость неповрежденного судна**

Рекомендации, касающиеся остойчивости неповрежденных судов арктического класса, приведены в [203]. Несмотря на то, что основное внимание в данном документе уделяется формам судового корпуса, многие положения могут применяться и к другим плавучим сооружениям.

### **А.13.6.3. Остойчивость поврежденного судна**

Конкретные рекомендации, касающиеся остойчивости поврежденного судна для различных форм судового корпуса, также приведены в [203].

### **А.13.7. Системы удержания**

#### **А.13.7.1 Общие положения**

##### **А.13.7.1.1 Виды систем удержания**

Для систем удержания, предназначенных для эксплуатации в арктических и холодных климатических регионах, 13.7.1 обуславливает, что значения годовых вероятностей превышения нагрузок рассчитываются в соответствии с разделом 7. Нагрузки экстремального уровня, определяются в 7.2 с годовой вероятностью  $10^{-2}$ , что соответствует периоду повторения в 100 лет. Данный стандарт налагает дополнительные требования к проектированию при аномальном уровне ледовых нагрузок. Требования раздела 7 применимы ко всем конструкциям систем удержания независимо от того, является ли сооружения мобильным или стационарным. Для положений 13.7.1 допустим период повторения менее 100 лет, если он определяется с использованием оценки рисков с учетом возможных последствий при выходе из строя системы позиционирования.

Плавучее сооружение с соответствующими средствами позиционирования на точке эксплуатации обычно включает систему удержания, физически соединяющую установку с дном моря, или систему динамического позиционирования с подруливающими устройствами, или комбинацию указанных выше систем.

Тип системы удержания зависит от типа плавучего сооружения и выбранного системного решения. Таблица А.13.2 содержит обзор соответствующих систем удержания.



Т а б л и ц а А.13.2. Обзор систем удержания

<i>Тип сооружения</i>	<i>Типовая система сохранения неизменного положения</i>	<i>Альтернативы</i>
Однокорпусное (фиксированная ориентация)	Распределенная якорная система	Ненатянутые или натянутые якорные линии "фиксированные" или "быстро отсоединяемые"
Однокорпусное (вращающееся)	Одноточечная якорная система с турелью	Ненатянутые или натянутые якорные линии "фиксированные" или "быстро отсоединяемые", динамическое позиционирование или "использование подруливающих устройств"
Полупогружные	Распределенная якорная система	Ненатянутые или натянутые якорные линии "фиксированные" или "быстро отсоединяемые", динамическое позиционирование или "использование подруливающих устройств"
Типа Spar	Распределенная якорная система	Полунатянутые, натянутые якорные линии или линии в форме провисающей цепи
С натяжными опорами	Вертикальные, натянутые, удерживающие линии	Фиксированная система, отсоединение невозможно

#### **А. 13.7.1.2 Однокорпусные плавучие сооружения**

Следующие системы позиционирования могут использоваться с однокорпусными плавучими сооружениями:

- а) распределенная якорная система, состоящая из якорных линий, закрепленных в различных местах на установке и направленных в стороны от неё, и обеспечивающая почти постоянную ориентацию установки.
- б) якорная система с турелью, включающая якорные линии, закрепленные на турели с помощью подшипников, и обеспечивающая возможность изменения ориентации установки. Турель может быть отсоединяемого/повторно подсоединяемого типа, что обеспечивает отсоединение якорных линий и райзеров от судна для предотвращения контакта с айсбергами или морским

льдом при превышении определенного уровня нагрузки. В состав системы входят:

- пассивная или активная якорная система, позволяющая установке изменять ориентацию по типу флюгера;
- комбинация пассивной или активной якорной системы и подруливающих устройств для управления ориентацией установки;
- комбинация активной или пассивной якорной системы и подруливающих устройств, предназначенная одновременно для управления ориентацией и снижение нагрузок в якорных линиях;
- только подруливающие устройства для удержания системы в заданном положении.

в) Одноточечная якорная система, которая может состоять из неподвижной турели или одноточечной якорной системы (SALM, SPM, STP и т. д.).

#### **A.13.7.1.3 Полупогружные плавучие сооружения и сооружения типа «буй»**

Полупогружные установки и установки типа «буй» (SPAR, BUOY, SALM) могут использовать следующие системы удержания:

- пассивная или активная распределенная якорная система;
- сочетание пассивной или активной якорной системы и подруливающих устройств для снижения нагрузок на якорные линии;
- только подруливающие устройства для удержания системы в заданном положении.

#### **A.13.7.1.4 Платформы на натяжных связях (TLP)**

Удержание платформ на натяжных связях обеспечивается с помощью вертикальных натянутых элементов якорной системы. Указанные элементы обычно изготавливаются из стали, также применяются конструкции из композитных материалов.

Положения, относящиеся к платформам на натяжных связях, приведены в [202].

#### **А.13.7.1.5 Другие системы, улучшающие эксплуатационные характеристики**

Дополнительно к указанным выше системам, могут применяться различные средства, улучшающие эксплуатационные характеристики или снижающие действие ледовой нагрузки. В качестве примера можно привести системы воздушной смазки и системы водяного орошения, специальные краски для корпуса и дополнительные подруливающие устройства.

Дополнительно, каждая из вышеприведенных якорных систем может быть снабжена удаленными быстро отсоединяемыми якорными системами, облегчающими процесс быстрого освобождения всех якорных линий.

#### **А.13.7.2. Проектирование систем удержания**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.7.3. Отсоединение и повторное соединение**

Отсоединение якорных линий и других соединительных линий может выполняться по отдельности, частями или одновременно. Плавучие установки для добычи, хранения и отгрузки продукции являются примером сооружения, оборудованного устройством, обеспечивающим одновременное отсоединение якорных линий. Таким устройством является отсоединяемая турель, к которой закреплены все якорные линии.

Конструкция платформы на натяжных связях не предполагает возможности отсоединения/повторного соединения.

Подход к проектированию отсоединяемой турели заключается в обеспечении возможности её погружения на безопасную глубину по отношению к осадке айсбергов или киллю торосов.

#### **А.13.7.4. Штатное и аварийное отсоединение**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.7.5. Выход из строя системы удержания**

Дополнительное руководство отсутствует.

## **А.13.8. Механические системы**

### **А.13.8.1. Общие положения**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.8.1.1. Применимость**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.8.1.2. Общие положения для всех систем в арктических и холодных регионах**

Изменение свойств стали вследствие низких температур воздуха увеличивают риск выхода из строя несущих элементов, а также механического оборудования (якорной системы, спасательного, подъемного, технологического оборудования и т. д.).

#### **А.13.8.1.3. Обледенение и нагрузки от снега**

Специальные покрытия могут быть эффективными для снижения обледенения. Такие покрытия имеют короткий срок эксплуатации. Возможно предусмотреть выборочное применение таких покрытий (например, на фронтальной поверхности сооружения), особенно для судов небольшого размера, работающих в областях, где обледенение является серьезной проблемой. Такие покрытия образуют гладкую поверхность, и их не следует использовать в зонах передвижения людей.

### **А.13.8.2. Системы корпуса сооружения**

#### **А.13.8.2.1. Системы забора морской воды и водяного охлаждения**

Объем кингстонных коробок должен составлять около одного кубического метра на каждые 750 кВт мощности двигателя плавучего сооружения, включая мощность дополнительных двигателей, используемых для обслуживания данного сооружения.

Может быть рассмотрено использование других средств для кингстонных коробок и отсеков.

#### **А.13.8.2.2. Балластная система**

Когда емкость находится частично выше ватерлинии корабля в балласте (BWL), использование системы продувки воздухом, вертикальной нагревательной спирали и других систем, препятствующих образованию льда, позволяет

поддерживать отверстия в слое льда в открытом состоянии. Другими системами, подверженными обледенению, являются системы рециркуляции балластной воды или водяного охлаждения. Перед тем как начать закачку балластной воды, необходимо проверить работоспособность индикаторов уровня и возможность закупорки льдом воздухопроводов.

#### **А.13.8.2.3. Оборудование судовых систем**

Применительно к оборудованию судовых систем необходимо учитывать следующие вопросы:

- отводы труб небольшого диаметра, идущие к контрольно-измерительным приборам, могут являться причиной возникновения проблем, связанных с изменением вязкости, замерзанием, образованием гидратов, конденсата и т. п.;
- обледенение внешней поверхности клапанов может вызвать проблемы, связанные с определением их положения;
- ручки и штурвалы устройств с ручным приводом могут быть подвержены обледенению;
- определенные типы датчиков пожарной и газовой сигнализации и методы записи могут зависеть от температуры самих датчиков, окружающей среды, от образования инея на линзах и т. д.
- при низких температурах может уменьшиться скорость срабатывания реле.

В клапанах с пневматическим управлением должен использоваться осушенный воздух для предотвращения образования гидратов и блокирования линий подачи. Для обеспечения заданного времени срабатывания клапанов с гидравлическим управлением особое внимание необходимо уделить параметрам вязкости рабочей жидкости при низких температурах.

#### **А.13.8.2.4. Освещение**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.8.2.5. ОБКВ и системы технического воздуха**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.8.2.6. Пусковые устройства**

Самоходные установки с двигателями, которые запускаются с помощью сжатого воздуха, должны быть снабжены не менее чем двумя ресиверами сжатого воздуха, и общей производительностью, достаточной для подачи воздуха без его пополнения для:

- 12 пусков в случае с плавучей установкой с реверсивными двигателями;
- 6 пусков в случае с плавучей установкой с нереверсивными двигателями.

Для производства сжатого воздуха должно использоваться не менее двух воздушных компрессоров с индивидуальным приводом; компрессоры должны иметь достаточную производительность для полного заполнения пустых ресиверов за период, не превышающий 30 минут.

Производительность наименьшего воздушного компрессора должна составлять не менее  $2/3$  от мощности самого большого воздушного компрессора.

#### **А.13.8.2.7. Движители, подруливающие устройства и рулевые механизмы самоходных плавучих установок**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.13.8.3. Системы отгрузки**

При проектировании и эксплуатации оборудования системы отгрузки следует принять во внимание следующие аспекты:

- защита;
- местные нагреватели;
- свойства гидравлических и пневматических систем при работе в холодных регионах;
- проверка несущих конструктивных элементов и тщательный выбор материалов;
- доступность и надежное функционирование всего оборудования;

- шланги для отгрузки и связанные с ними устройства;
- клапаны быстрого отсоединения и системы аварийного останова;
- операции при плановом и аварийном отсоединении;
- прямые и косвенные ледовые нагрузки.

### **А. 13.9. Эксплуатация**

#### **А.13.9.1. Общая информация**

Специальные вопросы, касающиеся эксплуатации плавучих сооружений в арктических и холодных регионах, включают низкую естественную освещенность, скопление льда и снега на палубе и оборудовании, переохлаждение и обморожение незащищенных участков кожных покровов и перемещение судна в тяжелых ледовых условиях.

#### **А.13.9.2. Рабочие инструкции и действия в аварийных ситуациях**

В зависимости от типа используемого сооружения процесс эксплуатации может включать следующие операции (не ограничиваясь перечисленными ниже):

- коммуникации;
- предотвращение загрязнений, удаление мусора и отходов;
- швартовые операции;
- перемещение грузов;
- смена экипажа;
- бункеровки;
- крановые операции;
- операции на палубе;
- операции в машинном отделении;
- обеспечение остойчивости судна;
- действия при ледовой угрозе.

В зависимости от типа используемого сооружения, действия в аварийной ситуации могут учитывать следующие обстоятельства (не ограничиваясь перечисленным ниже):

- сложные погодные и ледовые условия;

- повреждение судна;
- нарушение энергоснабжения;
- эвакуация судна;
- повреждение якорной системы;
- аварийные ситуации, связанные с балластной системой;
- пожар или взрыв;
- выброс;
- возникновение и обнаружение и утечки газа;
- медицинские экстренные случаи;
- аварии вертолета;
- спасение человека при падении за борт, аварийно-спасательные

операции.

#### **A.13.9.3. Поверхность палуб**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.13.9.4 Контроль повреждений**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.13.9.4. Оборудование и двери**

До начала любой деятельности, технический персонал должен предпринять необходимые меры по обеспечению безопасности при проведении работ в соответствии с рабочими инструкциями. Необходимые действия включают (не ограничиваясь перечисленным ниже):

- проверку реальных погодных условий и оценку возможного охлаждения под действием ветра;
- проверку достаточности освещения во всех рабочих зонах;
- обеспечение необходимого обогрева;
- проверку работы всего оборудования;
- использование необходимой спецодежды;
- использование надежного и полнофункционального коммуникационного оборудования;



- организацию работы с напарником;
- удаление снега и льда.

#### **A.13.9.5. Инспектирование и техническое обслуживание**

Некоторые системы могут быть недоступны в течение определенных периодов года. Должным образом разработанные инженерные решения обеспечивают возможность безопасного выполнения всех необходимых операций в период наличия доступа к оборудованию. Дополнительные сведения об аспектах проектирования плавучих сооружений, связанных с инспектированием и техническим обслуживанием приведены в [204].

Легкодоступные системы, такие как оборудование противопожарной защиты, могут быть быстро осмотрены и проверены. Нормальная частота инспекций оборудования обеспечивает его надлежащую эксплуатацию. Низкие температуры, обледенение или изменение характеристик могут снижать эффективность работы оборудования. В таких обстоятельствах может потребоваться увеличение частоты инспекций.

К некоторому оборудованию, такому как якорная система или подводные компоненты, подсоединенные к плавучей установке, немедленный доступ невозможен. Соблюдение следующих условий может обеспечить надежное функционирование таких систем:

- проектирование с запасом по отношению к критическим элементам;
- полное дублирование систем;
- установка и использование систем и методов дистанционного контроля.

#### **A.13.9.6. Планирование и эксплуатация**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.13.9.7. Требование к планированию процесса управления ледовой обстановкой**

Дополнительное руководство отсутствует.

## **A.14 Подводные добычные системы**

### **A.14.1. Общие положения**

#### **A.14.1.1. Компоненты системы**

В настоящем стандарте рассмотрены ледовые нагрузки на внутримысловые трубопроводы и шлангокабели, требования к которым установлены в стандарте ИСО 13628 (все части) [205]; положения настоящего стандарта не распространяются на трубопроводные системы, попадающие под действие стандарта ИСО 13623 [206].

#### **A.14.1.2. Категории сложности для компонентов систем**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.14.1.3. Общие положения, касающиеся ледовых нагрузок**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.14.1.4. Ремонт**

Дополнительное руководство отсутствует.

### **A.14.2. Влияние ледовых воздействий и состояния морского дна**

#### **A.14.2.1. Взаимодействия над поверхностью морского дна**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.14.2.2. Влияние ледового выпаживания**

##### **A.14.2.2.1. Деформации грунта в результате ледового выпаживания**

В результате ледового выпаживания может происходить существенная горизонтальная и вертикальная деформация прилегающего грунта. Современный уровень знаний в области определения смещений грунта при ледовом выпаживании и понимание его природы в целом пока недостаточен. Наиболее обширные сведения, доступные в открытых источниках, получены в результате испытаний на центрифуге, которые проводились как часть программы PRISE (эксперимент по определению давления при ледовом выпаживании под действием гряды торосов) [207]. Всесторонний анализ воздействий ледяных образований при ледовом выпаживании, приведен в [208].

Определены три зоны взаимодействия системы лёд-грунт-труба (рисунок А.14.1):

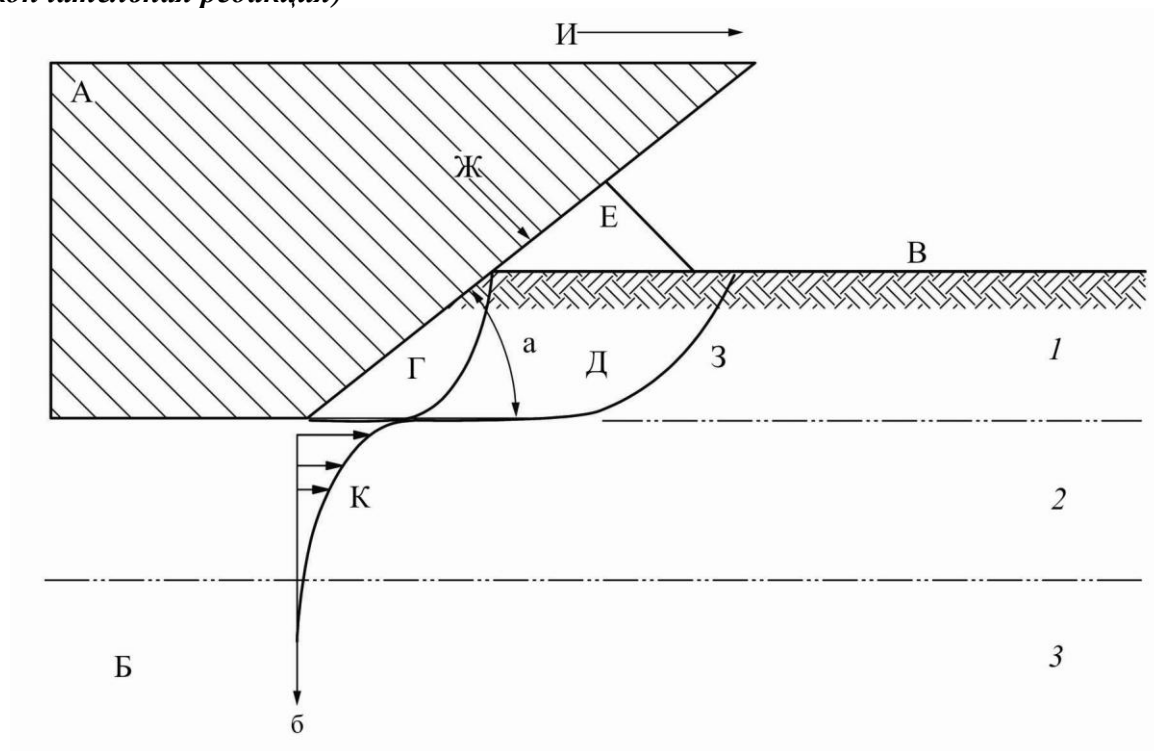
- Зона 1 – слой грунта, перемещенный ледовым образованием;
- Зона 2 – слой грунта, подверженный остаточным деформациям;
- Зона 3 – слой грунта, подверженный упругим деформациям.

#### А.14.2.2.2. Параметры борозд ледового выпаживания

Параметры борозд ледового выпаживания, которые необходимо учитывать при проектировании подводных сооружений, включают:

- размеры борозд ледового выпаживания (длина, глубина, ширина, траектория, форма поперечного сечения, число килей ледового образования);
- размеры пятна контакта (глубина, размеры в плане);
- частота борозд ледового выпаживания (изменение по годам и сезонам, изменение по площади, изменение по направлениям, доля поврежденного морского дна, географическое расположение, зависимость от глубины воды и т. д.);
- изменение уровня морского дна вблизи борозд ледового выпаживания, иногда называемое отвалом грунта
- параметры взаимодействия льда с грунтом (наклон поверхности контакта, т. е. угол атаки или передний угол, давление льда, воспринимаемое грунтом, смещение грунта ниже борозды экзарации).

Во многих случаях требуется использовать не просто средние или экстремальные значения приведенных параметров. Часто оказывается необходимым применение полных распределений вероятностей или распределений суммарной вероятности. Благодаря использованию многолучевого гидролокатора, в настоящее время возможно получение данных об изменении параметров ледяных образований по ширине и глубине, что может оказаться полезным в определенных случаях. Например, форма поперечного сечения может влиять на величину деформаций грунта под бороздами экзарации.



- А – ледяной киль
- Б – грунт
- В – поверхность морского дна
- Г – клин упругого грунта
- Д – клин пассивного грунта
- Е – передний отвал пассивного грунта
- Ж –  $F$  – направление ледовой нагрузки
- З – поверхность скольжения в грунте
- И – направление движения льда
- К – профиль перемещения деформации пропахивания
- 1 – зона 1
- 2 – зона 2
- 3 – зона 3
- б –  $z$  – направление вниз от ледового кия
- а –  $\alpha_k$  – угол атаки кия

Рисунок А.14.1. Перемещение грунта в процессе ледового выпаживания [209, 210]

В настоящее время предпочтительным является непосредственное измерение указанных выше параметров при исследовании борозд экзарации, но это не всегда возможно. В некоторых случаях выводы делаются на основании математических и

физических моделей, соответствующее руководство содержится в А.14.2.2.4 и А.14.2.2.5.

### **А.14.2.2.3. Измерения борозды экзарации**

Традиционно, исследования борозд экзарации были основаны на последовательных линейных замерах, но в настоящее время многие исследования основаны на перекрывающихся замерах, что обеспечивает получение трехмерной топографии морского дна.

Обычно исследования проводятся для получения следующих данных:

- размеров борозды экзарации (методы воспроизведения изображения);
- частоты расположения борозд (повторные исследования, идентификация новых деталей, заполнение или эрозия борозд экзарации);
- определение процессов, связанных ледовым выпаживанием.

Считается, что повторные исследования вдоль одного направления или на одной и той же площади являются наиболее надежным методом определения частоты образования новых борозд экзарации. Так как характеристики борозд могут варьироваться от года к году, исследования должны проводиться в течение нескольких лет. Когда это возможно, должна использоваться статистика ледовых выпаживаний для площадки, расположенной в непосредственной близости от подводной установки.

Для оценки параметров борозд экзарации должны разрабатываться специальные исследования. Исследования, предназначенные для определения батиметрических и других параметров, обычно не подходят для изучения борозд экзарации. Для исследования борозд экзарации используют следующие инструменты:

- многолучевой гидролокатор (изображение);
- гидролокатор бокового обзора (изображение);
- эхолот (толщина приповерхностного слоя морского дна);
- гидролокатор нижнего профилирования (характеристики грунта, геометрия борозд экзарации).

В случае необходимости исследования с применением гидролокаторов могут быть дополнены исследованием проб морского дна или непосредственным наблюдением.

С учетом влияния волновой эрозии и возможного заполнения борозд экзарации, исследования борозд следует проводить весной и ранним летом, как только море очистится ото льда. Быстрое заполнение борозд может иметь место для глубоких узких борозд в грунтах с определенными параметрами. Этот эффект следует учитывать при проектировании глубины погружения в грунт (потенциально с помощью анализа чувствительности).

При интерпретации данных исследования морского дна необходимо решать следующие задачи:

- идентификация борозды экзарации (распознавание на фоне других борозд, выявление борозд, возникших не вследствие экзарации, особенно для условий эрозии и обратного заполнения);
- идентификация новых, старых и реликтовых борозд;
- разрешение, погрешность и точность измерительных устройств;
- точность методов исследования;
- определение параметров в соответствии с установленными протоколами;
- исключение ошибок измерений при обработке значений параметров и распределений, полученных при измерении;
- усечение борозд экзарации на краях изображения;
- действие естественного заполнения на борозду экзарации;
- диапазон глубин моря и типов грунта морского дна.

Рекомендуется экспертная интерпретация полученных данных для обеспечения их качественного обоснования.

Обсуждение техники исследования борозд экзарации от действия айсбергов и протоколы интерпретации данных приведены в [211] и [212]. Протоколы исследований борозд экзарации морскими льдинами рассмотрены в [213].

#### А.14.2.2.4. Математические модели ледового выпаживания

Модели ледового выпаживания могут быть классифицированы в соответствии с их функцией:

- описание распределений параметров (используется часто);
- оценка частоты борозд экзарации (используется редко);
- оценка размеров борозд экзарации (используется периодически);
- описание ледового выпаживания (используется периодически);
- описание деформаций грунта при ледовом выпаживании (используется периодически).

Наиболее распространенные типы моделей включают:

1) Модели распределения глубины выпаживания. Самый распространенный метод для прогнозирования распределения глубины борозд экзарации – использование измерений, сделанных во время полевых исследований. Во многих видах анализа используются значения для всех глубин выше разрешающей способности оборудования, а не только хвост распределения. Необходимо отметить, что при этом подразумевается, что для экстремальных и аномальных борозд выпаживания применимо то же распределение глубин, что и для остальных борозд. Чаще всего для описания глубин борозд выпаживания используется экспоненциальное распределение. Однако наиболее подходящее распределение вероятностей должно быть получено на основе индивидуального изучения данных. Когда данных недостаточно, может использоваться экспоненциальное распределение с учетом соответствующего уровня неопределенности. Особое внимание должно уделяться использованию усеченных распределений, когда данные ограничены разрешающей способностью системы. При экстраполяции распределения глубины борозд выпаживания на основе ограниченных данных следует принять во внимание физические ограничения, обсуждение которых приводится в А.14.2.2.6.

2) Модели частоты расположения борозд. Было проведено феноменологическое моделирование с использованием информации относительно

батиметрии, геотехнических и метеорологических условий для Охотского моря [214] и другие регионов [215, 216, 217], а также для береговой линии, где дрейф льдов, вызванный приливами, очень значителен [218]. Требуемые исходные данные для этого типа моделирования включают:

- скорость и направление дрейфа льда и/или течений и ветров;
- данные батиметрии;
- параметры дрейфующих ледяных образований (включая массу);
- высоту паруса и/или глубину киля ледового образования;
- сведения о локальной геометрии, например, расстоянии между соседними килями, а также сведений о любых ограничениях воздействия, в результате действия таких факторов, как:
  - наличие нескольких килей у одного ледового поля, в результате чего пропахивание осуществляется только некоторыми из них;
  - влияния локальной батиметрии и береговой линии, которые могут, например, препятствовать воздействию килей, имеющих осадку более некоторого значения и/или дрейфующих с определенных направлений.

3) Кинетическая модель и модель движущей силы. Эти модели обычно используются в условиях, когда величина борозды экзарации ограничена кинетической энергией ледового образования или его движущей силой. Модели, разработанные для анализа борозд выпаживания при ограниченной кинетической энергии, приравнивают кинетическую энергию движущегося ледового образования выполненной работе. Ранние попытки моделирования и получения соответствующих оценок приведены в [219] и [220]. В этих работах проводится оценка указанных моделей с использованием данных о бороздах выпаживания айсбергов, собранных на основании наблюдений в районе восточного побережья Канады. Другие сведения о численном моделировании приведены в [210], [221] и [214]. Имеющиеся модели различаются по следующим характеристикам:

- методам рассеивания энергии;
- методам, использованным для расчета сопротивления грунта;



- углом взаимодействия льда и морского дна;
- введением в модель вертикального перемещения и вращения ледяных образований.

Выбор наиболее подходящей модели зависит от особенностей каждого отдельного случая.

Модели, отличные от перечисленных выше, могут использоваться в качестве вспомогательных при интерпретации и экстраполяции данных о бороздах экзарации. В качестве примеров можно привести модели заполнения борозд и модели физических ограничений борозд выпахивания.

Необходимо должным образом учитывать неопределенности во всех моделях и их параметрах.

#### А.14.2.2.5. Физические модели ледового выпахивания

Для более глубокого понимания процессов образования борозд экзарации был разработан ряд физических моделей, которые включают:

- а) испытание в центрифуге в уменьшенном масштабе. Наиболее обширные испытания на центрифуге были проведены в рамках программы PRISE (см. А.14.2.2.1), хотя было выполнено и несколько других исследований [222].
- б) Испытания в бассейнах. Сведения о соответствующих испытаниях в уменьшенном масштабе приведены в [223], [224], [225], [226], [227], [228] и [229].
- в) Результаты крупномасштабных испытаний [например, 230], все эти результаты являются частной собственностью.
- г) Полевые испытания. Соответствующие крупномасштабные испытания были проведены около Шпицбергена [231, 232, 233].

#### А.14.2.2.6. Ограничения на распределение параметров ледового выпахивания

Многие факторы и процессы могут ограничить размеры борозды экзарации на морском дне. Потенциальные ограничения включают в себя следующие факторы.

- 1) Движущие силы. Движущие силы, обусловленные природными условиями, и способность ледового покрытия передавать их, могут ограничивать длину и ширину

борозды экзарации. Это наиболее применимо в случае, когда киль ледового образования (обычно являющейся частью ледового поля или поля торосов) движется вместе с дрейфующим льдом. В этом случае кинетическая энергия очень велика, фактически безгранична. Потенциальными ограничениями движущей силы являются:

- возможность разрушения ровного льда, включающего ледовое образование с килем;
- возможность вращения ровного льда или поля торосов;
- возможность образования торосов и наслоений льда в любом месте дрейфующего льда.

2) Кинетическая энергия. Кинетическая энергия массы дрейфующего льда может также ограничить длину и глубину борозды экзарации. Это ограничение наиболее применимо в случаях, когда изолированное ледовое образование (например, торос внутри ледового поля или айсберга) свободно погружается в дно моря. Анализ взаимодействия данного типа должен включать наиболее существенные, зависящих от местных условий потери энергии, которые могут включать:

- работу в отношении грунта по всей длине борозды выпаживания, которая включает следующие деформации грунта:
  - а) перед килем;
  - б) сдвиг грунта в сторону перед килем
  - в) действие на грунт под килем
- поднятие и/или качка ледового образования;
- работа, вследствие разрушения ледового образования (например, многолетнего или однолетнего тороса в ровном льде).

3) Изменение кия ледового образования: Абразивное или механическое разрушение кия ледового образования может ограничить глубину борозды экзарации. Наблюдения за айсбергами на восточном побережье Канады показали, что при ледовом выпаживании происходило разрушение ледового кия [234]. Несмотря на отсутствие специальные исследования борозд экзарации от однолетних или

многолетних торосов, принято считать, что для различных типов ледовых килей имеет место процесс таяния.

4)Твердые грунты. Когда прочность кия ледового образования меньше прочности грунта морского дна, возможно значительное ограничение глубины борозды, это имеет место, главным образом, когда однолетние торосы сталкиваются с относительно твердым материалом морского дна [235].

5)География. Локальная геометрия береговой линии или залива (например, для отгрузочного трубопровода) или батиметрия (например, при наличии фундаментного бруса) могут налагать ограничения в отношении размера, числа или направлений дрейфа ледяных образований, которые могут проникнуть в зону. Ледяные образования могут застрять, закрепившись на дне, предотвращая дальнейшее движение льда.

#### **А.14.2.3. Воронки размыва дна**

На формирование воронок размыва в значительной степени влияют параметры грунта дна. Твердая пластичная глина и гравий устойчивы к эрозии, в то время, как ил, песок и мягкая глина легко размываются. Характеристики грунта должны быть учтены при анализе.

Проведение изысканий в местах образования воронок размыва, дополненные сведениями о связанных с этим процессом факторах, обеспечивает получение оценки количества промывов и распределение вероятности их протяженности.

#### **А.14.2.4 Многолетнемерзлые грунты**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.14.2.5. Опасные геологические процессы**

Дополнительное руководство отсутствует.

### **А.14.3. Воздействия на подводные добычные системы**

#### **А.14.3.1. Общие требования**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.14.3.2. Конструкции для защиты от ледового воздействия**

Ограничения силы воздействия, смещение и вращение кия ледового образования, может использоваться для снижения расчетных ледовых нагрузок на

защищаемую конструкцию. В качестве примеров можно привести неконсолидированные части килей однолетних торосов и килевая качка айсбергов.

#### **А.14.3.3. Котлованы**

Котлованы были использованы для защиты подводных опорных плит от воздействия айсбергов при разработке проектов Terra Nova и White Rose на шельфе Ньюфаундленда с использованием подводного оборудования. Размеры и форма котлована должны определяться с учетом необходимости обеспечения защиты от действия айсбергов, доступа дистанционно-управляемых подводных аппаратов, подсоединения трубопроводов и обеспечения устойчивости боковых стенок котлована. Ключевым моментом в этих проектах являлась глубина котлована и, соответственно, расстояние от верха подводного оборудования до морского дна. Частота взаимодействий определялась на основе частоты попадания килей айсберга в котлован и соответствующей вероятности контакта килей с подводным оборудованием. Стратегия проектирования состояла в достижении значения частоты воздействия уровня ниже  $10^{-4}$ . С некоторыми общими аспектами этой проблемы можно ознакомиться в [236].

#### **А.14.3.4. Райзеры и системы загрузки/отгрузки**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.14.3.5. Внутрипромысловые трубопроводы и шлангокабели**

А.14.3.5.1. Защита внутрипромысловых трубопроводов и шлангокабелей от ледового выпаживания

Если имеются надежные прогнозы потенциальной возможности ледового выпаживания, своевременная остановка добычи и промывка трубопроводов, может снизить риск до приемлемого уровня. В качестве примера можно привести подводные системы проектов Terra Nova и White Rose в районе Большой Ньюфаундлендской балки. В случаях, когда вероятность контакта льда с морским дном меньше уровня ELIE (расчетная ситуация с ледовым воздействием экстремального уровня) и ALIE (расчетная ситуация с ледовым воздействием аномального уровня), не требуется проводить проверку трубопроводов и шлангокабелей на соответствующие комбинации нагрузок.

В связных или скальных грунтах могут прокладываться траншеи с вертикальными стенками, что позволит минимизировать количество извлекаемой породы. В случае гранулированных грунтов возможно использование только траншей с пологими откосами. Траншею можно оставить открытой или засыпать. При проектировании траншеи необходимо оценивать давление грунта при ледовом выпахивании, а также последствия прямого контакта.

Обычно учет деформации изгиба при смещении в поперечном направлении, является основным вопросом при проектировании заглубленных трубопроводов в зонах возможного ледового выпахивания. Другим важным вопросом является деформация трубы под действием передаваемого через грунт давления и непосредственного воздействия килей ледяных образований.

Общепризнано, что заглубленная труба может быть повреждена в результате выпахивания, даже при отсутствии прямого контакта со льдом [237, 238]. В целом, стратегия защиты трубопроводов от килей ледяных образований состоит в исключении возможности непосредственного контакта и обеспечении достаточного заглубления для предотвращения сильных деформаций трубы в следствие движения грунта. На практике заглубление трубопровода необходимо в ледовых условиях, когда глубина воды меньше возможной величины киля ледового образования.

Наиболее широко применяемый метод защиты внутрипромысловых трубопроводов и шлангокабелей от ледового выпахивания состоит в их укладке в траншею на морском дне. Другие методы, такие как укрытие трубопроводов и шлангокабелей бетоном, гравием или камнями, использование пучков трубопроводов, усиление трубы, заякоривание трубы, могут использоваться в сочетании с заглублением для снижения риска повреждений труб в результате ледового выпахивания. Применение указанных методов требует использования специальных процедур анализа.

Подсоединение к платформе и выходы трубопровода на берег требуют особого внимания при проектировании вследствие эрозии морского дна, образования ледовых нагромождений и наличия многолетнемерзлых грунтов.

## А.14.3.5.2. Опыт эксплуатации

Необходимо отметить, что до сих пор в построено небольшое количество трубопроводов в замерзающих акваториях. Поэтому имеется сравнительно небольшой опыт, который может быть использован для целей проектирования. Некоторые из этих проектов перечислены в таблице А.14.1.

## А.14.3.5.3. Стратегия укладки в траншеи в условиях возможного ледового выпаживания

Для внутрипромысловых трубопроводов и шлангокабелей ледовые нагрузки следует рассматривать вместе с действиями, не связанными с наличием льда, такими как опускание и протаскивание якорей, падение предметов, смещение грунта при сейсмических воздействиях, действие судов, коррозия труб и эрозия морского дна. Поскольку внутрипромысловые трубопроводы на шельфе арктических и холодных регионов для защиты от ледовых нагрузок обычно укладывают в траншеи, следует учесть вопросы, связанные с глубиной траншеи и обратной засыпкой, чтобы исключить неустойчивость трубопровода в продольном направлении.

Т а б л и ц а А.14.1 – Опыт эксплуатации трубопроводов в замерзающих акваториях

<i>Расположение</i>	<i>Ссылка</i>	<i>Общее описание</i>
Northstar	[242]	
Пучок трубопроводов, проект Oooguruk на шельфе Аляски в море Бофорта	[243, 244, 245]	Трубопроводы скреплены в пучок, 3-я очередь трубопровода была сдана в эксплуатацию в 2008 г.
Невельский залив между островом Сахалин и материком	[246]	Хотя этот трубопровод эксплуатируется без документально подтвержденных аварий с 1958 г., по нему имеется очень мало количественной информации.
Остров Мелвилл в Канадской Арктике	[247]	Трубопровод Drake F-76 был проложен как демонстрационный проект на шельфе острова Мелвилл в Канадской Арктике. Он эксплуатировался в течение короткого времени в 1978 г. и с тех пор не наблюдается. Соответственно по нему не публиковалось никакой информации.

Окончание таблицы А.14.1

Водозаборная линия на Ная River, Северо-Западные Территории, Канада	[248]	Водозаборная линия на озере Great Slave Lake (Северо-Западные Территории, Канада) была повреждена торосами в 1979 году. Данный трубопровод не был заглублен.
Озеро Эри, Канада	[249, 250]	Несколько газовых трубопроводов проложено в озере Эри. Незаглубленный участок трубопроводов был поврежден льдами.
Примечание – В настоящее время морские трубопроводы эксплуатируются на шельфе острова Сахалин и в Каспийском море. Внутрипромысловые трубопроводы также имеются в проектах Terra Nova и White Rose в районе Большой Ньюфаундлендской балки. Потенциальная опасность ледового выпахивания требует специального рассмотрения для каждого из указанных проектов.		

Проектирование с учетом ледового выпахивания необходимо, если ожидаемая частота воздействия на незаглубленные внутрипромысловые трубопроводы и шлангокабели превышает частоту наступления ELIE или ALIE. Если в процессе эксплуатации проводится очистка внутрипромысловых трубопроводов от углеводородов, что ведет к изменению класса ответственности, необходимо продемонстрировать эффективность таких процедур, а также принять во внимание наличие факторов неопределенности.

Возможные стратегии расчета при определении глубины траншеи включают:

- а) события ELIE или ALIE (в терминах параметров ледового выпахивания), нагрузки, анализ реакции трубы и коэффициенты сопротивления;
- б) использование полностью вероятностного подхода, в котором для достижения заданной надежности реакция трубы рассчитывается на основании суммарных распределений параметров окружающей среды, характеристик трубы и свойств грунта (см. А.7.2.6);
- в) использование множества полувероятностных подходов при проведении промежуточных исследований.

Вариант а) включает выбор, например, расчетной ситуации ледового выпахивания ELIE или ALIE, в сочетании с детерминированным анализом реакции трубы. Поскольку деформации грунта при ледовом выпахивании обычно зависят и от глубины, и от ширины борозды экзарации, вариант с) включает использование

суммарного распределения ключевых параметров выпахивания и проведение определенного числа анализов ответной реакции трубы для репрезентативных диапазонов параметров борозд выпахивания и глубины траншей [209, 248]. Эта стратегия проиллюстрирована на рисунке А.14.2.

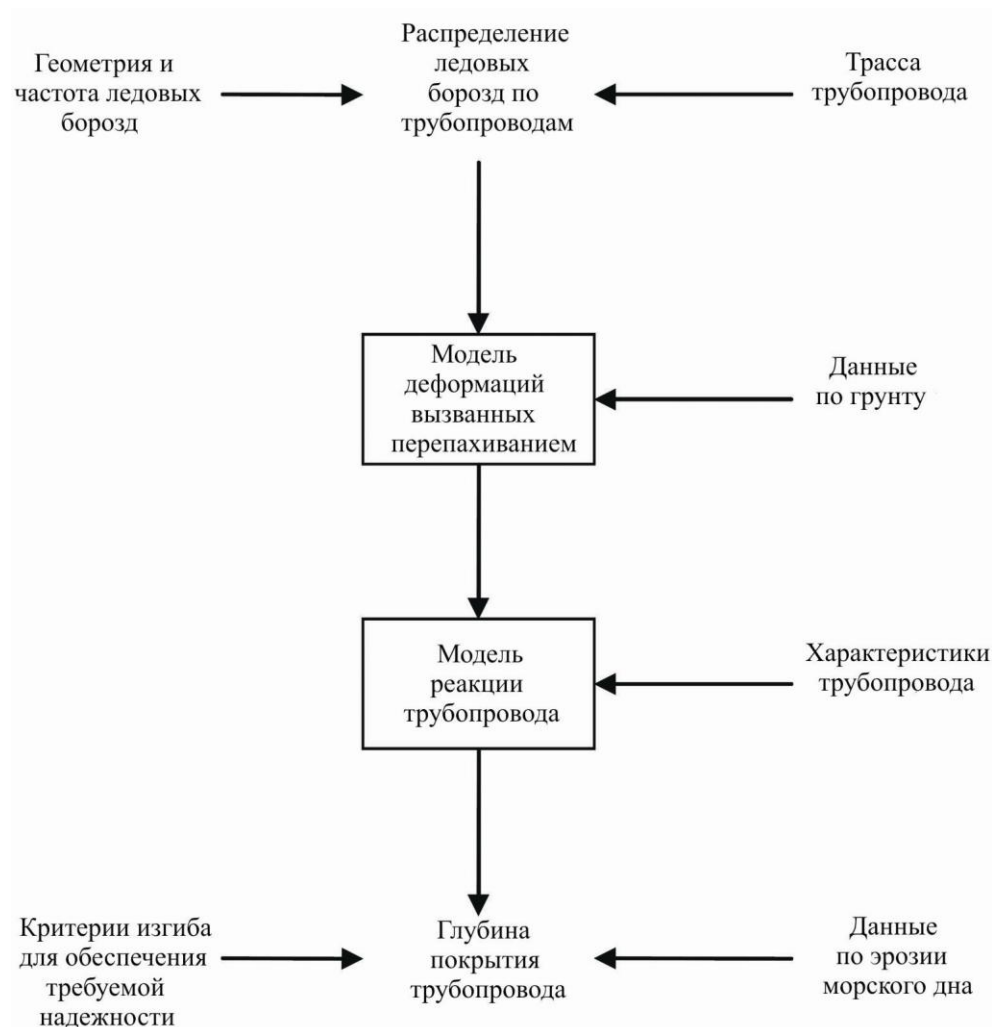


Рисунок А.14.2. Стратегия проектирования морских трубопроводов в зонах ледового выпахивания, основанная на обеспечении необходимой надежности (см. [209])

Ключевой аспект заглубления трубы – определение потенциальных воздействия, приводящих к утечкам углеводородов. Такие воздействия обычно включают непосредственное воздействие льда, растягивающее напряжение, деформации растяжения, смятие или местную потерю устойчивости, образование овальности. Опыт показывает, что для трубопроводов в условиях ледового



выпахивания обычно требуется большая толщина стенки, чем при отсутствии льда, а также что при выборе стали более важным является ее способность выдерживать напряжения, чем высокая прочность.

Применительно к воздействиям грунта и льда необходимо рассмотреть следующие основные вопросы:

- совместное распределение значений глубины и ширины борозды выпаживания, в сочетании с давлением, действующим на грунт для различных глубин укладки труб, и потенциальной формой поперечного сечения борозды экзарации;
- поле деформации грунта под действием ледового выпаживания, которое обычно включает определение горизонтального и вертикального полей смещения (как под килем, так и вокруг него), а также их зависимости от параметров, указанных в предыдущем пункте;
- частоту и направление пересечений трубы бороздами экзарации.

Другой важный аспект при заглублении трубы состоит в использовании соответствующей модели поведения трубы с учетом специфики трубы и проекта траншеи, а также реакции трубы на перемещение грунта. Подходы, используемые для взаимодействия труба/грунт, включают полномасштабные испытания, модельные испытания (включая испытания в центрифуге) и численный анализ (аналитический, нелинейная пружина или метод сплошных сред/конечных элементов).

Прочие факторы, которые должны быть учтены при определении безопасной величины заглубления, включают состояние трубы и траншеи в результате донного переноса, естественное заполнение, наличие многолетнемерзлых грунтов, потеря устойчивости в продольном направлении, напряжение трубы под действием температуры, вес покрытия, сварка и сервисные процедуры в процессе эксплуатации, такие как изменение параметров траншеи.

Дополнительная информация по проектированию заглубления трубопровода в условиях ледового выпаживания приведена в [209] и с [248] по [259].

**А.14.3.5.4. Стратегия заглубления труб в условиях образования воронок размыва**

Последствия формирования воронок размыва могут ощущаться там, где есть повреждения морского дна. Когда размыв достигает трубопровода и глубина эрозии дна превышает глубину траншей, возникает, так называемый, "свободный пролет" – участок провисания трубопровода. Должна быть проведена оценка поведения участка провисания (или участка с частичной опорой) трубы для аномального или экстремального уровня нагрузки, связанной с воронкой размыва. Эта оценка должна учитывать вибрации, вызванные образованием водоворотов при формировании воронки, и последующие гидродинамические и ледовые нагрузки.

Для воронок размыва критическими параметрами, определяющими риск повреждения трубопровода, являются максимальный размер в горизонтальной плоскости на морском дне, угол наклона стенки воронки и глубина размыва. В случае протяженного размыва необходимо учитывать его ориентацию, а также длину, уклон стенок и глубину.

**А.14.3.6. Устойчивость к ледовым нагрузкам**

Дополнительное руководство отсутствует.

**А.14.4. Проектирование с учетом сейсмических факторов**

Дополнительное руководство отсутствует.

**А.14.5. Снижение риска**

Дополнительное руководство отсутствует.

**А.15 Верхнее строение**

**А.15.1 Общие положения**

**А.15.1.1 Проектирование оборудования верхнего строения**

**А.15.1.1.1 Общие положения**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.1.1.2 Температура окружающей среды**

Углеродистая сталь обычно имеет нижнюю границу рабочей температуры – минус 29°C, в то время как низкотемпературная углеродистая сталь (LTCS) может использоваться до температур минус 66°C. Поэтому следует избегать применения углеродистой стали в большинстве арктических регионов и в регионах с низкой температурой, а если температура окружающей среды не опускается ниже минус 66°C, то может применяться низкотемпературная углеродистая сталь

#### **A.15.1.1.3 Действие на верхнее строение морского льда и айсбергов**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.1.1.4 Накопление льда**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.1.2 Положения по эксплуатации**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.1.3 Основные принципы обеспечения расходными материалами и запасными частями**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2 Требования к проектированию и эксплуатации**

##### **A.15.2.1 Общие положения**

Дополнительное руководство отсутствует.

##### **A.15.2.2 Система ОВКВ и инженерные системы**

Дополнительное руководство отсутствует.

##### **A.15.2.3 Архитектурные решения**

Дополнительное руководство отсутствует.

##### **A.15.2.4 Электрооборудование**

Примером кабеля, рассчитанного на использование на морских платформах в климатических условиях с низкими температурами, может являться тонкожильный, обладающий высокой гибкостью кабель IEEE 45, тип P.

Низкая температура снижает отдачу аккумулятора. Необходимо поддерживать температуру аккумулятора не ниже 18°C, чтобы периодичность его повторной зарядки не выходила за рамки целесообразных интервалов времени.

#### **A.15.2.5 Электрические изоляторы**

Электрические изоляторы используются для разделения разнородных металлов, таких как углеродистая и нержавеющая сталь или алюминий и углеродистая сталь.

#### **A.15.2.6 КИП и аппаратура управления**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2.7 Механическое оборудование**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2.8 Трубная обвязка**

##### **A.15.2.8.1 Испытание и инспекция труб**

Трубы, подвергающиеся одновременному воздействию низких температур и максимального рабочего давления, должны пройти испытание по Шарпи в соответствии со стандартом ИСО 15649 [260].

##### **A.15.2.8.2 Обогрев и изоляция труб**

Компоненты системы электрообогрева и методы монтажа в классифицированных зонах должны соответствовать [261], [262] или другому эквивалентному стандарту.

##### **A.15.2.8.3 Циркуляция жидкостей**

Дополнительное руководство отсутствует.

##### **A.15.2.8.4 Дренирование и продувка системы**

Дополнительное руководство отсутствует.

##### **A.15.2.8.5 Палубные шпигаты**

Обычно для этого модуля предусматривается изоляция в пределах 750 мм.

#### **A.15.2.9 Безопасность**

##### **A.15.2.9.1 Общая информация**

Дополнительное руководство отсутствует.

##### **A.15.2.9.2 Защита от взрыва**

Герметичные отсеки обычно конструктивно изолированы и имеют большое количество вентиляционных каналов. Даже при правильном планировании

помещений и использовании легкобрасываемых панелей в герметичных отсеках могут возникнуть определенные проблемы, обычно не встречающиеся в открытых отсеках с естественной вентиляцией. Это, в свою очередь, может привести к тому, что расчетное избыточное давление взрыва окажется выше значений, обычно принимаемых для сооружений в неарктических условиях. Следует учитывать риск обледенения легкобрасываемых панелей.

#### **A.15.2.9.3 Противопожарная защита**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2.9.4 Человеческий фактор/эргономика**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2.9.5 Аварийный душ и средства для промывки глаз**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2.9.6 Раздевалки и кладовые**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **A.15.2.9.7 Аварийно-спасательное оборудование**

Дополнительное руководство отсутствует.

### **A.15.2.10 Система сброса и факельная установка**

Некоторые жидкости становятся вязкими при значительном охлаждении, и это необходимо учитывать при выборе типоразмера клапанов сброса давления. По мере увеличения вязкости жидкости увеличивается требуемый типоразмер клапанов сброса давления и падение давления на впускных/выпускных трубопроводах при заданном расходе.

Возможно возникновение неисправности вследствие замерзания жидкости в трубе после клапана сброса давления (т.е. дождь или снег, попадают внутрь выпускной трубы и впоследствии замерзают). Клапаны сброса давления имеют выпускное отверстие в крышке, которое всегда остается открытым, если клапан сброса давления работает в штатном режиме. В качестве возможной меры предосторожности можно установить снаружи выпускного отверстия небольшое отводящее колено, направленное вниз для минимизации вероятности попадания в клапан снега или дождя. Наружное колено должно быть установлено таким образом,

чтобы удаление газа и/или жидкостей из клапана сброса давления не создавало угрозу безопасности персонала.

Давление срабатывания предохранительных мембран, в особенности изготовленных из нержавеющей стали, может существенно зависеть от температуры. Давление срабатывания предохранительных мембран следует выбирать с учетом суточных и сезонных колебаний температуры окружающей среды. Возможно, потребуется установить более низкое давление срабатывания предохранительной мембраны с учетом возможных низких температур. Выбор более низкого давления срабатывания может привести к преждевременному разрушению мембраны в летнее время, при эксплуатации в режиме, близком к давлению разрыва. В некоторых случаях может потребоваться изоляция и обогрев держателя предохранительной мембраны.

Сепаратор факельного коллектора должен быть изолирован и оборудован системой обогрева. Необходимо рассмотреть возможность установки системы обогрева внутри сепаратора факельного коллектора и в гидрозатворах. При использовании дренажных отверстий можно избежать утечки углеводородов, устанавливая наклон системы в сторону факельного коллектора и сепаратора.

#### **A.15.2.11 Хранение**

Вода внутри закрытого шарового клапана на резервуаре для хранения продукции расширяется при замерзании. Это может привести к выходу из строя трубопровода и/или клапанов. В результате разрушения может произойти выброс добываемых жидкостей в окружающую среду.

Система сброса резервуара должна быть спроектирована таким образом, чтобы избежать возможного замерзания накопленной воды. Для предотвращения накопления воды, которое может привести к заклиниванию клапана при замерзании, должны быть предусмотрены клапаны сброса давления в резервуаре с давлением, близким к атмосферному, и система защиты пониженного давления.

#### **A.15.2.12 Нагрузки на конструкцию**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.15.2.13 Обеспечение снабжения и перемещение грузов**

Дополнительное руководство отсутствует.

#### **А.15.2.14 Рабочие условия**

Дополнительное руководство отсутствует.

### **А.15.3 Проектирование с учетом сейсмических воздействий**

#### **А.15.3.1 Общие положения**

Из-за потенциального воздействия вибрации, вызванной ледовыми нагрузками, конструкции в арктических и холодных регионах обычно обладают большей жесткостью, чем соответствующие конструкции в незамерзающих акваториях. При проектировании таких конструкций часто необходимо отдельно рассматривать сейсмические воздействия.

#### **А.15.3.2 Проектирование верхнего строения с учетом сейсмических воздействий**

Сейсмические нагрузки на конструкцию верхнего строения можно рассчитать с использованием:

- совместного анализа, при котором нагрузки на конструкцию верхнего строения могут быть вычислены путем анализа модели, включающей верхнее строение вместе с опорным блоком (более точный метод, чем анализ независимых конструкций);
- независимого анализа, при котором конструкцию верхнего строения можно смоделировать отдельно от опорного блока, используя соответствующие граничные условия для моделирования взаимодействия с опорным блоком; сейсмическая нагрузка, воздействующая на верхнее строение, основана на анализе опорного блока.

Динамическую связь между верхним строением и опорным блоком можно оценить с помощью метода отбора, как описано в материалах [263].

Воздействие на конструкцию сейсмических нагрузок, вычисленных с помощью совместного или независимого анализа, можно оценить с помощью следующих методов:

– Динамический анализ. Нагрузки на верхнее строение, полученные с помощью совместного или независимого анализа, можно рассчитать путем анализа спектра реакции, а также линейного или нелинейного анализа временной диаграммы. Этот метод более точен по сравнению со статическим анализом эквивалентных напряжений.

– Статический анализ эквивалентных напряжений. Верхнее строение можно проанализировать путем статического анализа с приложением соответствующих сейсмических ускорений к массе верхнего строения. Значения сейсмических ускорений следует взять из результатов анализа опорного блока. Должно быть учтено возможное динамическое усиление.

Соединения элементов конструкций необходимо проектировать в соответствии с положениями стандарта [264] или аналогичного свода правил.

#### **А.15.3.3 Проектирование оборудования и опор верхнего строения с учетом сейсмических воздействий**

Эти положения применимы к проектированию всех конструктивных элементов и соединений, необходимых для переноса горизонтальных и вертикальных нагрузок от центра массы оборудования к его креплению.

В данном разделе используются следующие определения.

– Повреждение конструкции - это повреждение любого несущего нагрузку компонента оборудования, повреждение крепления или любого соединения. Типовыми примерами повреждения конструкции являются изгиб или деформация опорных рам, повреждение сварных швов в местах крепления или соединительной арматуры.

– Механическое повреждение - это любое смещение или разделение компонентов. Примеры механического повреждения включают отсоединение монтажных плат и модулей, открытые двери, ящика и крышки.

Воздействия на оборудование, дополнительные приспособления и распределенные системы должны быть рассчитаны с использованием одного из следующих методов:



– Статический анализ эквивалентных напряжений. В статическом анализе нагрузки вычисляются путем приложения соответствующего ускорения к приведенным массам.

– Динамический анализ. Нагрузки вычисляются непосредственно в процессе динамического анализа подсистемы с использованием спектра реакции или методов временных диаграмм. Динамический анализ считается более подходящим для гибкого оборудования.

Критические системы, включая связанное с ними оборудование и компоненты, это системы, которые должны незамедлительно активироваться при землетрясении в целях обеспечения безопасности персонала, защиты окружающей среды или для предотвращения финансовых потерь, как определено собственником или регулирующим органом. В качестве примера можно привести системы противопожарной защиты, продувки оборудования, аварийного энергообеспечения, отдельные элементы ОВКВ, систему аварийного останова, пожарной и газовой сигнализации и т.д. Они также должны быть активированы после сейсмического воздействия аномального уровня (ALE) для восстановления функциональных возможностей системы. Критические системы должны быть определены с помощью оценки систематического риска.

Вместо проведения расчета прочности конструкции можно продемонстрировать достаточную сейсмостойкость критического оборудования путем анализа, испытаний на вибростенде или с использованием фактических данных о землетрясении за прошлый период.

У некоторых деталей опор ухудшаются рабочие характеристики при толчках в условиях землетрясения. К таким деталям относятся С-образные трубины и крепления с прижимными пластинами.

Нельзя располагать подряд несколько опор такого вида или использовать их в такой ситуации, когда повреждение одной опоры может вызвать нарушение целостности системы.

Перед вводом в эксплуатацию верхнее строение должно быть проверено опытными инженерами для подтверждения сейсмостойкости конструкции. Инспекторы должны сосредоточить свое внимание на проблемных областях, состояние которых сложно оценить только с использованием чертежей. Основное внимание должно уделяться неравномерным смещениям и конструктивным деталям. Должны быть исследованы потенциальные сейсмические взаимодействия. Инспекция также должна включать осмотр трубной обвязки, например, трубопроводов малого диаметра или линий воздуха КИП, которые могут быть повреждены во время землетрясения.

Часть оборудования состоит из узлов механических и электрических деталей, которые обычно изготовлены промышленным способом производства типовых или идентичных изделий. Такое оборудование можно проектировать эмпирическими методами с учетом функциональных и транспортных нагрузок и обеспечить его прочность в условиях сильных сотрясений без значительной потери функциональных возможностей. В общем случае сейсмостойкое проектирование данного оборудования не требуется, за исключением его опор и креплений.

Нет необходимости учитывать сейсмические нагрузки при проектировании всех компонентов или деталей оборудования, не имеющих отношения к критическим системам, таких как валы, подшипники, переключатели, шестерни и другие аналогичные изделия.

#### **А.15.3.4 Проектирование сопряжений компонентов с учетом сейсмических воздействий**

Проверка сопряжений необходима, так как конструкции и системы могут иметь разные структурные динамические свойства и по-разному реагировать на землетрясения.

Трубопроводы и выкидные линии в арктических и холодных регионах могут быть заглублены в грунт в местах технологических стыков с целью защиты от ледового выпахивания. В процессе проектирования с учетом сейсмических воздействий необходимо учитывать различия в смещении заглубленных трубопроводов и подсоединяемых конструкции.

### **А.15.3.5 Системы пассивной защиты для проектирования с учетом сейсмических воздействий**

Система сейсмической пассивной защиты - это специальная конструктивная подсистема, включенная в конструкцию с целью снижения её реакции на сейсмические толчки. Система пассивной защиты обычно состоит из специальной компоновки, соединенной с устройством, изолирующим и/или рассеивающим энергию. Термин «пассивная» означает отсутствие активного управления для изменения реакции устройства.

Цель систем пассивной защиты - снижение реакции конструкции на сейсмические толчки. Обычно система пассивной защиты применяется в ситуациях, когда использование традиционной несущей каркасной конструкции экономически неэффективно при обеспечении требований воздействия ALE.

Система сейсмической изоляции создает изолирующее сопряжение между двумя частями конструкции, эффективно разъединяет их, и таким образом, уменьшает передачу сейсмических толчков от нижней части конструкции к верхней. Изолирующая система может также включать ограничитель ветровых нагрузок, устройства для рассеивания энергии и/или систему ограничения смещений.

Система, демпфирующая энергию сейсмического воздействия, увеличивает способность конструкции конвертировать кинетическую энергию, вызванную сейсмическим воздействием, в другие формы энергии (в основном в тепловую). Это достигается путем введения в конструкцию специальных демпфирующих устройств, которые рассеивают энергию за счет движения всех частей устройства относительно друг друга.

В редких случаях система пассивной защиты также предназначена для снижения реакции на максимальное расчетное землетрясение (ELE) или для защиты оборудования и систем, являющихся критически важными для функционирования объекта после аварии.

Для систем пассивной защиты на арктических морских сооружениях необходимо учитывать следующие факторы:

- а) Низкие температуры. При применении систем пассивной защиты на арктических морских сооружениях следует учитывать влияние на их работу низких проектных температур (EL и AL). Например, некоторые компоненты, такие как вязкостный демпфер или опоры скользящего типа доказали свою надежность в условиях замерзания, в то время как другие системы, такие как резиновые опоры, должны быть защищены от низких температур.
- б) Ветровая нагрузка. Конструкции, оборудованные системой сейсмической изоляции, должны выдерживать проектные ветровые нагрузки на всех уровнях выше изолирующего сопряжения. Если это необходимо, следует предусмотреть систему ограничения ветровых нагрузок для снижения бокового смещения в изолирующем сопряжении.
- в) Волновая и ледовая нагрузка. Необходимо учесть динамическую реакцию конструкции, включающей систему сейсмической изоляции, на волновую и ледовую нагрузку. Система изоляции не должна оказывать нежелательное влияние на реакцию конструкции на эти нагрузки.
- г) Восстанавливающее усилие. Восстанавливающее усилие в системе сейсмической изоляции должно быть таким, чтобы поперечная сила, приводящая к 100% боковому смещению, превышала поперечную силу, приводящую к 50% боковому смещению, на величину не менее 2,5% веса изолируемой конструкции.
- д) Ограничение смещения. Система изоляции должна быть спроектирована таким образом, чтобы ограничивать поперечное смещение величиной меньше значения проектного смещения при ALE. Если такое ограничивающее требование устанавливается, оно должно быть явным образом учтено при анализе и проектировании, как системы изоляции, так и конструкций ниже и выше изолирующего сопряжения.
- е) Устойчивость в условиях вертикальной нагрузки. Конструкция каждого компонента системы изоляции должна сохранять устойчивость при максимальном и минимальном вертикальном воздействии в условиях проектного смещения.

- ж) Опрокидывание конструкции на изолирующем сопряжении. Сопротивление общему опрокидыванию конструкции на изолирующем сопряжении должно соответствовать требованиям особого предельного состояния (ALS) для установленных сочетаний нагрузок. При проектировании должны быть исследованы все события с возможными гравитационными и сейсмическими воздействиями.
- з) Подъем изолирующего устройства. Допускается подъем отдельных компонентов изолирующего устройства, если возникающие при этом прогибы не приведут к перенапряжению или потери стабильности элементов изолирующего устройства или других компонентов конструкции.
- и) Пространство между элементами конструкции. Минимальное расстояние между сейсмически изолированной конструкцией и неподвижными элементами вокруг изолирующего сопряжения должно быть больше проектного смещения, возможно отступление от указанного требования при наличии подтверждения сохранения рабочих характеристик в случае возникновения соударений.
- к) Компоненты, пересекающие изолирующее сопряжение. Конструкция элементов сейсмически изолированного сооружения и ненесущих элементов, пересекающих изолирующее сопряжение, должна выдерживать нагрузки, возникающие при максимальном смещении в месте сопряжения. Указанные элементы не должны влиять на рабочие характеристики изолирующего сопряжения. Особенное внимание должно уделяться лестницам, скважинам, райзерам и трубопроводам.
- л) Сейсмостойкие системы. Конструкция сооружений, оборудованных демпфирующей системой, должна быть сейсмостойкой. Проектирование такой конструкции осуществляется для сниженной сейсмической нагрузки, но она должна соответствовать признанным сейсмостойким конструкциям.

## **A.16 Дополнительные вопросы инженерной ледотехники**

### **A.16.1 Ледовые дороги и снабжение по льду**

#### **A.16.1.1 Общие положения**

Переходы через озера и реки осуществляются с использованием естественно образованного ледового покрытия в зимнее время года. Основное требование к безопасному переходу – наличие сплошного льда достаточной толщины, чтобы выдержать необходимую нагрузку.

Существуют многочисленные примеры строительства дорог, функционирующих «на плаву», через реки, озера и океаны для транспортировки тяжелых грузов. Существует несколько хороших примеров успешного использования ледового покрова для поддержания крупных грузов, как движущихся, так и стационарных, включая сезонное развертывание буровых установок. Для поддержки этих работ естественный лед был утолщен с помощью заливки или распыления морской воды на поверхность льдины до достижения общей толщины льда 6 м, когда изначальная толщина льда была всего 1 м. Долгосрочная нагрузка может вызвать ползучесть или деформации, зависящие от времени нагрузки.

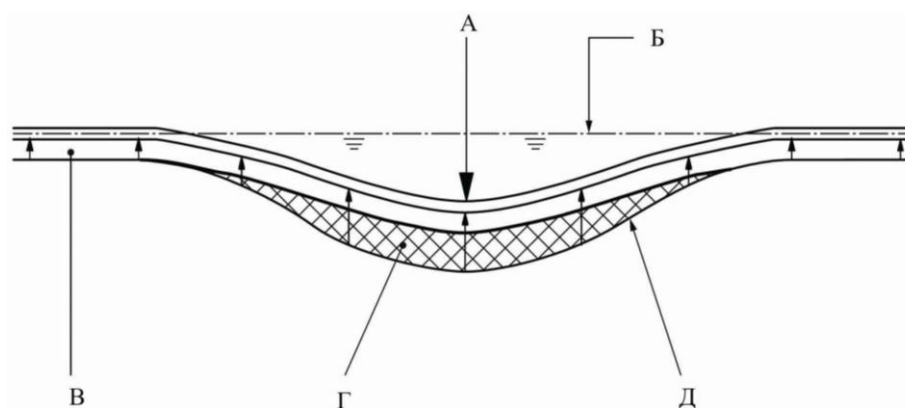
#### **A.16.1.2 Расчетные критерии для плавучего льда**

##### **A.16.1.2.1 Исходные данные**

Лед имеет плотность примерно на 10% меньше плотности воды и остается плавать на поверхности воды, если только на него не действуют внешние силы. Из-за этой разницы в плотности 90% льдины находится под водой, а 10% над водой. Высота льда над водой называется высотой надводной части льда. Когда к поверхности льда прилагается внешняя нагрузка, лед ведет себя как пластина на упругом основании, поэтому лед непосредственно под точкой приложения нагрузки прогибается вниз. Эта деформация приводит к увеличению давления воды на нижнюю часть льда, как показано на рисунке A.16.1, а интеграл от увеличенного давления воды по площади изогнутой формы равен величине приложенной нагрузки. Обратите внимание, что изображенные на рисунке A.16.1 прогибы

утрированы и не предполагают отрицательных значений высоты надводной части льда.

Изгибание льда в результате нагрузки вызывает изгибное напряжение, которое действует на поперечное сечение льдины. Если прилагаемое изгибное напряжение не превышает максимального изгибного напряжения, которое может выдержать ледовая пластина (т.е. предел прочности ледового покрова), то эта нагрузка является допустимой. Лед – это слабый материал при растягивающих нагрузках и сравнительно прочный при сжатии. Следовательно, критическое напряжение – это максимальное напряжение растяжения в нижней части льда непосредственно под местом приложения нагрузки. Очевидно, высота надводной части льда должна оставаться положительной во время этого процесса. Если ко льду приложена сила, погружающая его под воду, и поверхность затопляется, несущая способность льда быстро уменьшается, что может привести к потенциально плохим последствиям. Итак, два критерия должны быть учтены для статического нагружения ледовой пластины, а именно: максимальное изгибное напряжение, которое не должно превышать предел прочности льда, и высота надводной части льда, которая должна оставаться положительной.



А – прилагаемая вертикальная нагрузка

Б – ватерлиния

В – давление поддержки ледовой плиты

Г – дополнительное давление, вызванное изгибом льда

Д – суммарное давление

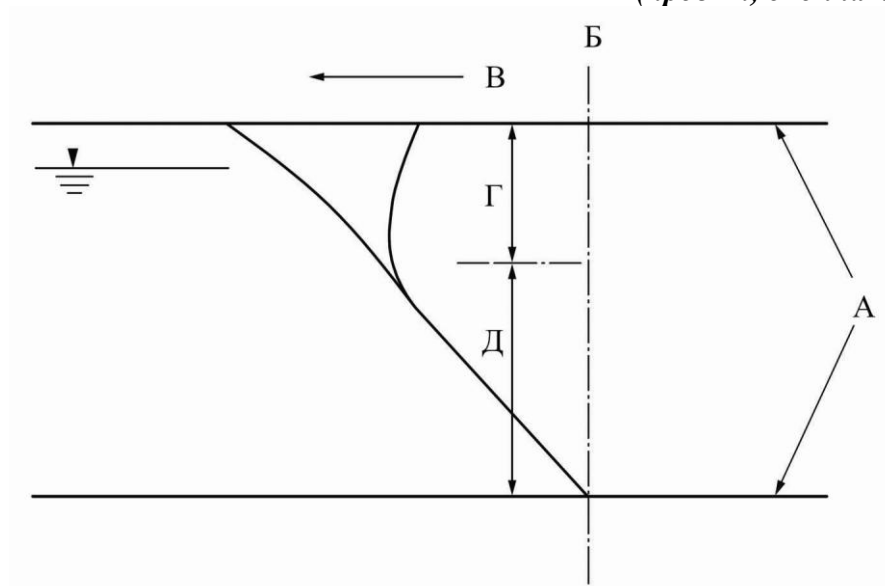
Рисунок А.16.1 – Ледовая пластина при сгибании под действием поперечной нагрузки

Лед – это материал, существующий в природе при температуре, близкой к температуре таяния. Поэтому его механические свойства чувствительны к изменениям температуры. При температурах близких к температуре таяния (0°C для пресноводного льда и минус 1,8°C для морского льда при солёности морской воды 30ppt) он становится очень мягким и склонным к ползучести. При температурах значительно ниже температуры замерзания он становится прочнее, но более хрупким. Хрупкие материалы разрушаются внезапно, без предупреждения, и для льда желателен разумный уровень пластичности. Слишком большая пластичность, особенно во время весеннего периода, когда весь ледяной покров достигает температуры таяния, может привести к большим пластическим деформациям и последующему погружению в воду груза, без видимых повреждений льда. Погружения в воду из-за трещинообразования от изгибов или чрезмерных пластических деформаций необходимо избегать.

Типовой естественный температурный профиль льда показан на рисунке А.16.2. Холодный лед на поверхности, где он находится в сжатом состоянии, испытывает большие изменения температуры, и поэтому может быть прочным и хрупким или мягким и очень пластичным. Под снежным покровом колебания температуры льда у поверхности гасятся благодаря изолирующим свойствам снега. Как было указано ранее, лед имеет относительно высокую прочность при сжатии, и поэтому колебания в прочности верхней поверхности оказывают незначительное влияние на его несущую способность.

В отличие от этого, температура льда у нижней поверхности относительно постоянна, и поэтому прочность и пластичность остаются постоянными. Поскольку критическое напряжение прилагается именно к этой поверхности, можно рассчитывать, что несущая способность льда останется постоянной на протяжении основного зимнего сезона. Только поздней весной, когда лед является изотермическим при температуре таяния и начинает терять латентную теплоту, деформации становятся большими.





- А – верхняя и нижняя поверхности льда
- Б – температура замерзания
- В – рост отрицательной температуры
- Г – зона колебаний температуры
- Д – зона постоянного градиента температуры

Рисунок А.16.2 – Температурный профиль типового ледового покрова

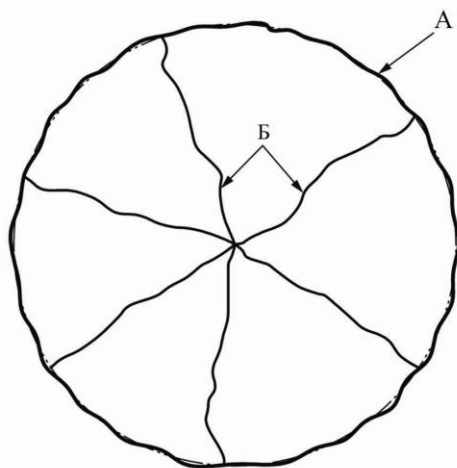
Любой источник теплоты, такой как теплая весна или слив воды с заводов или населенных пунктов, повреждает и повышает температуру льда с последующей потерей прочности. Необходимо установить комплексный критерий для прочности при сгибе и несущей способности льда. При использовании метода напряжения достаточным критерием может быть допустимое напряжение, с учетом опыта нагружения льда. Очень важно убедиться, что толщина льда достаточна на протяжении всей дороги или несущей поверхности, и что воздействия сами по себе и их распределение хорошо известны. Помимо этого важна целостность льда и отсутствие больших трещин. Даже если лед имеет поверхностное трещинообразование, это не означает, что он непригоден для предполагаемых нагрузок. Трещины на поверхности в результате изменений температуры являются обычным явлением для ледовых покровов. Поскольку глубина этих трещин обычно не превышает верхней трети толщины льда, они не приводят к уменьшению

прочности. Трещины, которые глубоко проникают в лед и являются «влажными» должны привлекать особое внимание, и могут привести к уменьшению прочности.

Два этапа структурного анализа нагруженного ледового покрова:

- убедиться, что максимальное напряжение в крайнем волокне при растяжении ледового покрова меньше допустимого напряжения изгиба для льда;
- убедиться, что долгосрочные и краткосрочные изгибы меньше, чем имеющаяся высота надводной части льда.

Прочность при изгибе плавучей льдины определяется как допустимое максимальное напряжение в крайнем волокне при растяжении, вызванным воздействием или комбинацией воздействий. Это почти всегда напряжение у нижней кромки льда под максимальной нагрузкой. Типовой сценарий разрушения для равномерно нагруженной площади в верхней части ледового покрова показан на рисунке А.16.3. При приложении нагрузки лед изгибается до образования первой трещины или прогиба с обратной стороны ледяной пластины под центром нагрузки. Дальнейшая нагрузка приводит к развитию радиальных трещин по всей толщине льда на некотором расстоянии от нагруженной площади. Рост нагрузки приводит к развитию трещин по окружности. Как только этот процесс завершается, полное разрушение может произойти мгновенно.



А – трещины по окружности

Б – радиальные трещины

Рисунок А.16.3 – Типовая картина излома ледового покрова

При снижении несущей способности льда могут возникнуть вертикальные срезы вокруг нагруженной зоны. Они тесно связаны с трещинообразованием при изгибе. Трещинообразование при изгибе наблюдается не только на длинной клинообразной структуре, изображенной выше. Для разрушения льда вследствие текучести длина клина приблизительно в два раза превышает толщину льда, что подтверждает наблюдаемые разрушения вследствие среза.

#### А.16.1.2.2 Теоретические модели

Для моделирования плавучести, предполагается, что лед деформируется как, однородная изотопная пластина на упругом основании. В документе [266] представлена методика проектирования, которая может применяться для прогнозирования напряжения в крайнем волокне ледового покрова, вызванного равномерно распределенной нагрузкой на ледяной покров. Напряжение в крайнем волокне, прогнозируемое с помощью уравнения Вестергаарда, выражается следующим уравнением:

$$\sigma_{\max} = 0,275(1 + \nu) \frac{P}{h^2} \log_{10} \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right), \quad (\text{A.16.1})$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное изгибное напряжение ледового покрова, кПа, МПа;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$P$  – величина нагрузки, кН, МН;

$E$  – модуль упругости, кПа, МПа;

$h$  – толщина льда, м;

$k$  – реакция грунтового основания, кПа/м, МПа/м ( $k=9,81$  кПа/м для воды);

$b$  – эффективная длина балки, м:

$$\begin{cases} b = \sqrt{1,6r_c^2 + h^2} - 0,675h, & \text{для } r_c < 1,724h \\ b = r_c, & \text{для } r_c \geq 1,724h \end{cases}$$

$r_c$  – радиус площади нагружения, м.

Уравнение Вестергаарда (А.16.1) это приближительное решение уравнений изгиба пластины и может привести к ошибкам при расчете нагрузок с величиной радиуса, сравнимой с характеристической длиной  $L_c$  (определяемой уравнением

А.16.2). Когда уравнение (А.16.1) используется для ограничения нагрузок на ледяной покров величиной, которая меньше изгибной прочности льда, трещины в ледовом покрове не могут возникнуть. Норматив не допускает возникновения «первой трещины». Как только условие возникновения «первой трещины» выполнено, возможно затопление поверхности льдины. Нагнетаемая вода добавляет к заданной нагрузке  $P$  ускоренный прогиб и создает трудности при эвакуации оборудования с нагруженной площадки. Прорыв воды обычно не происходит до образования трещин по окружности, показанных на рисунке А.16.3. В целом, чем тоньше ледовая дорога, тем быстрее переход от «первой трещины» до прорыва воды. Считается, что более толстый ледяной покров обеспечивает передачу напряжения и нагрузки на механических уровнях, что невозможно для более тонкого льда. Локальное дробление более толстого ледового покрова обеспечивает механическую передачу нагрузок.

Таким образом «первая трещина» или первое состояние текучести будет являться определяющим для практического проектирования ледовых дорог. Для таких областей применения, как посадка на лед вертолетов, гравитационная нагрузка выше нагрузки, приводящей к образованию «первой трещины», может оказать приемлемой. Этот вопрос рассматривается в А.16.1.7.

Когда изгибное напряжение должно рассчитываться для расстояния  $x$  ледового поля от площади нагружения, применяется уравнение (А.16.2) [268]:

$$\sigma_x = 0,249 \left( \frac{P}{h^2 / 6} \right) \exp \left( \frac{-x}{0,691 L_c} \right), \quad (\text{А.16.2})$$

где  $x$  – расстояние от центра приложения нагрузки, м;

$\sigma_x$  – максимальное напряжение в крайнем волокне на расстоянии  $x$  от центра нагрузки, кПа, МПа - в соответствии с единицами измерения  $P$ ;

$$\sigma_x = 0,249 \left( \frac{P}{h^2 / 6} \right) \exp \left( \frac{-x}{0,691 L_c} \right),$$

$$L_c \text{ – характеристическая длина, м: } L_c = \left[ \frac{Eh^3}{12k(1-\nu^2)} \right]^{1/4}$$

Характеристическая длина  $L_C$  на практике может принимать значение  $16h^{3/4}$  м. Размещенный на плавучей льдине груз, вызовет изгибное напряжение льда в других местах в пределах относительной близости. Чистое общее напряжение в точке определяется с использованием принципа суперпозиции напряжений. Выполненный анализ напряжения в упругой стадии и поэтому соответствует результатам расчета по этой методике. Если долгосрочные нагрузки или ползучесть имеют место наряду с сопровождающей пластической деформацией и изгибанием, тогда принцип совмещения не применим.

#### А.16.1.2.3 Опыт эксплуатации

В течение ряда лет предприятия отрасли и государственные органы использовали для прогнозирования несущей способности ледовых пластин уравнение вида:

$$P = C_{ir} h^2, \quad (\text{A.16.3})$$

где  $P$  – сопротивление ледового покрова, т;

$C_{ir}$  – коэффициент использования ледовых дорог, т/м<sup>2</sup>, в диапазоне  $35 \text{ т/м}^2 < C_{ir} < 70 \text{ т/м}^2$ ;

$h$  – толщина льда, м.

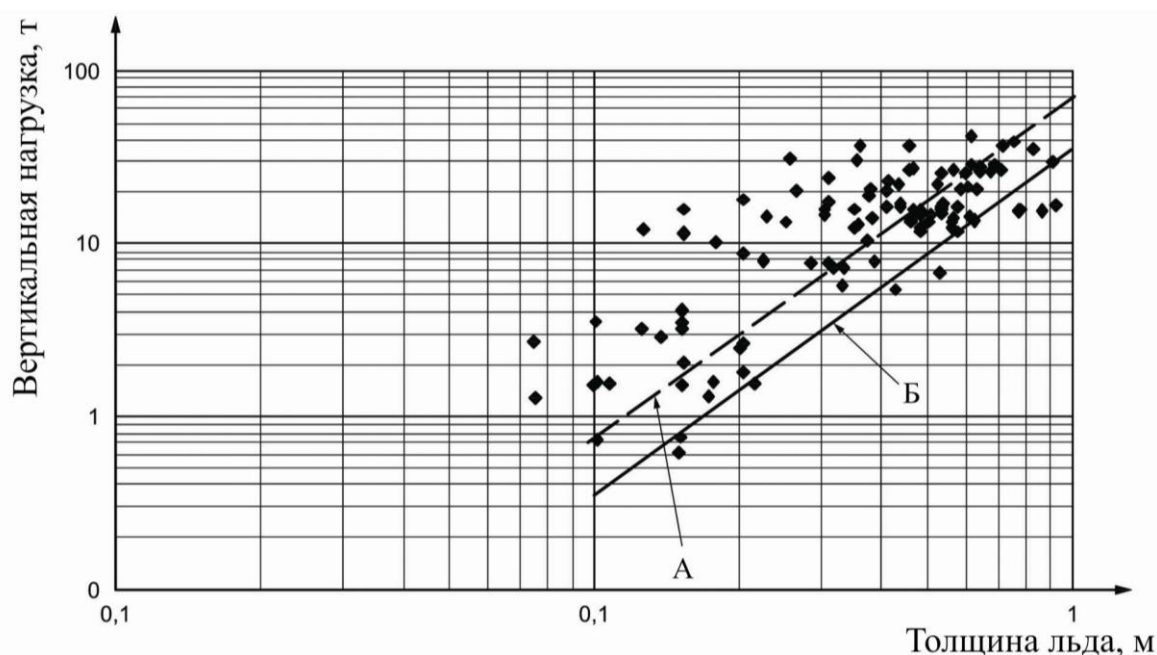
На основе имеющихся отраслевых данных о разрушениях льда была получена кривая [269, 270], которая показана на рисунке А.16.4.

Как видно из рисунка А.16.4 — расположение и количество разрушений в диапазоне между линией  $P = 35/h^2$  и линией  $70h^2$  соответствует 49 из 106 разрушений или 46%, когда толщина льда больше толщины, требуемой для определения линии  $A = 70h^2$ . Даже когда толщина больше, чем толщина необходимая для линии  $P = 35/h^2$ , разрушения все равно происходят. Девять процентов разрушений, зарегистрированных на рисунке А.16.4, произошло, когда толщина льда была равна или превышала толщину, необходимую для линии  $P = 35/h^2$ .

Эмпирические данные также продемонстрировали, что цвет ледового поля (белый или голубой) не является надежным фактором, определяющим прочность

при изгибе. Поверхностный лед часто может оказаться достаточно гранулированным, поскольку он образован вследствие смерзания снега или замерзания смеси воды, затопившей поверхность, и снега. Однако этот материал может обладать достаточно высоким сопротивлением сжатию, формируя верхнюю поверхность льда. За исключением случаев, когда материал является очевидно слабым, особенно, если он не сцеплен с лежащим ниже льдом, нецелесообразно учитывать его прочность. Более эффективный путь заключается в поиске непрерывного, хорошо смерзшегося льда.

Наряду с тем, что морской лед может иметь или не иметь такую же высокую прочность, что и лед из пресной воды, он является хрупко-упругим материалом и поэтому менее склонен к внезапному разрушению. Нет причины занижать несущую способность по той причине, что это морской лед.



$$A - P = 70h^2$$

$$B - P = 35h^2$$

$P$  – вертикальная нагрузка, т

$h$  – толщина льда, м

Рисунок А.16.4. – Данные по разрушению с потерей несущей способности льда с указанием отдельных случаев разрушения и безопасных ледовых нагрузок

[270]

Даже превышение реальной толщиной льда требуемого значения (т.е. использование линии  $A = 35h^2$ ) не гарантирует сохранения несущей способности ледового покрова. В то время как вероятность разрушения уменьшается по мере уменьшения значения  $P$ , разрушения при толщине больше линии  $P = 35/h^2$  все еще достаточно значительны. На рисунке А.16.4 разрушения при толщине льда между линией  $P = 35/h^2$  и линией  $70h^2$  скорее всего являются результатом неправильной эксплуатации или дефекта ледового поля. Это говорит о необходимости надлежащего инспектирования и мер по обеспечению безопасности на ледовой дороге, позволяющих убедиться в том, что эксплуатационные характеристики на месте, такие как скорость и кромочное нагружение, контролируются.

#### А.16.1.2.4 Рекомендации по проектированию

В производственной практике в Канаде почти повсеместно используется значение нагрузки между  $35/h^2$  и  $50/h^2$  для раннего сезона работ, особенно для времени открытия ледовых дорог, и значение между  $60h^2$  и  $70h^2$  для более позднего сезона. Иногда открытие ледовых дорог выполняется при значении от  $60h^2$  до  $70h^2$ , с должным мониторингом и инспектированием.

Из сравнения результатов расчета по уравнениям (А.16.1) и (А.16.3) следует, что уровень изгибного напряжения, связанный со значением  $P$  от  $35/h^2$  до  $50h^2$  соответствует нагруженному ледовому покрову с уровнем изгибного напряжения от 500 кПа до 550 кПа. Следует подчеркнуть, что несущая способность льда рассчитывается в уравнении (А.16.1), исходя из допущения, что напряжение и растяжение льда меняется линейно, в зависимости от толщины льда, а отношение напряжения к относительной деформации остается постоянным и равно модулю упругости. Как напряжения, так и деформации максимальны у крайних волокон (сверху и снизу) и равны нулю на середине толщины льда (на средней оси). Ни одно из указанных утверждений не является полностью истинным. Зависимость «напряжение-деформация» для льда нелинейная, особенно в условиях ползучести или изменяющейся во времени нагрузки. Кроме того, анализ методом конечных элементов показал, что напряжение сжатия непосредственно под нагрузкой (у верхней поверхности льда) гораздо выше значений, предсказанных теорией для

расчета балки, а растягивающее напряжение ниже значений, рассчитанных с помощью теории для расчета балки. Такое поведение соответствует теории сосредоточенных нагрузок, прилагаемых к стальным и бетонным балкам, и рассматривается в соответствующих нормах, где при проектировании определяющим является усилие сдвига. Для противодействия этой сосредоточенной нагрузке в стальные профили добавляются ребра жесткости, а при проектировании бетонных конструкций используется поперечная арматура.

Для расчета несущей способности ледовых пластин традиционно используется линейная теория упругости, которая дает надежные и быстро вычисляемые значения напряжений и нагрузок. Практический опыт продемонстрировал, что рекомендуемые допустимые нагрузки точно предсказывают несущую способность льда, и превышение этих нагрузок приводит к существенному увеличению интенсивности разрушений. При применении уравнений (A.16.1) и (A.16.4), (приведено ниже для кромочного нагружения) следует использовать уровни изгибного напряжения, в основе которых лежат определенные выше соответствия. По указанным выше причинам значения от 500 кПА до 550 кПА, используемые для оценки безопасных нагрузок при помощи этих уравнений, невозможно напрямую сравнить со значениями, используемыми для ледовых нагрузок, прилагаемых к наклонным конструкциям (см. A.8.2.4.4, A.8.2.8.3).

Уравнение (A.16.3) является простым эмпирическим уравнением, предназначенным для применения в простых ситуациях нагружения. Когда ледовые дороги открываются в начале зимнего сезона, нагрузки обычно являются сосредоточенными и имеют простые схемы приложения. Длинные прицепы не должны применяться в начале сезона. Снегоочистители, применяемые для расчистки ледовых дорог, обычно имеют две оси, и ширина нагрузки приблизительно равна их длине. Эти концентрированные нагрузки при эксплуатации в начале сезона требуют сравнительно безопасной величины  $A$  в диапазоне от  $35/h^2$  до  $50/h^2$ .

Позднее, в сезон функционирования ледовой дороги во время подвозки грузов к установке и перемещений грузовиков, когда дорога хорошо установилась,



нагрузки являются протяженными и связанными. Более тяжелые общие нагрузки возможны на меньшую толщину льда, т.к. оси прицепа удалены на большее расстояние от ведущей оси транспортного средства. Напряжения, приложенные к точке максимальной прочности при сгибе, обычно на ведущей оси автомобиля, относительно меньше нагрузки от оси прицепа. Небольшое изгибное напряжение, обусловленное использованием прицепа, и тот факт, что толщина льда и другие параметры ледовой дороги поддаются мониторингу лучше на законченной ледовой дороге, позволяют использовать значение от  $60 h^2$  до  $70 h^2$  в уравнении (А.16.5). Для этих ситуаций нагружения рекомендуется использовать методы, описанные в уравнениях (А.16.1) и (А.16.2).

Стандартные процедуры обеспечения безопасности для оборудования, участвующего в эксплуатации ледовой дороги, должны четко устанавливать ограничения, связанные с использованием конкретного значения А. Когда возникают условия ограничения, такие как влажные трещины или неожиданное изменение температуры воздуха, необходимо предусмотреть соответствующие компенсирующие изменения, которые гарантируют безопасную эксплуатацию. Процедуры обеспечения безопасности также должны устанавливать требования в отношении инспектирования и мониторинга, которые должны выполняться для своевременного обнаружения дефектов, таких как влажные трещины.

#### А.16.1.2.5 Ледяной покров с трещинами

Для нагрузки на край ледового покрова максимальное напряжение в крайнем волокне  $\sigma_{edge}$  (в кПа или МПа, в соответствие Р), приведено в [271]:

$$\sigma_{edge} = 0,529(1 + 0,54\nu) \frac{P}{h^2} \left[ \log_{10} \left( \frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right]. \quad (\text{А.16.4})$$

Сопоставительные расчеты по зависимости (А.16.4) и (А.16.1) для сплошного ледового покрова выполнены для следующих значений параметров ледового покрова:

$\nu$  - коэффициент Пуассона, значение которого принимается равным 0,33;

$E$  - модуль Юнга, который можно принять равным 5 000 000 кПа;

$h$  - единичная толщина льда, которая принимается равной 1,0 м;

$k$  - модуль упругости основания, который принимается равным 9,81 кН/м<sup>3</sup>;

$b$  - коэффициент, определяемый в уравнении (A.16.1), за значение которого принимается 2,0 м.

Возникает следующее увеличение изгибного напряжения:

$$\frac{\text{Уравнение напряжения (A.16.4)}}{\text{Уравнение напряжения (A.16.1)}} = \frac{0,529(1 + 0,54\nu)}{0,275(1 + \nu)} \left( \frac{4,5 - 0,71}{4,5} \right) = 1,43,$$

где  $\nu = 0,33$ ;

$E = 5\,000\,000$  кПа;

$h = 1,0$  м;

$k = 9,81$  кПа/м;

$b = 2,0$  м.

Поэтому, напряжения кромки, спрогнозированные в уравнении (A.16.4), в общем на 50 % выше, чем значения, спрогнозированные для центра того же непрерывного ледового покрова из уравнения (A.16.1). Так как логарифмический член в уравнении (A.16.1) и уравнении (A.16.4) становится слишком большим (т.е. нагрузка становится концентрированной) коэффициент напряжения равен:

$$\frac{\text{Уравнение напряжения (A.16.4)}}{\text{Уравнение напряжения (A.16.1)}} = \frac{0,529(1 + 0,54\nu)}{0,275(1 + \nu)} = 1,70.$$

Поэтому при наихудшем сценарии напряжения возрастут на 70%, когда влажная трещина приближается или пересекает ледовую дорогу из-за концентрированной нагрузки. При образовании поперечной влажной трещины наблюдается дополнительное снижение несущей способности ледового покрова [266].

Прогиб бесконечных ледовых покровов в результате кратковременной нагрузки можно определить с помощью метода, описанного в документе [272]. Если нагрузка действует в течение времени, превышающего одни сутки, необходимо принимать во внимание пластические деформации. Можно воспользоваться методами, использующими либо результаты измерения на месте с плавучих

платформ, либо уменьшенные модули упругости. Эти методы обсуждаются в А.16.2.2.3.

Для случаев приложения нагрузки близко к свободному краю доступны другие методы, включая тот, который описан в документе [273] для расчета нагрузки на участках прямоугольной формы.

#### **А.16.1.3 Оценка изгибной прочности льда при проектировании**

Руководство не предлагается.

#### **А.16.1.4 Динамическое поведение и коэффициент динамического усиления**

Динамические нагрузки создают волну сжатия в воде подо льдом, которая может усиливать прогибы и напряжения [274]. Теоретически, в точке резонанса коэффициент усиления равен бесконечности, но на практике результаты измерений показывают, что коэффициент динамического усиления составляет около 1,5 [275]. При приближении к береговой линии со стороны ледового покрова могут возникать трудности. Волна сжатия, вызываемая динамической нагрузкой, отражается от мелководного дна или береговой линии и в результате может произойти разрыв льдины. Это явление приводит к образованию трещины от разрыва во льду, которая не мешает автомобилю, который её образовал, но может мешать следующим автомобилям, которые двигаются по тому же льду, но не могут проехать из-за образовавшейся трещины. Автомобили, едущие через узкий проход или вход, покрытый льдом, также создают волну, которая может отразиться от ближайшего побережья, формируя разрывы льдины. Эти ситуации являются уникальными и требуют внимательного наблюдения и ограничения скорости. В общем, желательно ограничивать скорость подвижных нагрузок на лед, чтобы избежать динамических эффектов. Это особенно важно, если нагрузки близки к максимально допустимым для определенного ледового покрова.

Скорость волны в основном зависит от глубины воды, толщины ледового покрова и упругости льда. На глубоководье максимальный прогиб и наиболее серьезные напряжения происходят, когда автомобиль на льдине и волна под ней движутся с одинаковой скоростью. Если ледяной покров подвержен сильному напряжению, потому что лед очень тонкий или покрыт трещинами, напряжение от

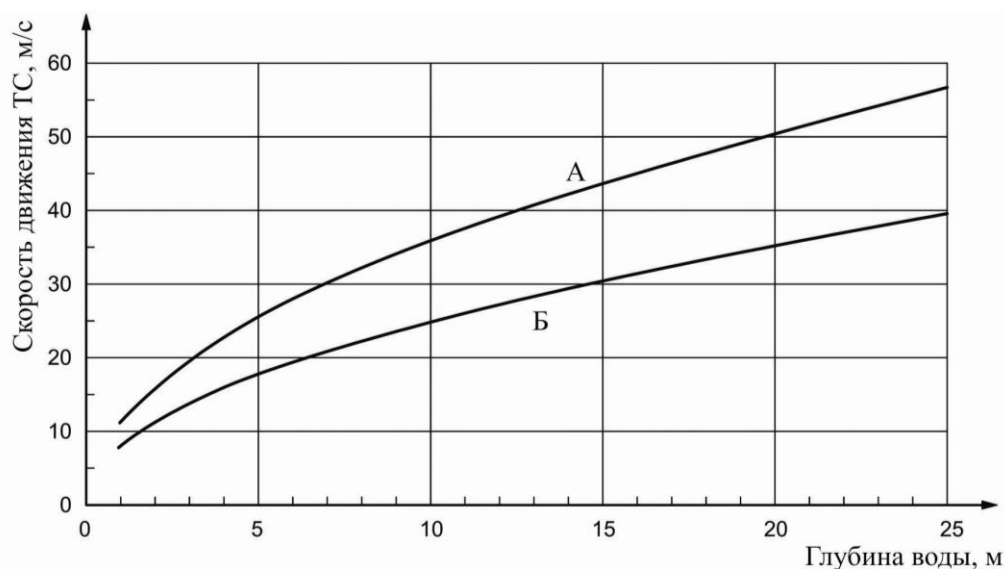
волны плюс напряжение от нагрузки могут быть достаточными для неожиданного разрушения.

Критическая скорость автомобиля для максимального динамического усиления,  $v_c$ , км/ч, определяется в основном глубиной воды и может быть выражена как:

$$v_c = 11,3d^{1/2}, \quad (\text{A.16.5})$$

где  $d$  – глубина воды, м.

При критической скорости или близко к ней изгиб льда и напряжение/растяжение льда может в 1,5 раза превышать величины, соответствующие медленному движению автомобиля. При скорости менее 70 % критической скорости измерения в полевых условиях показали, что коэффициент динамического усиления не является значительным. Эти аспекты обобщены на рисунке А.16.5. Из рисунка А.16.5 следует, что для движения со скоростью 30 км/ч, чтобы полностью исключить динамические эффекты, потребуется глубина воды, превышающая 14 м. Движения на скорости, близкой к критической, необходимо избегать.



А – существенный динамический эффект при более высоких скоростях; которого следует избегать;

Б – минимальный динамический эффект при меньших скоростях; рекомендуемый

Рисунок А.16.5 – Критическая скорость для динамических эффектов

Когда автомобиль движется параллельно береговой линии, резонансные волны отражаются назад через лед. Волновой спектр является критическим, когда вес автомобиля близок к пределу грузоподъемности льда. Отраженные волны максимальны, когда автомобиль приближается к береговой линии под прямым углом. Если возможно, дороги и автомобили должны приближаться к береговой линии под углом 45°. Важно, чтобы водители соблюдали указанный лимит скорости, когда дорога подходит к побережью и когда вес автомобиля близок к максимальному ограничению для льда.

#### **А.16.1.5 Вопросы безопасности при эксплуатации ледовых дорог.**

##### **Регламентные мероприятия**

Технология подготовки поверхности льдины для заливки, если она используется для утолщения льда и для движения автомобилей, меняется в соответствии с практикой и опытом на месте. Если предусмотрена заливка, тогда тяжелый снег необходимо убрать перед заливкой с использованием механических средств, таких как отвальный или пневматический снегоочиститель. До начала заливки на поверхности может оставаться от 5 до 10 см снега. В некоторых случаях производители работ не имеют в наличии средств для удаления снега, и глубокий снежный покров на льду пропитывается водой и замерзает. Важно убедиться, что снег, впитавший воду, полностью замерз до начала заливки. Чтобы подготовить ледяной покров для автомобильного движения, особенно колесного транспорта, снег либо должен быть убран с помощью снегоочистителей, либо он может быть уплотнен до относительно высокой плотности, чтобы колеса автомобилей не застревали. Снег, где возможно, должен быть хорошо убран с дороги в сугробы вдоль стороны, которая имеет уклон назад. Это позволяет избежать концентрации напряжений на краю дороги и чрезмерного трещинообразования льда, а также препятствует в дальнейшем образованию снежных заносов.

Утолщение льда обычно выполняется с использованием низконапорных насосов большой производительности, которые нагнетают воду из подо льда на поверхность. Вода наносится слоями толщиной около 3 см и должна замерзнуть до нанесения следующего слоя. Таким образом, в среднем, наращивание толщины льда

достигает 3 см в день для большей части дорог. В холодные периоды, когда ветры не сильные, скорость может быть выше, но средняя величина с учетом возможности покрыть существующий лед и задержки по причине непогоды и неисправности оборудования соответствует указанной выше. Наилучшая практика — не делать запруды и не ограничивать воду, а позволить ей течь свободно и создавать клиновидное сечение дороги. Это позволит избежать резких переходов и образования трещин на краю заливаемой площади. Иногда необходимо использовать снежные дамбы для предотвращения вытекания воды и достижения необходимой толщины за приемлемый период времени. Управление требуется постоянно.

Для наращивания льда используется разнообразное оборудование. Оборудование, имеющееся в наличии, часто наиболее удобное и эффективное. Насосы должны быть способны работать в условиях низких температур. Они должны быть погружными или типа архимедова транспортирующего винта (шнековые), не имеющие шлангов, которые могли бы замерзнуть. Эти типы насосов автономны и сбрасывают воду в выключенном состоянии. При строительстве дороги насосы будут перемещаться от отверстия к отверстию, которые были пробурены по мере заливки дороги. Бригады, оперирующие насосами, должны иметь средства транспортировки и перемещения насосов, а также им необходим бур или сверло для сверления отверстий необходимого диаметра. Техника разбрызгивания также может использоваться для строительства дорог, так как это ускорит утолщение льда. Принципы разбрызгивания описаны в А.16.2.1.2.

#### **А.16.1.6 Ледовые дороги, опирающиеся на грунт**

Ледовые дороги с основанием на морском дне обычно строятся на мелководье, таким образом, что лед утолщается и прижимается к грунту. Это также дороги, построенные на берегу, где ледовое и снежное покрытие создаются для защиты естественной почвы или тундры от повреждения колесной техникой. Так как грунт обеспечивает твердую опору или основание для льда, изгибное напряжение льда очень часто не принимается во внимание при проектировании. Лед должен иметь достаточную толщину для того, чтобы выдерживать нагрузки от колес и

предотвращать перенапряжение почвенного слоя тундры. При строительстве ледовой дороги на шельфе, величины модулей упругости грунтового основания, приведенные в кПа/м или кН/м<sup>3</sup> или эквивалентных единицах, должны быть достаточно высокими, чтобы избежать перенапряжения льда. Некоторые мягкие грунты имеют модули упругости грунтового основания, которые немногим лучше, чем для воды (1 т/м<sup>3</sup>), в то время как другие, такие как плотные пески, имеют модули упругости, которые на порядок больше, чем у воды. Важно знать модули упругости грунтового основания при несущей способности льда на мели. Для оценки влияния модуля упругости грунтового основания на необходимую толщину льда можно использовать методы, описанные в уравнениях (А.16.1) и (А.16.2). Очевидно, что последствия разрушения не такие серьезные, как на большой глубине, где есть риск для жизни и потери оборудования, однако разрушения означают, что дорога не пригодна к эксплуатации, пока она не будет отремонтирована.

#### **А.16.1.7 Посадка вертолетов на лед**

Для посадки вертолетов на лед необходимо принять во внимание следующие дополнительные моменты.

- Можно не прекращать вращения винтов вертолета, что приводит к возникновению подъемной силы, снижающей сосредоточенную вертикальную нагрузку на лед.
- Применяя процедуру, описанную выше (а), можно измерить толщину льда до высадки персонала и выгрузки оборудования, чтобы убедиться в достаточной несущей способности льда.
- Поскольку вертолет является неподвижным объектом, не перемещающимся по льду, прорыв воды не произойдет даже после возникновения «первой трещины» (со ссылкой на уравнение (А.16.1)). Прорыв может возникнуть только после воздействия, в результате которого произойдет полное растрескивание по окружности (см. рисунок А.16.3). Это воздействие приблизительно в 1,5 – 2 раза превышает нагрузку, связанную с «первой трещиной».

– С учетом изложенных выше соображений и опыта предыдущих ледовых экспедиций рекомендуется использовать в уравнении (А.16.3) значение  $C_{ir}$  равное 50.

## **А.16.2 Искусственные ледовые острова**

### **А.16.2.1 Ледовые острова, опирающиеся на грунт**

#### **А.16.2.1.1 Общая информация**

Десятилетиями ледовые острова, опирающиеся на грунт, использовались для разведывательного бурения нефти и газа в канадском и американском секторах моря Бофорта на Аляске. Как и в случае с плавучими ледовыми платформами, они обеспечивают относительно недорогие и устойчивые с точки зрения окружающей среды средства для проведения буровых работ. До 2005 года с использованием этой технологии были пробурены три скважины в Канаде и пять на Аляске.

Годами севшие на мель торосистые образования наблюдались на мелководье в полярных и субполярных регионах. Массы севших на мель торосов стабилизировались и часто оставались неподвижными до конца зимы. Севшие на мель ледовые нагромождения также служат для стабилизации окружающего дрейфующего льда, смещая зону активных подвижек дальше в море. Устойчивые массы ледовых нагромождений с дальнейшей искусственной стабилизацией, позволяют сформировать твердое основание для таких работ, как разведывательное бурение, а в процессе таяния летом оставляют минимальный след.

Ледовые острова должны иметь твердое основание с достаточной высотой надводного борта, чтобы обеспечить достаточный контакт с морским дном и выдерживать расчетные сдвиговые нагрузки ото льда. Брызговой лед, образовавшийся во время строительства, должен иметь достаточную плотность и массу, чтобы обеспечить нужную высоту, позволяющую создать необходимый контакт с морским дном. Брызговой лед также должен обладать необходимой минимальной сдвиговой прочностью, чтобы боковые нагрузки льда не вызывали перемещение при сдвиге по ослабленной плоскости острова.

#### **А.16.2.1.2 Строительство**



Чтобы построить ледовый остров, опирающийся на морское дно, вода, используемая для строительства, должна нагнетаться и замораживаться над уровнем моря. Работы по распылению быстро намораживают материал благодаря тому, что вода близка к температуре замерзания и неподвижна, при попадании на поверхность. При свободной заливке не достигается такого эффекта. При свободной заливки воды на утолщенный лед, она стекает вниз, не успевая замерзнуть. Ледовые острова, опирающиеся на грунт, строились и в прошлом в пределах зоны припая на море Бофорта. Доступ к ним осуществлялся по дороге от берега до острова, сооруженной на льду. Ледовая дорога сооружалась в конце ноября или начале декабря, после чего начиналось строительство острова. В дополнение, окружающий лед использовался в качестве платформы, с которой строился остров. Толщина дороги и льда вокруг острова должна быть порядка 1 метра для обслуживания строительного оборудования. Дорога должна быть утолщена с помощью заливки во время строительства острова для транспортировки буровой установки и снабжения. Для транспортировки очень тяжелых грузов, таких, которые потребовались для ледовых островов Pioneer в 2003 [276], использовалась ледовая дорога с основанием на дне. В настоящее время экономичное сооружение такой дороги возможно при глубине воды до 3 м. Посадка дороги на грунт может быть выполнена методом распыления и/или использования ледовой стружки.

Строительство ледовых островов с основанием на дне методом распыления происходит в течение декабря – января, чтобы обеспечить окончание буровых операций до весеннего взлома льда. Продолжительность строительства зависит от расположения и года, но обычным периодом строительства является конец декабря и большая часть января. Используются насосы с номинальной мощностью от 12 м<sup>3</sup>/минуту до 30 м<sup>3</sup>/минуту. Эти насосы должны иметь давление на выпускном сопле 1,5 МПа. Более низкое давление недостаточно для достижения необходимой степени распыления воды для эффективного строительства. В зависимости от глубины воды и диаметра, необходимого для поперечной устойчивости и работы, ледовый остров будет иметь объем от 500 000 м<sup>3</sup> до 1 500 000 м<sup>3</sup>. Насос обычно работает в течение 20 часов в день или 10 часов в смену, и его эффективность будет

равна 80% – 90%. Поэтому для строительства острова с объемом 1 000 000 м<sup>3</sup> льда при использовании 2 насосов с номинальной мощностью распыления 20 м<sup>3</sup>/мин. может потребоваться 25 дней. Этот расчет не включает простои из-за погодных условий. С поправкой на простои из-за погоды, обычно 4 насоса этой мощности необходимы для завершения строительства острова с данным объемом в течение 30 – 40 дней. Продолжительные периоды с теплой и ветреной погодой, при которой ход работ замедляется, не являются редкостью. Как только становится холоднее, важно иметь под рукой все необходимое оборудование, чтобы воспользоваться этим периодом.

Температура окружающей среды оказывает непосредственное влияние на способность замерзания распыленной воды. Если нагнетается обычная морская вода, опыт показывает, что при температуре выше минус 18°C достигается очень небольшой прогресс в строительстве льда. Это происходит рядом с эвтектической точкой для замерзания соленой воды и соответствует переходу через точку эвтектики для результатов разбрызгивания [277]. С другой стороны, эффективность разбрызгивания определяется ветром. Умеренный ветер 5–7 м/с предпочтителен для отведения тепла, освобожденного при разбрызгивании воды, и позволяет избежать формирования термической оболочки на месте острова. Однако сильные ветры препятствуют разбрызгиванию. Они приводят к сдуванию капель воды с острова и их потере. Эффективность падает, когда ветры сильны, а ветер со скоростью выше 12 м/с может привести к остановке операции разбрызгивания. При сильных ветрах есть возможность разбрызгивать воду только по ветру, тогда как при умеренном ветре ее можно разбрызгивать против ветра, что увеличивает площадь покрытия и гибкость любого насоса. Идеальная ситуация для изготовления льда – день с температурой от минус 30°C до минус 35°C и скоростью ветра 5 м/с. Насосы с производительностью 20 м<sup>3</sup>/минуту могут производить 1 м льда в сутки при диаметре острова 250 – 300 м.

Если используется пресная вода, тогда нет точки эвтектики при минус 18°C и разбрызгивание может продолжаться до температуры замерзания 0°C. Конечно,

скорость заморозки уменьшается с увеличением температуры, и наилучшие результаты достигаются при низких температурах.

Разбрызгивание воды в воздух с использованием высоконапорных насосов (давление в сопле 1,5 МПа) приводит к поднятию ее в воздух на десятки метров и распылению. Такое путешествие по воздуху приводит к быстрому охлаждению капель воды и, если распылительное сопло имеет подходящий размер, капли воды на 80% замораживаются к моменту падения на поверхность льда. Предпочтительнее, чтобы капли воды не замерзали на 100% при контакте с поверхностью, так как это приводит к образованию крупниц льда или снега, которые имеют очень небольшое сцепление, а это не очень хорошая опорная поверхность, поскольку у нее недостаточная прочность на сдвиг. Также желательно не допускать при разбрызгивании образования слякоти, на замораживание которой потребуется слишком много времени. Если разбрызгивание запланировано и проведено должным образом, оптимальная скорость строительства льда достигается с максимальной плотностью и прочностью на сдвиг. Плотность брызгового льда обычно 0,6 тонн/м<sup>3</sup> и прочность на сдвиг порядка 35–150 кПа [278, 277]. Эта плотность и прочность на сдвиг являются подходящими для сопротивления льда боковым нагрузкам, вызванным окружающим паковым льдом, и для создания на острове опоры для таких тяжелых грузов как буровая установка.

Брызговой лед является очень удобным в обработке материалом и может принимать нужную форму при использовании экскаваторов, бульдозеров и погрузчиков. Поверхность острова в конце строительства обычно покатаая и никогда не бывает плоской. Поэтому важно иметь возможность выровнять лед, чтобы создать пригодную для использования рабочую поверхность.

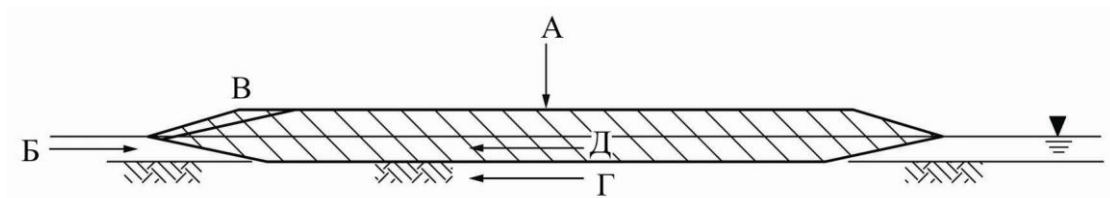
Искусственные ледовые острова, с основанием на дне моря строятся с 1985 года без использования ледовых нагромождений, так как они редко встречаются на месте строительства. Лед разбрызгивали поверх ровного однолетнего льда, поэтому основная часть острова была образована из брызгового льда. Если на месте строительства имеются ледовые нагромождения (плавучие или опирающиеся на дно) их можно использовать для сокращения времени строительства. Ледовые

нагромождения могут быть хорошим твердым основанием для острова. С более мощными насосами можно накачать больше воды и сформировать большее количество льда в заданный период времени. Это происходит не только из-за увеличения количества воды, но также потому, что увеличенная скорость нагнетания дает в результате более высокую кинетическую энергию потока воды, вызывая его продвижение выше и дальше. Это в свою очередь увеличивает длительность воздействия на воду холодной температурой воздуха и приводит к большему замораживанию, которое необходимо для увеличения скорости подачи воды. Более мощные насосы произведут гораздо больший объем льда в день, чем небольшой насос. Так, насос с мощностью  $20 \text{ м}^3/\text{минуту}$  произведет в 20/12 (в 1,7) раз больше льда в день, чем насос с мощностью  $12 \text{ м}^3/\text{минуту}$ , при одинаковых остальных факторах. Поэтому при строительстве искусственного ледового острова желательно использовать более мощные насосы.

В настоящее время, максимальная глубина, при которой могут использоваться искусственные острова, составляет от 12 до 15 метров. Максимальная глубина зависит от подвижности дрейфующего льда и времени начала строительства. Если местные географические условия способствуют раннему образованию припая, тогда становится возможным ранний доступ к месту строительства и его своевременное завершение до начала намеченных сезонных работ. Глубина воды сама по себе не является проблемой, как тот факт, что с увеличением глубины воды, дрейфующий лед сохраняет подвижность в течение долгого времени в зимний период. В общем случае, для успешной реализации проекта устойчивый припай должен сформироваться приблизительно к 1 января. Это, конечно, относится к операциям, когда строительство поддерживается со льда. Если используется судно для помощи строительству, тогда допустимо более позднее передвижение льда. Несмотря на то, что брызговой лед может использоваться для помощи при стабилизации и установке льдины на грунт, большинство практических областей применения подразумевают строительство с использованием в качестве опоры существующих ледяных образований.

Сразу после строительства часть острова, лежащая в основании на дне, представляет сердцевину острова, в то время как за ее пределами существует критический край, который в случае большого смещения льда, может разрушиться в результате среза. Все критически важное, непеременяемое оборудование, такое как буровая установка или жилые помещения, должны быть расположены внутри радиуса сердцевины.

Форма кромки ледового острова очень отличается от кромки острова, сделанного из гравия или другого грунта. Так как в отличие от грунта или гравия лед обладает плавучестью, и так как естественный ледяной покров погружен в воду и затоплен при наслаивании новых слоев льда, подводная часть кромки естественно принимает обратную конусность, показанную на рисунке А.16.6. Профили, взятые после окончания строительства, в общем, подтверждают эту форму кромки острова. Конусность может пойти дальше, чем показано на рисунке А.16.6 в основном из-за избытка разбрызгивания. Этот избыток разбрызгивания может быть удален во время строительства и правильно размещен на острове.



А - вес льда

Б - нагрузка льда

В - плоскость разрушения кромки

Г - сопротивление сдвигу в точке соприкосновения льда с морским льдом

Д - внутреннее сопротивление сдвигу

Рисунок А.16.6 – Ледовая нагрузка и сопротивление острова

### **А.16.2.1.3 Механические свойства льда**

#### **А.16.2.1.3.1 Общая информация**

Свойства материалов искусственного острова определяют способность ледового острова оказывать сопротивление боковым нагрузкам и нести нагрузку на поверхности. Приведенная ниже информация, главным образом, относится к

брызговому льду, так как это основной материал, применяемый при строительстве искусственных островов.

#### **А.16.2.1.3.1 Механические свойства брызгового льда (ниже ватерлинии)**

При определении сопротивления сдвигу островов из брызгового льда, прочность на сдвиг брызгового льда ниже ватерлинии также должна быть учтена, поскольку, в зависимости от условий грунта основания, разрушение от сдвига может развиваться на плоскости, проходящей через весь остров.

Согласно имеющимся в ограниченном объеме данным по сдвиговой прочности брызгового льда ниже ватерлинии, данный лед ниже ватерлинии представляет собой материал с низким коэффициентом трения (когда рассматривается как сыпучий материал) и можно допустить, что прочность при сдвиге льда ниже ватерлинии равна сцеплению материала затопленного льда.

В таблице А.16.1 перечислены верхние и нижние границы по материалу затопленного льда или сдвиговой прочности насыщенного брызгового льда, измеренной различными методами.

Т а б л и ц а А.16.1 –Прочность подводной части брызгового льда

Методы	<i>Прочность подводного брызгового льда, кПа</i>
Данные измерителя давления	$99 < \tau_{ice,bw} < 145$
Испытание скважинным домкратом	$147 < \tau_{ice,bw} < 217$
Испытания плоским гидравлическим домкратом	$55 < \tau_{ice,bw} < 77$
Испытания с помощью конического пенетрометра	$40 < \tau_{ice,bw} < 50$

Сопротивление сдвигу брызгового льда ниже ватерлинии было принято как самое низкое зафиксированное сопротивление, и сопротивление сдвигу 40 кПа было выбрано для проектирования в 1980 г.г.

Серии испытаний с помощью конического пенетрометра были проведены на искусственном ледовом острове Карлук во время программы инспекции [278].

Среднее несущее давление ниже ватерлинии составило 3,8 МПа. Был зафиксирован следующий диапазон несущего давления:

$$1,6 \text{ МПа} < \text{несущая способность} < 6,3 \text{ МПа}$$

Принимая в качестве стандартной практики ([280]), что сопротивление сдвигу это 1/6 несущей способности, искусственный остров Karluk имеет следующие границы сопротивления сдвигу ниже ватерлинии:

$$267 \text{ кПа} < \tau_{ice,bw} < 1\,050 \text{ кПа}$$

Отсутствие пустот и общая сплошность льда на острове Karluk, а также высокие результаты испытаний с помощью конического пенетрометра показали высокую прочность на сдвиг. Взвешенное среднее сопротивление сдвигу с использованием всех указанных данных 56 кПа.

Брызговой лед имеет значительно более высокую сдвиговую прочность, чем песок на морском дне. Допуская сопротивление сдвигу 56 кПа, ледовый остров с радиусом сердцевины 100 м будет иметь внутреннее сопротивление сдвигу 439 МН. В общем, любые вычисления сдвиговой устойчивости приводят к разрушению грунта основания от сдвига.

#### **A.16.2.1.3.2 Механические свойства брызгового льда (выше ватерлинии)**

Согласно данным по искусственным островам и платформам из льда брызговой лед над водой ведет себя как материал Кулона-Мора, так что сопротивление сдвигу  $\tau_{ice,aw}$ , представлено зависимостью (A.16.6).

$$\tau_{ice,aw} = c_{ice,aw} + \sigma \tan \phi_{ice,aw}, \quad (\text{A.16.6})$$

где  $c_{ice,aw}$  – сила сцепления надводной части брызгового льда, которая принимается равной 283 кПа;

$\tan \phi_{ice,aw}$  – тангенциальная составляющая угла трения для надводной части брызгового льда, которая принимается равной 0,85;

$\sigma$  – нормальное давление, кПа.

Нормальное давление,  $\sigma$ , это вертикальный компонент напряжения льда в точке возникновения  $\tau_{ice,aw}$ . Указанный выше материал брызгового льда имеет сцепление 283 кПа по сравнению с 56 кПа для подводного материала.

**А.16.2.1.3.3 Взаимодействие лед–грунт**

При опускании на дно ледового острова путем утяжеления его слоями брызгового льда или другим методом основание острова вступает в контакт с морским дном. Это взаимодействие между льдом и грунтом очень важно при оценке сопротивляемости установленного на дно острова боковым ледовым нагрузкам. Если материал морского дна сыпучий, тогда сопротивление сдвигу дано в (А.16.7):

$$\tau_{is} = \sigma_{w,ice} + \phi_{is}, \quad (\text{А.16.7})$$

где  $\tau_{is}$  – это прочность льда на сдвиг, кПа;

$\sigma$  – нормальное давление, вызванное весом льда, кПа;

$\phi_{is}$  – угол внутреннего трения при взаимодействии льда/грунта, градусы.

Для фрикционного материала – сдвиговая прочность увеличивается с увеличением веса льдины. Так как лед под водой обладает плавучестью, вес считается от надводной части льда.

Вес (действующий на дно) ледового острова с круглой формой определяется зависимостью (А.16-8):

$$W_{ii} = \frac{\pi D_c^2}{4} \{ [\gamma_i h_{fb} + (\gamma_{is} - \gamma_w) d] \}, \quad (\text{А.16.8})$$

где  $D_c$  – диаметр сердцевины, м;

$\gamma_i$  – плотность брызгового льда над водой, кН/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{is}$  – плотность брызгового льда под водой, кН/м<sup>3</sup>;

$\gamma_w$  – плотность морской воды, кН/м<sup>3</sup>;

$h_{fb}$  – надводный борт острова, м;

$d$  – глубина воды, м.

Вес, действующий на дно, рассчитанный из зависимости (А.16.8), является силой в кН с указанными единицами параметра. Плотность брызгового льда над водой и под водой около 0,6 тонн/м<sup>3</sup>.

Если морское дно обладает сцеплением, тогда сопротивление сдвигу на поверхности контакта определено (А.16.9):

$$\tau_{is} = c_{soil}, \quad (\text{А.16.9})$$



где  $c_{soil}$  – сцепление грунта, кПа.

В этом случае сопротивление сдвигу на поверхности контакта не зависит от веса льдины или, по крайней мере, не оказывает влияние. Как только остров сел на дно, все подвижные частицы материалы дна могут быть консолидированы весом льдины, а это в свою очередь увеличивает сопротивление сдвигу. Степень улучшения сопротивления сдвигу зависит от исходной плотности грунта, его проницаемости и физической структуры.

Морское дно может также быть материалом Кулона-Мора. В этом случае при расчете сопротивления должны быть учтены как сцепление, так и трение.

#### **А.16.2.1.4 Поперечная устойчивость к ледовым нагрузкам**

Поперечная устойчивость опирающегося на грунт ледового острова должна учитывать нагрузки, показанные на рисунке А.16.6. Боковым ледовым нагрузкам противостоит сдвиговое сопротивление острова.

Остров, прежде всего, рассматривается, как тело большой жесткости и его сопротивление ледовым нагрузкам ( $R_{ii}$ ) определяется (А.16.10):

$$R_{ii} = \frac{\pi D_C^2}{4} \left[ c + \{ \gamma_i h_{fb} + (\gamma_{is} - \gamma_w) d \} \tan \phi \right] \quad (\text{А.16.10})$$

где  $D_C$  - диаметр сердцевины, м;

$\phi$  - угол донного трения, градусы;

$c$  - сцепление с дном, кПа;

$\gamma_i$  - плотность брызгового льда над водой, кН/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{is}$  - плотность брызгового льда под водой, кН/м<sup>3</sup>;

$\gamma_w$  - плотность морской воды, кН/м<sup>3</sup>;

$h_{fb}$  - надводный борт острова, м;

$d$  - глубина воды, м.

Сопротивление, рассчитанное согласно (А.16.10), выражено в кН с указанными единицами параметров.

Как показано на рисунке А.16.6, может произойти повреждение кромки, что изменит нагрузки на остров. Как правило, для повреждения кромки требуется одинаковый уровень нагрузки, что требуется для смятия надвигающегося льда.

Боковые нагрузки на остров, вызванные перемещением окружающего дрейфующего льда, рассчитываются таким же образом, как нагрузки для морских платформ. Ледовый остров будет эксплуатироваться только в течение зимы, то есть когда окружающие льдины относительно стационарны. Обычно толщина однолетнего льда используется для определения воздействия нагрузки, с шириной контакта во весь диаметр ватерлинии конструкции. Ледовая нагрузка, действующая на искусственный ледовый остров, вызванная льдами ( $F_{ii}$ ), определена из Уравнения (A.16.11):

$$F_{ii} = pwh, \quad (A.16.11)$$

где  $p$  - эффективное давление дробления льда, кПа;

$w$  - ширина контакта искусственного острова с грунтом, м;

$h$  - средняя толщина льда, м.

Если многолетняя льдина входит в контакт с островом, нагрузка должна рассчитываться с учетом толщины многолетнего льда и его ширины контакта с окружающим дрейфующим льдом. В случаях, когда многолетняя льдина из-за своей толщины может быть установлена на дно, она может стать стабилизатором перемещений льдин в этой зоне. Каждая ситуация должна быть оценена до начала строительства и использования конкретного острова.

#### **A.16.2.1.5 Несущая способность**

##### **A.16.2.1.5.1 Обеспечение несущей способности**

Брызговой лед доказал свои способности выдерживать собственный вес при опускании на морское дно и тяжелые нагрузки, такие как буровые установки. Это достигается методом строительства, при котором капли разбрызгиваемой воды не замерзают полностью, а процесс замораживания завершается, когда капли попадают на поверхность острова. Таким образом, достигается хорошее сцепление в брызговом льде. Это полностью противоположно материалам, таким как искусственный снег, который имеет низкое сцепление и является слабой несущей поверхностью.

##### **A.16.2.1.5.2 Несущая способность подводной части**

Испытания и наблюдения показывают, что брызговой лед является материалом со сцеплением. Из теории основания для круглых плит ([280]) несущая способность,  $q$ , в кПа определяется так:

$$q = 1,2\tau_{ice,bw} N_c, \quad (A.16.12)$$

где  $\tau_{ice,bw}$  – сопротивление сдвигу брызгового льда ниже уровня воды, кПа;

$$N_c = 5,14.$$

#### **A.16.2.1.5.3 Несущая способность надводной части**

Для зависимости (A.16.6) сопротивление сдвигу надводной части льдины было дано как 283 кПа. С использованием выражения (A.16.12), для несущей способности, сопротивление сдвигу для надводной части льда будет равно 1 747 кПа.

Сочетание нагрузки буровой установки и веса нанесенных слоев льда может вызвать вертикальную ползучесть во время бурения скважины. Деформация ползучести порядка 200 мм является обычной.

#### **A.16.2.1.6 Соображения касательно теплообмена при бурении скважины**

Для бурения скважины необходимо тщательно проанализировать перенос тепла на лед во время бурения. Невнимание к этому вопросу раньше приводило к значительному таянию льда под буровой установкой и почти к полной потере устойчивости. Изолирование (пассивное или активное) должно применяться в случае, если длительность буровой программы больше недели. Пассивные системы используют изоляцию, а активные системы используют раствор соли, постоянно нагнетающийся через отверстие между обсадной трубой и технической колонной (см. рисунок A.16.7) [279]. Выбранная система изолирования должна быть способна поддерживать температуру льда, прилегающего к обсадной трубе, ниже температуры таяния.

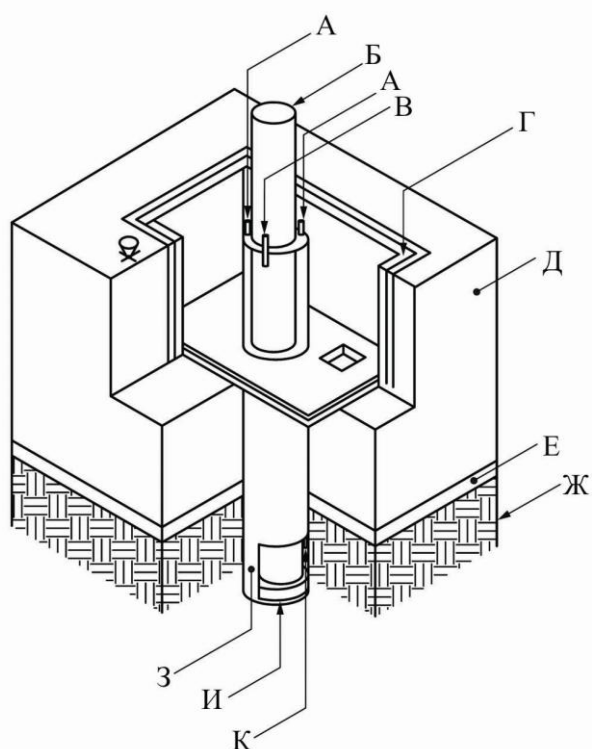
#### **A.16.2.1.7 Контроль и мониторинг во время строительства и бурения**

Руководство не предлагается.

#### **A.16.2.1.8 Соображения по безопасности**

Меры безопасности, охватывающие широкий спектр деятельности на плавучих льдинах и островах, являются важнейшими во время строительства и бурения. Список вопросов для рассмотрения должен иметь следующий вид:

- произойдут ли значительные перемещения (подвижки) льдов во время строительства;
- каковы будут последствия перемещения льда для подъездного пути и острова;
- какие меры могут быть приняты, и какие данные могут быть получены для прогнозирования перемещений;
- как необходимо отреагировать на перемещение;
- какое движение льда вероятно во время буровых работ на острове;
- подвергается ли безопасности скважины риску;
- будет ли закрыт доступ к острову для критически важных работ;
- имеются ли риски для плана действий в чрезвычайных ситуациях на скважине;
- какие меры устранения аварии доступны.



- А – труба закачки солевого раствора
- Б – обсадная труба
- В – труба возврата солевого раствора
- Г – устьевая шахта
- Д – брызговой лед
- Е – морской лед
- Ж – морское дно
- З – наружная обшивка
- И – цементная пробка
- К – выпуск солевого раствора

Рисунок А.16.7 – Охлаждаемая обсадная труба в разрезе

#### А.16.2.1.9 Контроль качества при строительстве и мониторинг

Мониторинг окружающего ледового покрова во время строительства является важнейшим для удачного завершения буровой программы. Этот мониторинг должен включать:

- ежедневные визуальные наблюдения, проводимые персоналом на месте;
- спутниковые изображения;
- постоянный мониторинг движения льда.

Порядок предупреждения об опасности должен быть внедрен и запланирован с осторожностью, чтобы критическая информация не содержала ложных аварийных сигналов.

На этапе строительства острова задачи контроля качества состоят в подтверждении того, что качество и количество материала соответствует требованиям проекта, и решаются путем измерения объема, температуры и плотности льда на месте (см. А.8.2.8.10), а также регистрации ключевых эксплуатационных параметров насоса. Ключевая деятельность во время строительства состоит из визуального инспектирования процесса разбрызгивания и самого острова. Толщина льда и объем, относящийся к строительству, могут быть измерены в заранее установленных местах с использованием маркерных труб, установленных во льду в начале строительства. Трубы должны наращиваться во время строительства, чтобы обеспечить доступ для измерений. Температура льда может быть измерена с использованием гирлянд термисторов.

#### **А.16.2.1.10 Контроль после окончания строительства**

После окончания строительства острова выполняется программа контроля, которая подтверждает, что расчетные условия для острова удовлетворительны или превышены. Программа, связанная с этой фазой включает:

- изучение информации по геометрии, плотности (см. А.8.2.8.10) и температуре, полученной при строительстве;
- выполнение выборочных проверок общей толщины льда на пунктах проверки толщины (около 10% станций проверки толщины должны быть проверены);

- проведение испытаний с помощью конического пенетрометра.

#### **A.16.2.1.11 Мониторинг во время бурения**

Основная деятельность связана с измерением осадки поверхности льдины, измерением температуры льда рядом с устьем скважины и обсадной трубой, мониторингом движения льда.

Положение острова, измеренное в заранее определенном месте, должно устанавливаться ежедневно. Также любое движение окружающего льда в отношении острова должно быть определено.

#### **A.16.2.2 Плавающие ледовые острова**

##### **A.16.2.2.1 Общая информация**

Как горная промышленность, так и нефтегазовая применяют плавающие ледовые платформы для выполнения буровых программ на шельфе. В нефтяной промышленности нагрузки до 1500 тонн устанавливались на этих платформах на время до 100 дней и более. Типовая толщина такой платформы составляет 6 м, а диаметр — порядка 150 м. Программы разведывания полезных ископаемых обычно используют более легкие установки для отбора керна на более тонких ледовых платформах. Ссылки по ледовым дорогам в A.16.1.1 применимы к этим платформам.

##### **A.16.2.2.2 Строительство**

Когда для строительства плавающего ледового острова применяется разбрызгивание, действуют те же процедуры и меры безопасности, что и указанные в A.16.2.1.2.

Основная разница в задачах строительства плавающей ледовой платформы в сравнении с платформой, опущенной на дно, это необходимость обеспечения того, чтобы лед в зоне изгибного напряжения платформы имел достаточную прочность, позволяющую безопасно выдержать проектное (обычно 550 кПа) изгибное напряжение. Ледовые платформы со свободной заливкой имеют прочный по всей высоте лед. Ледовые плавающие платформы с нанесенными слоями искусственного льда обычно формируются путем разбрызгивания льда на слой естественного льда до начала заливки. По этой причине зона растяжения основания лежит в самой

крепкой зоне естественного льда. Это обстоятельство вносит свой вклад в целостность конструкции платформ построенных методом разбрызгивания.

Операции свободного затопления на ледовой платформе могут выполняться с помощью электрических погружных насосов, когда требуется толщина около 3 метров. Это особенно полезно в холодном климате, где эксплуатация малых газовых или дизельных насосов может быть проблематичной. Малые газовые и дизельные насосы применяются в основном для свободного заливания, особенно на небольших ледовых платформах. Часто насосы с двигателем внутреннего сгорания переносятся вручную. Мобильные насосы, особенно, если применяются насосы с дизельным двигателем, устанавливаются на колеса.

#### **А.16.2.2.3 Проектирование для случаев кратковременных и долговременных нагрузок**

При проектировании ледовой платформы, должны учитываться как кратковременное напряжение, так и прогиб от действия длительных нагрузок, или ползучесть (Baudais et al[271 и 272], Masterson и Strandberg[299]).

Те же принципы анализа напряжений, которые указаны в А.16.1.2 для проектирования дорог на плавучей льдине, применимы для анализа напряжений, вызванных статической нагрузкой на ледовую платформу. Ползучесть льда платформы приводит к уменьшению напряжений (релаксации) с течением времени.

Надежный проект ледовой платформы требует, чтобы прогиб не превышал имеющегося надводного борта. Надводный борт как в условиях пресной воды, так и соленой воды составляет около 10 % толщины льда. В справочных материалах [268] представлено следующее уравнение для расчетного значения прогиба  $\delta$  под действием нагрузки:

$$\delta = \delta_0 \left( \frac{h_0}{h} \right)^3 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{1.5}, \quad (\text{А.16.13})$$

где  $\delta_0$  – прогиб для базового случая, м;

$h_0$  – толщина льда для базового случая, м;

$P_0$  –приложенная нагрузка для базового случая, Н;

$h$  – толщина льда в проектном случае, рассчитанная по критерию допустимого изгибного напряжения, м;

$P$  – приложенная нагрузка в проектном случае, Н.

Уравнение (А.16.13) может быть применено, только когда площадь распределения для двух случаев нагрузки и продолжительности нагрузки аналогична. Буровые установки, помещенные на льдину, в общем, имеют похожие компоновки оборудования и похожую продолжительность нагрузки для сравниваемого веса установок.

#### **А.16.2.2.4 Тепловой расчет**

Применимы те же условия и рекомендации, что и в А.16.2.1.6 .

#### **А.16.2.2.5 Мониторинг во время строительства и бурения**

Применимы те же условия и рекомендации, что и в А.16.2.1.7. Дальнейшие требования к мониторингу во время фазы бурения должны обеспечить, чтобы все зоны ледовой платформы оставались над уровнем моря. Вода, которая затапливает поверхность, создает дополнительную нагрузку на платформу и увеличивает прогиб. Также вода на поверхности приводит к нарушению безопасности рабочей зоны, что создает трудности при вывозе установки и другого материала и оборудования.

Измерения прочности льда с помощью внутрискважинного индентора являются хорошим индикатором изгибной прочности. Изгибная прочность льда составляет около 1/9-й ограниченной скважинной прочности при сжатии.

### **А.16.3 Защитные барьеры**

#### **А.16.3.1 Общие положения**

Поля ледовых обломков являются скоплениями фрагментов льда, которые образуются от плавучих льдин вокруг морских конструкций, островов или отлогих берегов на мелководье. В зависимости от глубины воды обломки могут внедряться в движущуюся льдину или оседать на морском дне. Когда движущиеся ледовые обломки взаимодействуют с конструкцией, ледовые нагрузки на конструкцию могут возрасти по сравнению с взаимодействием с ровным льдом. Это должно учитываться при проектировании конструкции. С другой стороны, ледовые обломки,



осевшие на дне вокруг конструкции, могут снизить ледовые нагрузки на конструкцию по причине переноса нагрузок на морское дно или изменения режима разрушения.

### **А.16.3.2 Ледовые защитные сооружения**

#### **А.16.3.2.1 Опирающийся на дно лед как защитное сооружение**

Естественное образование ледового навала обломков происходит обычно от взаимодействий тонкого льда в период заморозков и ранней зимой. Также установка защитных ограждений ото льда на мелководье может способствовать образованию ледового навала для защиты обустройства месторождения и добывающего оборудования.

Для конструкции, которая основана на грунтовой/каменной берме, ледовые обломки можно установить на подводной берме и передвинуть активную зону разрушений за пределы ледовых навалов [284]. Берма может также способствовать замедлению движения крупных ледяных образований и их посадке на дне. Реакция, создаваемая деформацией грунтовой бермы и подъемом льдины, рассеивает кинетическую энергию льдины и тем самым уменьшает потенциальную нагрузку на конструкцию [285].

Механизмы ледового взаимодействия определяются формой и геометрией конструкции, скоростью взаимодействия и геометрией ледового образования. Поэтому эффект ледовых нагромождений очень важен при расчете ледовой нагрузки [286].

Если опирающийся на дно ледовый навал значительно больше конструкции, которую он окружает, увеличивается эффективное поперечное сечение конструкции, которое подвергается общим ледовым нагрузкам. Потенциальное увеличение нагрузки уравнивается скользящим сопротивлением ледового навала, установленного на дно, и способом, которым нагрузки передаются через гряду льда. Режим разрушения льда изменяется при взаимодействии льда с обломками, что приводит к более низкому эффективному давлению разрушения льда и, соответственно, к низким общим ледовым нагрузкам [287].

Так как большая часть наблюдений за ледовыми навалами, закрепившимися на морском дне, показывает, что они остаются неподвижными, это позволяет создать некоторую степень защиты для морских конструкций. Ледовый валун может также защитить конструкцию от рисков надвига и перехлеста льда, а также уменьшить последствия динамических ледовых нагрузок [287].

Если проектирование конструкции основано на ледовой защите и барьерах для снижения нагрузок, эффективность барьеров должна быть подтверждена теоретическими расчетами, полномасштабными исследованиями или моделированием.

#### **A.16.3.2.2 Формирование ледовых нагромождений**

Механизм образования скоплений ледовых обломков достаточно сложный и во многом неизученный. В некоторых случаях обломки образуют пологий откос приближающегося ледового массива, а тонкие ледовые покровы разрушаются из-за изгиба. В других случаях движущийся ледяной покров проникает в скопление ледовых обломков и разрушается от изгиба по причине разницы в плавучести и гравитационных сил.

В период формирования ледового массива ледяной покров обычно тонкий по сравнению с шириной острова или морской платформы. Если куски от разрушенной льдины не расчищаются вокруг платформы/острова по мере движения льдов, фрагменты льдины собираются в поля ледовых обломков [288]. Сводные данные по высоте ледовых навалов в море Бофорта, Балтийском и Каспийском морях приведены в [289].

Для широких конструкций на шельфе формирование ледовых обломков может значительно влиять на режим разрушения льда и ледовые нагрузки. Когда лед становится слишком тонким для разрушения от изгиба, он начинает разрушаться в режиме дробления при сильных напряжениях льда. Напряжение сжатия в активной зоне сложно прогнозировать, и оно, вероятно, ниже, чем для нешироких конструкций гравитационного основания [290]. В таких случаях должен применяться опыт полевых измерений.

#### **A.16.3.2.3 Ледовые барьеры**

Севшие на мель ледовые обломки могут использоваться в качестве защитного барьера для разведки на шельфе и установки. Ледовые барьеры могут формироваться из севших на мель ледовых обломков или увеличиваться с помощью технологий заливания или разбрызгивания [287]. Эти технологии хорошо показали себя в море Бофорта, особенно при строительстве защитных ледовых подушек (см. А.16.2).

При строительстве ледовых барьеров очень важно качество контакта льда с грунтом. Если морское дно состоит из материала со значительным трением (например, песка), тогда ледовый барьер должен строиться с меньшим поперечным сечением и высоким надводным бортом для минимизации поперечной ледовой нагрузки. Если морское дно представляет связанный грунт, предпочтительнее более широкие ледовые барьеры с меньшей высотой надводного борта [287].

В случае, когда барьер построен на гладком ровном ледовом покрове, ледяной покров может затруднять дренаж и укрепление связанного грунта. В дополнение к влиянию гладкого льда на взаимодействие льда/грунта необходимо учесть сдвиговое сопротивление.

Когда ледовый барьер строится сверху гладкого ледового покрова, он может немного сместиться под воздействием окружающих льдин, в зависимости от коэффициента сжатия ледового массива, который воздействует на барьер и характера поверхности льда.

Глубина воды и колебания уровня воды являются важными факторами при оценке сопротивления скольжения ледового обломка. Опыт, полученный в море Бофорта, показывает, что поля севших на мель ледовых обломков формируются вокруг конструкции, если берма создается на отметке 15 м или меньше, а обломки простираются на глубину около 18 – 20 м ниже флангов бермы [287]. Стационарное оседание ледового массива на дно более вероятно на небольших глубинах.

В общем, ледовые обломки, образовавшиеся в начале зимы из тонких ледовых покровов, не имеют такой высокой надводной части, как обломки, образовавшиеся из более толстого льда позднее. Его топография (т.е. отношение между высотой

надводной части и толщиной севшего на мель ледового валуна) изучена не так хорошо, как, например, у гряды торосов из морского льда.

Защитные барьеры из севших на мель ледовых обломков должны быть установлены таким образом, чтобы оказывать сопротивление поперечным ледовым нагрузкам. Такие нагрузки могут вызывать сбой четырьмя способами:

- скольжение вдоль неустойчивой поверхности через лед;
- скольжение вдоль дна взаимодействия лед-грунт;
- скольжение вдоль неустойчивой поверхности через грунт;
- пассивное разрушение кромки.

Сопротивление скольжению ледового массива зависит от силы взаимодействия между ледовыми блоками и поверхностью дна. Это сравнительно точно определено, если массив садится на берму из песка. Когда груда ледовых обломков садится на мель естественного морского дна, сила взаимодействия часто неопределенна и проектировщики должны выполнить тщательные инженерно-геологические испытания и оценку.

#### **А.16.3.2.4 Ледовые нагрузки и взаимодействие лед-барьер**

Знание свойств ледовых торосов нагромождений очень важно для изучения передачи ледовых нагрузок. Торос обычно состоит из паруса (надводной части), повторно замороженного слоя и киля. В зонах с низкой высотой надводной части и минимумом снега, теплоотдача обычно большая, а повторно смерзшийся слой может достигать толщины, вдвое превышающей уровень, характерный для региона. Сплошность повторно замороженного слоя также важна в этом отношении. Из-за трудностей бурения через высокие торосы, к настоящему времени получено очень мало данных по этому вопросу [287]

Прочность льда и модуль упругости повторно замороженного слоя можно получить из результатов измерения прочности торосов на месте. Измерение солености и температуры воды не является надежным средством определения прочности ледяных глыб. Свойства севших на мель килей являются ключевыми при определении механизма передачи ледовых нагрузок на морское дно или подводную

берму. На основании возросшего количества исследований поведения тороса было сделано допущение о том, что кили имеют достаточную прочность и жесткость для эффективной передачи большей части ледовых нагрузок на морское дно или берму. Считается, что низкая температура во время процесса формирования тороса и высокое напряжение при посадке на мель могут вызвать сцепление фрагментов ледяных блоков и образование связанной массы. Существуют свидетельства того, что прочность при этом действительно увеличивается. В местах, где поля однолетних торосов садились на мель, на морском дне наблюдались мелкие углубления, что указывает на возможность создания напряжения достаточной силы.

В то время как лабораторные исследования прочности торосов привели к описанию их как материала Мора-Кулона, опубликованные значения сцепления и внутреннего угла трения имеют широкий диапазон. Зарегистрированные углы внутреннего трения находятся в диапазоне от  $11^\circ$  до  $67^\circ$ , в то время как величина сцепления — от 0 до 25 кПа.

Большая часть измерений на месте и наблюдений в море Бофорта подтверждают вывод, что сразу после образования вокруг конструкции поля ледяных обломков нагрузка, передаваемая на конструкцию, часто равна нулю, и даже когда нагрузка передается, ее величина составляет менее 30% от приложенной ледовой нагрузки. Наблюдались случаи передачи более 50% приложенной нагрузки [287]. Было сделано предположение, что в этих случаях повторно замороженный слой был, вероятно, более сплошной, чем обычно.

Существует несколько примеров, когда в весеннее время с теплым льдом передаваемая нагрузка выше на 50%. Эта ситуация соответствует результатам моделирования, которые, в общем, показывают более высокие уровни передачи нагрузки, чем в ситуациях с нормальной зимой.

Опыт, полученный в полевых исследованиях, показывает, что севшие на мель торосы рассеивают или ликвидируют передачу значительных динамических нагрузок. Ослабление динамического воздействия, вызванного льдом, может быть отнесено к изменению режима разрушения льда, но присоединенная масса и ослабление тороса также предположительно имеют благотворное влияние.

Торосы деформируются со временем под действием ледовых нагрузок. Наиболее значительные деформации – это вертикальная осадка (ползучесть) после образования, которая может быть больше 1 м. Боковые смещения часто связаны с вертикальной осадкой, но также с испытываемыми боковыми нагрузками.

Полевые исследования передачи ледовой нагрузки через поля торосов достаточно сложно провести. Теоретические расчеты сопротивления поля севших на мель торосов и эффективности защитных конструкций от ледовых нагрузок не демонстрируют достаточной достоверности. Следовательно, проектировщик должен применять моделирование в качестве альтернативы, чтобы дополнить или проверить такие расчеты. Необходимо также принимать во внимание лабораторное моделирование процессов образования торосов. А также необходимо уделить внимание подходящему масштабированию конструкции и окружающей ледовой обстановке.

### **A.16.3.3 Способы снижения ледовых нагрузок**

#### **A.16.3.3.1 Регулирование воздействия льдов и защитные мероприятия**

Методы пассивной защиты и контроля ледового воздействия могут использоваться для снижения риска или повышения класса безопасности, относящегося к данной конструкции. Они могут быть применены на стадии проектирования или эксплуатации в период расчетного срока эксплуатации конструкции.

Методы контроля и защиты также могут применяться для снижения ледовых нагрузок на конструкцию. Предпринималось несколько попыток, описанных ниже:

– Вырез траншеи или рва во льду вокруг конструкции. Этот подход может быть эффективным, только если:

- траншея защищена от влаги или от замерзания; и
- траншея противостоит внеплоскостным подвижкам льда. Эта технология имеет следующие ограничения:
  - одноразовое решение; и
  - лед может треснуть, траншея заполнится водой и замерзнет.

Технология траншей также может оказать негативное влияние, так как она может спровоцировать надвиг льда на рабочую поверхность буровой платформы, которую она призвана защищать.

- Установка барьеров перед конструкцией для того, чтобы инициировать посадку на мель ледяных обломков А.16.3.2.

- Использование вспомогательных конструкций для ослабления ледовых нагрузок на саму буровую платформу. Вокруг Sunkar, буровой платформы в Каспийском море, была возведена защитная система, которая имела двойное назначение:

- увеличение сопротивления скольжению: через образование гряды ледяных обломков на грунте, в случае подвижек льда; и путем набрызгивания льда на вспомогательные конструкции [291].

- предоставление относительно свободного ото льда пути доступа к платформе Sunkar для вспомогательных судов.

Различные концепции использовались для вспомогательных конструкций, включая баржи и волноломы откосного профиля из скал [292, 293].

- Брызговой лед.

- Брызговой лед использовался для увеличения сопротивления сдвигу барж, развернутых у платформы Sunkar, для увеличения сопротивления скольжению [291].

- Формирование гряд перед конструкцией для увеличения ее сопротивления скольжению и контроля формирования ледяных глыб у конструкции. Это также было выполнено у Sunkar [294, 295, 296]. Более общие модельные испытания этой концепции были выполнены [297].

- Различные вариации периметра конструкции. Опора с гравитационным основанием Hibernia была построена с локальными ступенчатыми углублениями по всему периметру. Это было сделано для снижения общего давления льда путем увеличения времени замедления движения воздействующего айсберга.

– Взрывы. Взрывы рассматривались для больших масс льда (т.е. айсбергов и ледовых островов) в течение многих лет, начиная с 1926 г. Этот метод никогда не использовался в качестве метода защиты ото льда, принимая во внимание большое количество ограничений и условий.

#### **А.16.3.3.2 Смягчение последствий вторжения льда**

Методы контроля и защиты от действия льда, перечисленные в А.16.3.3.1 также могут использоваться для защиты от вторжения льда.

Надвиг льда является комплексным действием, так как многие факторы влияют на взаимодействие, и только поверхностное понимание процессов существует в настоящий момент. В справочном документе [297] предложены следующие руководящие принципы:

- пологие откосы более подвержены надвигу льда;
- пологие откосы с несколькими неровностями более подвержены надвигу льда;
- надвиг льда более вероятен в сочетании с приливными колебаниями, штормовым нагоном или гравитационными волнами, которые ломают соединение льда с береговой линией и поднимают ледяной покров.

В документе [298] отмечается, что «неровные, изрезанные или крутые берега имеют тенденцию вызывать нагон льда, когда начинается ледоход на берег».

Следующие методы ледового контроля доступны для защиты от вторжения льда:

- Проектирование обустройства на острове. Это включает проектирование островов таким образом, чтобы они имели дорогу по периметру и установку наиболее критического оборудования ближе к внешним границам острова. Этот подход наиболее применим для намывных или искусственных островов. Дорога по периметру обеспечивает доступ по всему острову, а также защиту от вторжения льда на остров, которое подвергает риску производственные мощности.
- Строительство буровых установок кессонного типа с достаточным надводным бортом, чтобы мощности на них могли бы быть защищены от вторжения



льда. Некоторые конструкции, такие как MolikPaq и кессон, были построены со стальными ледовым дефлекторами по всему периметру в верхней части кессона [299, 286].

– Проектирование откосов и граней буровых островов таким образом, чтобы они вызывали нестабильность обломков льда вторгающегося ледяного покрова, приводя к образованию ледяных обломков, таким образом, предотвращая дальнейшее вторжение на остров. Методы для достижения этого включают:

- использование откосов с различными вертикальными профилями, такими как: «выгиб» в откосе, который приводит к неустойчивости приближающихся обломков льда; или крутой подъем, который может вызвать изменение режима разрушения льда.
- установка препятствий вдоль лицевой грани, например стальных свай для сдерживания надвига льда, («танковые ловушки» используемые на острове Challenge [300], являются разновидностью этой концепции, поскольку должны способствовать формированию ледяных обломков, предотвращающих надвиг льда).

Поскольку надвиг льда является проблемой локального масштаба, степень уязвимости (см. 7.1.4) объектов, которые могут подвергаться надвигу, следует определять индивидуально. Например, места хранения безопасных материалов без обслуживающего персонала не нужно защищать от надвига или нагона льда. Хранилища углеводородов, добывающие скважины и участки проведения работ, укомплектованные персоналом, необходимо проектировать согласно положениям глав 7 и 8 настоящего международного стандарта.

## **A.16.4 Измерение давления льда и ледовых нагрузок**

### **A.16.4.1 Общие положения**

Измерения ледовых нагрузок создали основу для многих важных достижений в ледовом проектировании морских установок, и действующие технические нормы расчета показывают, что имеет место "эмпирический подход к полномасштабным данным. Измерения ледовых нагрузок часто является наилучшим подходом к

определению проектных ледовых нагрузок, и предпринимаются для достижения двух общих целей, указанных в таблице А.16.2.

#### А.16.4.2 Методика измерений

Большой выбор методик измерения ледовых нагрузок используется в настоящее время – см. документ [301] для описания некоторых из них.

Универсальные системы используются в следующих местах:

- системе измерений на SSDC [302].
- системе измерений на MolikPaq, развернутой в море Бофорта [299].
- системе измерений на MolikPaq, развернутой в Охотском море [303];
- системе отслеживания, используемой на мосту Конфедерации [304];
- система отслеживания на волноломе моста Hondo[305, 306];
- система отслеживания на волноломе маяка Yamachiche[306]
- система измерения на конструкции в Печорском море [307]
- LOLEIF/STRICE[308].

Т а б л и ц а А.16.2 – Обзор целей и требований измерения ледовой нагрузки

<i>Ключевые требования к системе измерений</i>	<i>Общее назначение и цель</i>	
	<i>Подтверждение безопасности существующей конструкции</i>	<i>Усовершенствованные критерии проектирования для будущих конструкций</i>
Данные в реальном масштабе времени	Важны	Не требуются
Алгоритмы интерпретации данных	Важны и необходимы в реальном времени	Необходимы, но не в реальном времени

Окончание таблицы А.16.2.

Частота сбора данных и аварийные уровни	Данные в реальном масштабе времени более важны, чем данные с высокой частотой, если компромисс необходим Аварийные уровни необходимы	Зависит от режима разрушения льда: высокочастотные данные (>10 Гц на канал) необходимо, если режимом разрушения льда является дробление Аварийные уровни не требуются
Измерение общей нагрузки против локальной нагрузки	Общие нагрузки обычно самые важные	Зависит от применения – данные могут потребоваться для одной или обеих нагрузок
Возможно несколько режимов разрушения, таких как скольжение вдоль различных плоскостей разрушения или переворачивание. Системы наблюдения должны проектироваться с учетом этого, и работать во взаимодействии с другими системами наблюдения на месте, например, для основания.		

Наиболее подходящая система должна выбираться исходя из конструкции, метеорологических условий на месте работ и целей проекта. В общем, доступные полевые методики могут быть классифицированы по:

- Измерениям напряжения или натяжения во льду. Для выполнения этой задачи были разработаны многие контрольно-измерительные приборы [309, 310, 301].
- Измерениям ответной реакции конструкции. В общем, этого можно добиться с помощью:
  - измерений растяжений, деформаций или сдвигов конструкции, включая ее основание;
  - установки панелей, чувствительных к давлению и нагрузке на конструкцию;
  - измерений ускорений конструкции в случаях динамической нагрузки.

### **А.16.4.3 Ограничения и требования к измерительному оборудованию**

Наиболее подходящая методика измерений ледовых нагрузок зависит от факторов, таких как тип конструкции, целей измерения, взаимодействия льда – конструкции. В принципе, такие конструкции можно классифицировать по следующим категориям:

- Конструкции в относительно неподвижном льде. В этом случае сдвиги льда, которые будут происходить, пока конструкция стоит во льдах, очевидно, вызовут наибольшие ледовые нагрузки. Искусственные острова, используемые для разведки в море Бофорта, являются примером этого случая. Измерители напряжения льда в естественных условиях обычно используются для определения ледовых нагрузок в этом случае.

- Конструкции в движущихся льдах. Примеры включают:
  - кессонные буровые установки в море Бофорта, которые размещены относительно далеко в море по сравнению с искусственными островами. Каталог этих данных приведен в документе [306];
  - многоопорные установки и установки гравитационного типа в других местах, таких как залив Кука[311], море Бохай [312] и Охотское море[313];
  - мостовые опоры: для большей части крупных мостов проектные нагрузки вызываются во время вскрытия воды, которое вызывает ледоход [313; 305] (недавно построенный мост Конфедерации подвергается воздействию движущегося льда почти всю зиму [304]);
  - волноломы маяков и маяки [314, 308];
  - боны для борьбы с обледенением, установленные в Lac St. Pierre [315] и на озере Эри [316];
  - исследовательские проекты, направленные на: измерение нагрузок многолетнего льда на острове Ханс [317], [318]; измерение движущих сил льдов (пример на Katie's Floeberg, в Канадской Арктике, на

Лабрадоре и в районе Шпицбергена [319]; измерение нагрузок, вызванных айсбергами [320]; измерение давления вдавливания индентора на о. Хоккайдо, Япония [321, 322] и в различных местах в Канадской Арктике [323, 324, 325]).

Данные по нагрузкам ото льда были получены для почти всех случаев с использованием измерений реакции конструкции. Методы, используемые для измерения реакции конструкции для этих случаев, включали панели или датчики на конструкции, наклономеры, измерители ускорения и датчики деформации на конструкции.

Использование измерителей напряжения и растяжения льда на месте, как правило, нецелесообразно при значительном движении льда. Кроме того, в некоторых случаях включающих движение льда (например, установки кессонного типа в море Бофорта и некоторые маяки), прибрежный навал льда, образовавшийся вокруг конструкции и влияющий на нагрузки, также оказывал влияние на саму конструкцию.

Измерения движущих сил дрейфующего льда в некотором случае уникально, т.к. измерители напряжения на местах были применены для определения воздействий внутри льда.

Требования к системе измерения нагрузок ото льда также зависят от типа разрушения льда, которое ожидается. Типы разрушений включают дробление, изгиб, продольный прогиб, надвиг, расслоение и смешанный режим. Системы с наивысшими частотными характеристиками и нормами регистрации данных необходимы для разрушения дроблением, при котором эффект может происходить на частоте более 10 Гц.

Более того, для широких конструкций разрушение льда может чередоваться от одновременного по всей ширине конструкции до неодновременного, что оказывает влияние на распределение нагрузки [299].

Требования к системам измерения нагрузки зависят от того, предназначены ли они для измерения общей или локальной нагрузки. Некоторые системы, такие как измерители ускорения, наклономеры и измерители уровня большого масштаба

могут измерить лишь общие нагрузки. Другие, например панели и датчики деформаций (в зависимости от типа конструкции) измеряют локальные нагрузки и давление, и они должны быть объединены для определения действия общей нагрузки.

Для всех систем необходима калибровка. Наиболее соответствующий метод калибровки зависит от типа системы измерения и целей измерения.

Временная стабильность инструментов является дополнительным фактором, требующим учета. Дрейф – это самая большая задача в случаях, когда установка может находиться в контакте со льдом длительный период времени, как например установки кессонного типа в море Бофорта, приводя к тому, что истинные нулевые уровни трудно достижимы, и необходима регулярная проверка.

#### **A.16.4.4 Документирование состояния окружающей среды**

Ледовая нагрузка или измеренные давления должны быть дополнены сбором данных для определения ледовых условий и состояний окружающей среды. Это особенно важно для проектов, связанных с измерением, выполняемых для разработки критериев усовершенствованной конструкции будущих проектов, хотя эти данные также помогают обеспечивать контроль реальности для мониторинга безопасности существующей конструкции.

Ключевые способствующие факторы, особенно те, что являются случайными, такими как толщина льда, должны быть измерены. Это особенно важно для последующей вероятностной обработки данных, и ожидаемых ледовых нагрузок или давлений на месте.

#### **A.16.4.5 Наблюдение за процессом взаимодействия ледяного покрова с сооружением**

Знание того, что произошло, является фундаментальным требованием для понимания любых данных по ледовой нагрузке, которые собраны. Поскольку необходимая информация по окружающей среде меняется от случая к случаю, только общие предложения приведены здесь.

Очень важно, что собранная информация должна определять и описывать сценарий нагрузки, который имел место. Ключевые вопросы включают:

- ледяное образование и тип (например, однолетние или многолетние ледяные покровы, гряды торосов, наслоенный лед, ледовые заторы и т.д.);
- морфологию ледяного образования (например, толщину, размер льдины, размеры элемента, форму);
- режим(ы) разрушения льда, которые имели место (например, дробление, изгиб, продольный прогиб, раскалывание, одновременное и (или) неодновременное разрушение, надвиг, смешанный режим и т.д.);
- движение льда.

#### А.16.4.6 Базы данных и справочные материалы по ледовым нагрузкам

Базы данных по ледовым нагрузкам полезны при оценке ожидаемых нагрузок и давлений на конструкцию. В дополнение к обычным требованиям для баз данных (например, точность, экстенсивность, возможности поиска и выдачи информации, возможности добавлять новые данные, удобство для пользователей, совместимость компьютерного программного обеспечения в отношении обычных операционных систем), базы данных по ледовым нагрузкам должны содержать:

- количественные данные по ледовой нагрузке / или давлению, включая:
  - измеренные нагрузки и/или давления;
  - зоны, для которых они были измерены, или к которым они применимы;
  - динамику во времени, и/или частотный состав измеренных данных;
- информацию, описывающую конструкцию, или место, где были получены данные;
- описание сценария нагрузки;
- информацию, определяющую условия окружающей среды, которые вызвали нагрузки и/или давления.

Были разработаны различные базы данных по ледовым нагрузкам и давлениям, соответствующие перечисленным общим требованиям. В документе

[326] содержится одна из первых общедоступных баз данных. Она содержит информацию для:

- буровых конструкций и других объектов в море Бофорта и Арктики;
- буровых платформ и конструкций в других местах (например, заливе Кука, Бохайском заливе);
- судов в море Бофорта;
- маяков на р. Св. Лаврентия и Балтике;
- промежуточных опор мостов.

Недавно была создана наиболее исчерпывающая база данных, которая содержит информацию для широкого спектра конструкций [306]. Опубликован детальный отчет для общего пользования, описывающий информацию, содержащуюся в базе данных.

В дополнение к электронным базам данных, было выпущено несколько сводных отчетов, документирующих измеренные ледовые нагрузки и давление. Несмотря на то, что эти краткие обзоры не такие обширные, как электронные базы данных, они, тем не менее, дают полезную информацию для подмножеств случаев, составляющих проблему ледовой нагрузки. В материалах [327] и [328] представлена информационная сводка для буровых установок кессонного типа, используемых в море Бофорта. В материалах [329] представлен обзор ледовых нагрузок для некоторых узких конструкций (например, свай, опор мостов и маяков). В материалах [330] представлен краткий обзор информации относительно локальных давлений льда.

## **A.16.5 Моделирование в ледовом бассейне**

### **A.16.5.1 Общие положения**

Бассейны для модельных испытаний льда могут использоваться для исследования различных взаимодействий ледяных структур и дают возможность изучения и визуализации относительно сложных проблем (которые сложно проанализировать другими методами) в малом масштабе (т.е. в масштабе меньше фактического).



В общем случае, ледовые модельные испытания обычно проводятся для измерения общих ледовых нагрузок со стороны движущихся льдов, предполагаемых ледовых нагрузок и/или предполагаемых режимов взаимодействия со льдами (например, режимов разрушения льда, надвига льда, создания ледяных глыб вокруг сооружения, очистки акватории ото льдов вокруг конструкции, создания ледовых пробок и т.д.) Ледовые модельные испытания не использовались для изучения статических ледовых нагрузок, например, возникающих в результате теплового воздействия. Кроме того, ледовые модельные испытания, как правило, не используются для изучения локальных нагрузок, например, локальных давлений льда.

Бассейны для модельных испытаний льда — это гибкое средство, которое применяется для изучения многих случаев взаимодействия конструкций со льдом, например

- для испытания различных типов конструкций, в число которых входят:
  - крупные вертикальные или многогранные кессоны;
  - восходящие и нисходящие ледокольные конусы;
  - узкие и широкие конструкции;
  - многоопорные конструкции;
  - бермы;
  - конструкции, поставленные на якорь и установленные на гравитационных опорах;
  - вспомогательные конструкции, которые предназначены для размещения около буровых установок с целью ледовой защиты этих установок и, возможно, создания относительно свободного ото льда участка для швартовки судов;
- для изучения взаимодействий с конструкциями различных ледяных структур, в число которых входят:
  - ледяные плиты;
  - однолетние торосы;

- многолетние торосы;
- битый лед и ледяные поля.

В таблице А.16.3 перечислены общие ледовые процессы, интерпретированные с помощью физического моделирования, и обозначены наиболее важные переменные, влияющие на них. Достоверность модели зависит от точности, с которой модели воспроизводят эти переменные. Необходимо учесть, что ситуации моделирования могут также содержать комбинацию нескольких процессов. Соответственно переменные могут быть сгруппированы различным образом, как показано в таблице А.16.3 [331].

Было выполнено только ограниченное число сравнений результатов, полученных для масштабных моделей, с реальными конструкциями, хотя несколько исследований корреляции было проведено для ледоколов. Ледовые модельные испытания проводились с различным масштабом для стационарных ледокольных конструкций конической формы. Для кессона Куллок (крупной наклонной плавучей ледокольной конструкции конической формы) было выполнено сравнение результатов модельных испытаний, проведенных в различных бассейнах для модельных испытаний и данных полевых наблюдений, собранных в море Бофорта.

Тип ледовой проблемы наиболее важен при планировании программы модельных испытаний. Не все ледовые проблемы можно достоверно изучить при помощи современных методов моделирования в бассейнах для льда. Программа модельных испытаний льда должна быть нацелена на изучение конкретной проблемы взаимодействия со льдами, представляющей интерес.

Иногда предпочтительнее провести в бассейне для льда испытания упрощенной модели, позволяющей проанализировать базовую проблему, а затем использовать эти результаты для оценки общей проблемы, которая гораздо более сложная.

Предыдущие исследования надвига льда и формирования торосов являются примерами использования такого подхода. Первоначально, были выполнены испытания простых моделей для исследования процессов надвига льда и

формирования торосов. Эти базовые данные явились частью информационной базы, которая использовалась для решения более сложных проблем:

- проектирование островов и конструкций, позволяющих избежать проблем надвига;
- количественная оценка движущих воздействий пакового льда и разработка вспомогательных конструкций, предназначенных для формирования защитного барьера из ледяных глыб вокруг буровых платформ в море Бофорта.

При планировании программы проведения модельных испытаний льда необходимо учесть еще один важный момент, который заключается в недостоверности масштабирования и артефактах моделирования. Эти проблемы могут возникать из-за несовершенства используемых для моделирования материалов. Некоторые виды льда, используемого для моделирования, обладают лучшей способностью имитации некоторых видов взаимодействия с ледяными структурами, по сравнению с другими видами льда.

Т а б л и ц а А.16.3 – Ледовые процессы и важные переменные, которые необходимо смоделировать

<i>Моделируемый ледовый процесс</i>	<i>Определяющие переменные</i>
Прогиб ледяного покрова	прочность на изгиб льда модуль упругости скорость нагрузки толщина льда
Образование торосов	скорость исходного ледяного покрова толщина льда исходного ледяного покрова трение льда об лед прочность ледяного покрова (на изгиб, на сжатие, на срез) глубина киля высота паруса консолидированный слой

Взаимодействие льда с конструкцией	жесткость конструкции динамические характеристики конструкции/швартовой системы скорость ледяного покрова толщина льда прочность ледяного покрова (на изгиб, на сжатие, на срез) трение льда об лед, льда о конструкцию режим разрушения (дробящий, изгибный, сдвиг) размеры и свойства торосов
Моделирование работы ледоколов	скорость судна трение льда об лед, льда о корпус толщина льда прочность ледяного покрова (на изгиб, на сжатие, на срез) размер фрагмента льда перемещение обломков льда рядом с корпусом и винтом режим разрушения (дробящий, изгибный, сдвиг) размеры и свойства торосов

#### А.16.5.2 Масштабирование

В случаях, когда для анализа взаимодействий с конструкцией используются испытания методом моделирования, необходимо выбрать подходящие взаимосвязи масштабирования, отражающие преобладающие механизмы или процессы создания ледовой нагрузки или реакции на эту нагрузку. В физическом моделировании взаимодействий льда и конструкции для сохранения связи между опытным образцом и моделью используется подобие Фруда (соотношение инерционной и гравитационной сил) и подобие Коши (соотношение инерционной силы и силы упругости)[332]. Значительное усилие было потрачено на разработку модели льда с механическими свойствами, приведенными в соответствие с опытным образцом льда с аналогичным поведением при разрушении. Также может быть тщательное моделирование формы конструкции, жесткости и характеристик поверхности.

Только при условии, что режимы разрушения, рассчитанные для опытного образца, правильно воспроизведены, модельные испытания могут обеспечить важный вклад в процесс проектирования.

Оптимальные результаты моделирования взаимодействия с ледяными структурами можно получить только в определенном диапазоне коэффициентов масштабирования ледовой модели, как правило, в диапазоне от 10 до 50. Результаты испытаний, проведенных со слишком большими коэффициентами масштабирования, с высокой степенью вероятности содержат связанные с моделированием искажения.

Масштабирование выполняется путем сохранения следующих безразмерных величин:

$$F_r = \frac{v}{gL}, \quad (\text{A.16.14})$$

(соотношение инерционной и гравитационной сил)

$$C_a = \frac{v^2 \rho_w}{E}, \quad (\text{A.16.15})$$

(соотношение инерционной силы и силы упругости)

где  $F_r$  – число Фруда;

$C_a$  – число Коши;

$v$  – скорость, м/с;

$g$  – гравитационное ускорение, м/с<sup>2</sup>;

$L$  – длина, м;

$\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$E$  – модуль упругости льда (модуль Юнга), МПа.

Поскольку инерционная и гравитационная силы управляют свободным движением, число Фруда используется как основной критерий подобия при моделировании в ледовых бассейнах. Число Коши обеспечивает необходимо масштабирование параметров материалов. Закон Рейнольдса, который определяет влияние вязкости, не может быть удовлетворен одновременно в модельных

испытаниях. Поскольку влияние вязкости в ледовых моделях относительно мало при низких скоростях, законом Рейнольдса обычно пренебрегают.

Для того чтобы удовлетворить законы Фруда и Коши, различные геометрические и физические количества тестируемых объектов должны быть приведены к масштабу, как показано в таблице А.16.4.

Т а б л и ц а А . 1 6 . 4 – Взаимоотношения масштабов

<i>Физические значения</i>	<i>Масштабная модель</i>	<i>Полный масштаб</i>
Толщина льда	$h'$	$h = \lambda h'$
Прочность на	$\sigma_f$	$\sigma f = \lambda \sigma_f'$
Модуль	$E'$	$E = \lambda E'$
Плотность воды	$\rho_w'$	$\rho_w = \rho_w'$
Плотность льда	$\rho_i'$	$\rho_i = \rho_i'$
Время	$t'$	$t = \lambda^{1/2} t'$
Скорость	$v'$	$v = \lambda^{1/2} v'$
Сила	$F'$	$F = \lambda^3 F'$
Коэффициент	$\mu'$	$\mu = \mu'$
П р и м е ч а н и е – $\lambda$ - геометрический коэффициент масштабирования		

### А.16.5.3 Методы проведения испытаний и используемое оборудование

#### А.16.5.3.1 Типы модельного льда

Природный морской лед ведет себя как хрупкий или вязкий материал в зависимости от своей температуры, солёности и скорости деформации. Основные механические свойства природного льда, такие как прочность и деформация также зависят от скорости деформации, температуры льда, и содержания соли во льде. Прочность на изгиб обычно рассматривается независимо от скорости деформации. В идеале модель льда должна вести себя таким же образом, что и при применении закона моделирования по критерию подобия Фруда, т.е. прочности должны быть соотнесены с фактором линейного масштаба  $\lambda$ .

За прошедшие десятилетия значительные усилия были предприняты по определению идеального материала для модели льда. При изготовлении льда

модели использовались различные подходы, в том числе производство искусственного льда, гибридного льда и замороженного льда. В настоящее время наиболее широко используется замороженный лед. Для правильного масштабирования свойств льда в него добавляется хлорид натрия или другой химический реактив, например, этиленгликоль или поверхностно-активные вещества. Для производства мелкокристаллического столбчатого льда был разработан метод влажного засева. Этот лед производится методом разбрызгивания соляного раствора во время всего процесса роста льда, приводящего к формированию льда с гранулированной структурой, аналогичной снежному льду. Дальнейшее развитие моделей льда включает нагнетание в воду бассейна пузырьков воздуха, которые захватываются растущими кристаллами льда, что повышает хрупкость льда и снижает его плотность.

Важно отметить, что стандартный «лед для моделирования» еще не разработан и следует выбирать его по своему усмотрению с учетом необходимости обеспечить пригодность использования этого льда для исследуемого взаимодействия льда и конструкций в сочетании с другими факторами, такими как размеры и возможности бассейна для испытаний.

#### **A.16.5.3.2 Метод проведения испытаний**

В общем, две методики применяются для бассейнов для модельных испытаний льда. Первая методика, когда модель проталкивается через или тянется через неподвижную льдину, вторая модель, когда движущаяся льдина наталкивается на закрепленную или пришвартованную льдину. Выбранный вариант должен соответствовать целям испытания. Параметры, подлежащие измерению, и конфигурация измерительных систем должны быть в первую очередь продиктованы целями испытания, характеристиками конструкции и условиями ее эксплуатации.

Различия в размерах и планировке бассейнов для модельных испытаний могут оказать влияние на испытания. Важным фактором является размер бассейна (длина и ширина), который влияет на количество тестов, которое может быть проведено с одним ледяным покровом. Требуемая реальная длина теста зависит от типа опыта. В качестве примера для тестирования гряд торосов или груд ледяных обломков

модель должна действовать, пока не будет достигнуто устойчивое состояние. Еще один фактор, который может ограничить программу испытаний – это близость к стенке бассейна. Для случая, когда модель проталкивается через лед, ровный ледяной покров может рассматриваться как бесконечный, если наикратчайшее расстояние от точки приложения любой нагрузки к ближайшей стене бассейна больше, чем в три раза превышает характеристическую длину льдины.

Выбор метода тестирования сильно зависит от типа теста. В частности должно приветствоваться, когда во время толкания ледяного покрова на зафиксированную или пришвартованную модель конструкции, нереальные трещины могут часто распространяться от модели в сторону боковых стенок бассейна, в дополнение ледяной покров может разрушиться о проталкиваемую пластину вместо модели, это случается обычно для тонкого и хрупкого льда. Так же как для выбора техники тестирования, наиболее практичный способ минимизировать негативные последствия отклонения пограничного условия - это производить тесты с шириной льда достаточной по сравнению с шириной модели.

#### **A.16.5.3.3 Ледовые условия**

Испытание на моделях может быть выполнено в ледовых условиях, таких как ровный лед, сплоченный лед, вновь образованный канал, ледяная каша (старый канал), битый лед, поля ледяных обломков и торосы. Надлежащее документирование испытаний должно включать метод, с помощью которого ледовые условия были воспроизведены. Рекомендовано документировать ледовые условия до испытаний и после испытаний с помощью фотографий и видеозаписи, предпочтительно с некоторого возвышения. Количество, время и расположение измерений толщины льда и свойств должно быть также документировано. Видимые трещины в льдине от сломанного канала в сторону стен бассейна или по направлению к чистой воде должны быть указаны в отчете.

Толщина модели льда должна быть измерена после каждого испытания ровного льда, и число измерений должно быть достаточным для достоверной оценки вариаций в толщине льда по всей траектории прохождения модели через



льдину. В случаях, когда испытания проводят близко к стене бассейна, измерения должны быть сделаны по обеим сторонам сломанного канала.

Для старых каналов или поля обломков толщина должна измеряться вдоль одной или двух линий в пределах траектории прохождения модели. Подводные сонары для сканирования нижней поверхности модели льда и лазерные профили для оценки верхней поверхности или аналогичные устройства для дистанционных измерений более предпочтительны для испытаний с ледяными обломками/торосами или ледяной кашей. Такие системы измерений позволяют без разрушений получать профили толщины льда или 3D изображение до начала испытаний.

Гряды торосов и ледяные обломки могут способствовать во многих случаях определению проектных нагрузок на конструкцию, и проведение испытаний для таких условий является очень важным. Воспроизведение моделей торосов и ледяных обломков в соответствии с требованиями теории подобия является одной из самых сложных задач в моделировании взаимодействия льда/конструкции. Традиционный метод создания однолетних торосов/ледовых нагромождений – это вырастить ровный лед с толщиной равной толщине ледяных блоков, составляющих модель тороса/ледового нагромождения, сломать этот ледяной покров на неравномерные куски и затем собрать эти куски в груду. Получившаяся груда льда обычно оставляется на некоторый период времени при отрицательной температуре воздуха для того, чтобы образовался укрепленный слой торосов/ледовых нагромождений.

В ходе моделирования гряд торосов/ледовых нагромождений, особое внимание должно уделяться моделированию взаимодействия внутри не затвердевшей части ледяного образования и механическим свойствам повторно замороженной части. Механические свойства затвердевшего слоя могут быть оценены таким же образом, что и для ровного льда, при условии осторожного удаления киля и паруса. Для измерений механических свойств не затвердевшей части, могут применяться испытания на разрыв, испытания на продавливание и/или испытания на сдвиг.

#### **А.16.5.4 Свойства модельного льда**

##### **А.16.5.4.1 Общие положения**

Различное испытательное оборудование при моделировании использует различные типы материалов моделей льда. Ни один из существующих материалов не является абсолютно безупречным. Так, свойства льда, измеренные для одного типа материала, нельзя непосредственно сравнивать с другим материалом. Геометрические параметры и механические свойства модели льда должны быть определены правильно, независимо от состава материала.

Чтобы получить надежные результаты, рекомендовано выполнять определение свойств непосредственно в бассейне и при возможности без вынимания образцов из естественной среды. Выбор времени и расположение измерений также важно. Измерения должны производиться настолько возможно близко к реальной зоне тестирования и продолжительности испытаний. Все методики измерений должны быть настолько возможно простыми и непосредственно измерять требуемый параметр. Методики измерений и измерения должны выполняться квалифицированным персоналом и должны быть должным образом документироваться. Оборудование, используемое для всех измерений, должно быть откалибровано при температуре окружающего воздуха в бассейне.

Свойства однолетних и многолетних торосов очень сложно смоделировать в ледовых бассейнах. Необходимо отбирать образцы различных участков тороса для документальной регистрации степени его плотности и других внутренних свойств. Следует документально зарегистрировать ледовые условия рядом с торосом. Например, битый ровный лед вокруг тороса существенно снижает нагрузку, по сравнению со сплошным ровным льдом.

##### **А.16.5.4.2 Предел прочности на изгиб и модуль упругости**

Предел прочности на изгиб и модуль упругости часто определяются с помощью тестов с консольной балкой. Плавающая консольная балка, имеющая длину  $L$  и ширину  $B$ , вырезается на месте. Рекомендуемые размеры балки ( $L \times B \times h$ ) это  $6h \times 2h \times h$ , где  $h$  толщина льда. Конец балки подвергается нагрузке при постоянной скорости, пока балка не ломается. Рекомендовано использовать нагрузочное

устройство с электроприводом. Применяемая нагрузка, так же как и прогиб балки должны записываться. Определение прогиба требуется только для определения модуля упругости. Измерения прочности должны выполняться несколько раз во время фазы нелинейной деформации и один раз после того, как испытание льда выполнено. Насколько возможно прочность должна быть измерена в различных местах, распределенных по длине бассейна. Предел прочности и модуль упругости при изгибе могут быть рассчитаны из измерений разрушающей нагрузки и прогиба свободного конца с использованием следующего уравнения (все в единицах СИ):

$$\sigma_f = \frac{6F_b L}{Bh^2}, \quad (\text{A.16.16})$$

$$E_f = \frac{4FL^3}{Bh^3\Delta}, \quad (\text{A.16.17})$$

где  $\sigma_f$  – предел прочности при изгибе;

$E_f$  – модуль упругости при изгибе;

$F$  – нагрузка, применимая на свободный конец консоли;

$F_b$  – разрушающая нагрузка;

$L$  – длина балки (от точки приложения нагрузки до опоры);

$B$  – ширина балки (у опоры);

$h$  – толщина льда;

$\Delta$  – прогиб балки (свободный конец консоли).

Альтернативный метод измерения модуля упругости при сгибе – это измерение прогиба бесконечного плавучего ледяного покрова под данной нагрузкой. В этом случае модуль упругости определяется следующим образом:

$$E_f = \frac{3(1-\nu^2)}{16\rho_w gh^3} \left( \frac{F}{\Delta} \right)^2, \quad (\text{A.16.18})$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона для льда;

$\rho_w$  – плотность воды;

$g$  – ускорение, вызванное силой тяжести;

Прочие обозначения соответствуют обозначениям уравнения (A.16.17).

#### **A.16.5.4.3 Прочность льда при сжатии**

Прочность на сжатие модели льда может быть измерена с использованием следующих методов:

- одноосевое испытание производится в воде;
- ледяной блок вырезается и поднимается из воды для выполнения одноосевого испытания;
- индентор используется для горизонтальной нагрузки ледяного покрова.

Прочность на сжатие измеряется сложнее всего с высокой точностью, и структура модели льда не всегда позволяет использование вышеуказанных методов.

#### **A.16.5.4.4 Коэффициент трения**

Коэффициент динамического трения определяется с помощью измерений тангенциальной силы, когда либо модель льда скользит по пластине, покрашенной идентично структуре модели, либо такая пластина скользит по фрагменту модели льда. В обоих случаях лед и пластина должны быть прижаты друг к другу с обычным усилием. Трение между двумя фрагментами льда может быть определено с использованием аналогичных испытаний. Площади контакта льда и пластины должны быть увлажнены, так как коэффициенты сухого и мокрого трения значительно отличаются. Испытания по измерению трения должны проводиться на скорости, соответствующей скорости взаимодействий льда/конструкции, ожидаемой при испытаниях. Коэффициент трения рассчитывается в соответствии с законом сухого трения как:

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}, \quad (\text{A.16.19})$$

где  $\mu$  – это коэффициент трения;

$F_T$  – среднее значение измеренной тангенциальной силы (силы трения) во время стационарного движения;

$F_N$  – нормальная нагрузка на площадь контакта.

## **А.16.6 Отгрузка углеводородов в ледовых условиях**

### **А.16.6.1 Общие положения**

Система отгрузки углеводородов обычно состоит из танкера и отгрузочного причала. Десятилетиями танкеры были надежным методом для экспортирования углеводородов и морских платформ. Перевозка на судне это привлекательное решение для транспортировки углеводородов в арктических регионах и регионах с низкой температурой, с погрузочными работами, как самыми уязвимыми морскими работами.

Было предложено несколько концепций отгрузки, включая системы отгрузки в заливе Де-Кастри и заливе Анива, а также отгрузочную вышку-причал в Печорском море. Загрузка танкера может осуществляться непосредственно с добывающей платформы или с более узкой отгрузочной вышки-причала. Эти концепции могут пострадать от высокой степени риска столкновения танкера и конструкции при различных условиях дрейфа льда. В качестве альтернативы танкер может пришвартоваться к наливному шлангу с помощью одноякорного причального устройства, но эффективное ледокольное обеспечение с использованием ледоколов необходимо для защиты этой системы в тяжелых ледовых условиях. Еще одной альтернативой для арктических условий и низких температур является отгрузка с подводной башни, система шлангов которой защищена от движущихся льдов путем армирования.

В зависимости от проекта полная концепция отгрузки во льдах должна включать пришвартованный танкер, соединенный с пришвартованным судном хранилищем, пришвартованное судно добычи и хранения или другой тип плавучей конструкции. Альтернативно пришвартованный танкер может соединяться с морским буровым основанием, опирающимся на дно или системой подводной добычи.

Загрузка танкера у добывающей платформы, отгрузочной вышки-причала или подводного буя (блока отгрузки) может включать следующие фазы [333]:

- начальный подход;

- окончательный подход;
- удержание на точке;
- отход.

Оперативные мероприятия, такие как ледокольное обеспечение, могут быть использованы на всех этих фазах для снижения общих и локальных проектных ледовых нагрузок, при условии, что это может быть в комбинации с сопротивлением материала, достижением необходимого уровня безопасности.

#### **A.16.6.2 Надежность системы**

Как правило, анализ рисков в системах отгрузки должен включать следующее.

- описание льда и метеорологических условий, и статистические распределения вероятности для ключевых параметров;
- описание компонентов системы и деталей их работы должно включать особенности системы разъединения;
- реалистичное представление возможностей танкера и работы, если доступны данные по реальным перегрузкам во льдах;
- где необходимо, описание возможностей ледокольного обеспечения, включая продемонстрированную эффективность в ледовых условиях, которую предстоит встретить;
- определение критерия контроля для выброса углеводородов и угрозы жизни, и потенциально для частоты контакта между танкером и плавучей конструкцией, повреждения судна, повреждения плавучей конструкции и времени простоя – критерий входного контроля должен не противоречить положениям настоящего международного стандарта.

Там, где существуют большие неопределенности в физической среде, эффективность, с которой ледокольное обеспечение выполняется, танкерные операции или время на разъединение, должны быть подвержены анализу.

Танкер, подсоединенный к морскому отгрузочному терминалу, должен быть всегда способен к разъединению даже в условиях, когда движущиеся льды становятся неподвижными. В таких обстоятельствах лед может снова начать

дрейфовать в любом направлении, а ледовые нагрузки и связанные с ними риски столкновения с конструкцией могут вырасти очень быстро. Пороговая скорость дрейфа льда поэтому должна быть определена для разъединения. Разъединение необходимо в следующих ситуациях:

- Если ледяной покров имеет ограниченное воздействие на систему (низкие ледовые нагрузки и никаких помех для маневренности), как в случае с тонким льдом или низкими сплоченностями льда.

- Если надежный локальный прогноз дрейфа льда может быть выполнен, разъединение может быть выполнено только перед тем, как лед начнет дрейфовать в опасном направлении. Этот тип ситуации может быть оценен как критический, только когда изменение дрейфа значительно. В зонах, где лед может быть припайным, важно обнаруживать эти события, так, чтобы операции по перегрузке продолжались. Тем не менее, прогнозирование дрейфа льда должно быть очень надежным, так, чтобы безопасность не ставилась под угрозу.

- Когда дрейф льда останавливается, он может продолжиться, но более медленно. Например, когда ветер и течение одновременно воздействуют в одном направлении, ледяной покров будет перемещен на 200 м в течение 15 минут (для 1 м толщины ледяного покрова и ветрового и водяного напряжений порядка  $0,1 \text{ Н/м}^2$ ). Если танкер пришвартован к подводному башенному утяжеленному бую на глубоководье (и требуется 15 минут на разъединение), при этом предусмотрен ледакол; ледакольное обеспечение и гибкость швартовки обычно предотвращает развитие чрезмерных нагрузок до выполнения разъединения.

### **А.16.6.3 Требования к отгрузочному терминалу**

#### **А.16.6.3.1 Виды отгрузочных терминалов**

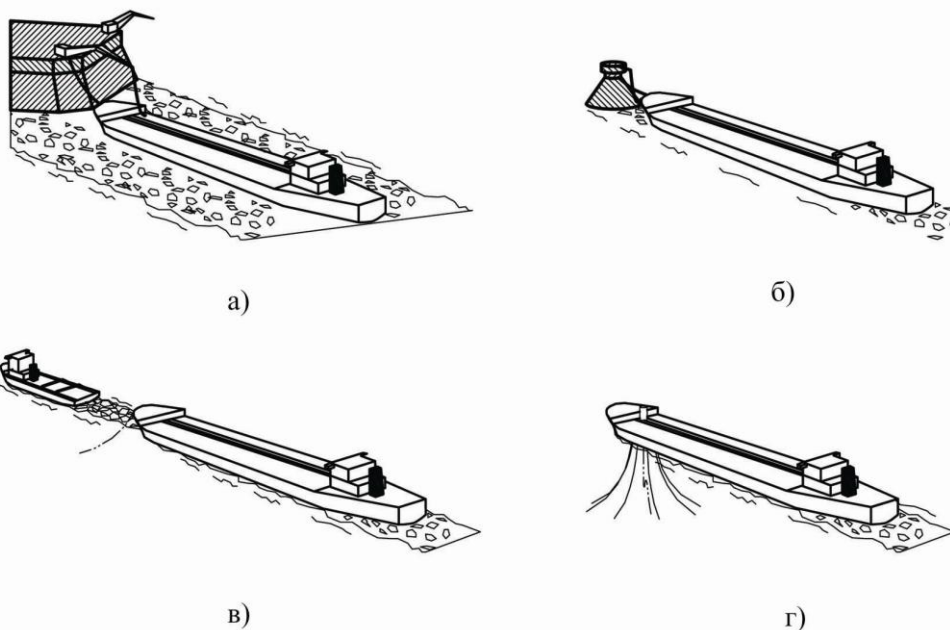
Терминал отгрузки должен быть спроектирован для физической среды, в которой его планируется эксплуатировать. Особенно это относится к движущимся льдам. В принципе, существуют четыре возможных категории таких терминалов отгрузки (см. рисунок А.16.8):

– Платформа. Относительно широкая конструкция, проходящая сквозь ледяной покров и взаимодействующая с ним. Платформа должна противостоять большим общим и локальным нагрузкам, а также нагрузкам, связанным со швартовкой от загружаемого танкера.

– Вышка-терминал. Узкая конструкция, которая проходит сквозь поверхность льда и поэтому взаимодействует со льдом.

– Однокорная загрузка (SAL) или выносной точечный причал (SPM). Танкер пришвартовывается через однолинейное соединение с наливным шлангом присоединенным к одному якорю на морском дне.

– Турельная загрузка. Танкер имеет турель, которая может быть внутренней или внешней (установлена за пределами корпуса). Для морских перегрузок применяется разъемная постановка на якорь с внутренней турелью, которая называется подводной турельной системой загрузки (STL).



а) относительно широкая платформа, проходящая сквозь ледовую поверхность

б) узкая вышка, проходящая сквозь ледовую поверхность

в) однокорная загрузка (SAL) или выносной точечный причал (SPM)

г) турельная загрузка, для танкеров с турелью

Рисунок А.16.8 – Возможные концепции загрузки в арктических регионах и регионах с низкой температурой



### **А.16.6.3.2 Платформа**

Обычно это широкая проходящая сквозь поверхность льда конструкция, при этом танкер швартуется и загружается в кильватере конструкции. Это может быть добычная платформа, которая обычно оборудована загрузочным рукавом (рукавами). Для платформы гравитационного типа (GBS), которая в плане является квадратом, загрузочные рукава могут располагаться по углам, как показано на рисунке А.16.8. Так как танкер пришвартован к неподвижной точке на периферии конструкции, он имеет ограниченную возможность оставаться в укрытии платформы без разъединения для значительных изменений направления дрейфа льда.

Конструкция должна быть спроектирована таким образом, чтобы сохранять целостность при воздействиях от танкера, либо под воздействием случайных воздействий дрейфующего льда.

### **А.16.6.3.3 Вышка**

Вышка – это узкая конструкция, которая может быть расположена на некотором расстоянии от добычной платформы или от судна хранилища. Вышка обычно оборудована загрузочным рукавом. Эта модификация швартовой системы вышки должна быть спроектирована, чтобы противостоять ледовым нагрузкам. Жесткая швартовая система (поперечный рычаг или развилка) может быть прочнее, чем гибкая швартовая система, и гарантировать минимальное расстояние между конструкцией и носом танкера. Испытания на моделях показывают, что риски столкновения по причине неожиданного изменения направления дрейфа льда все равно присутствуют с жестким рукавом. [334].

### **А.16.6.3.4 Одноякорная отгрузка**

Конструкция системы одноякорной загрузки функционирует следующим образом. Танкер пришвартовывается через однолинейное соединение с наливным шлангом, присоединенным к одному якорю на морском дне. В режиме ожидания линия и шланг могут лежать на морском дне. Системы одноякорной загрузки могут быть спроектированы таким образом, чтобы якорный трос для носовой загрузки был защищен при помощи разделенного на сегменты блокировочного экрана поверх

линии загрузки углеводородов, используемого для защиты от воздействия льда. [335, 336] Также имеются конструкции, в которых используется незащищенный усиленный якорный трос.

Поскольку способность системы одноякорной загрузки противостоять ледовым нагрузкам ограничена, ее можно использовать только при условии наличия эффективной системы ледокольного обеспечения [337].

#### **A.16.6.3.5 Турель**

Концепция использования внешней башни для перегрузки является полностью подводной системой. Эта система должна проектироваться таким образом, чтобы она могла переносить нагрузку на швартовую систему для всех условий, включая сжатие. Система райзера должна быть достаточно защищена, чтобы избегать повреждений, вызванных льдинами или обломками льда, которые выталкиваются под действием корпуса танкера.

#### **A.16.6.4 Требования к танкерам**

Танкеры, загружаемые во льдах, должны относиться к судам соответствующего ледового класса.

### **A.17 Управление ледовой обстановкой**

#### **A. 17.1 Общие положения**

Плавучие конструкции, эксплуатирующиеся в ледовых условиях, часто сопровождаются поддержкой высокоэффективных судов, контролирующих ледовую обстановку, роль которых заключается в изменении локальных ледовых условий, уменьшении ледовых нагрузок на конструкции и очищения от ледяного покрова вблизи конструкций. Необходимость выявления опасных ледяных образований и ситуаций, требующих применения системы УЛО и своевременное решение этих проблем расширяет диапазон внешних условий до значений, при которых обычно применяются стационарные конструкции. УЛО также необходимо для стационарных конструкций для обеспечения поставок грузов и отгрузки продукции, а также для очистки возможных путей покидания для спасательного судна.

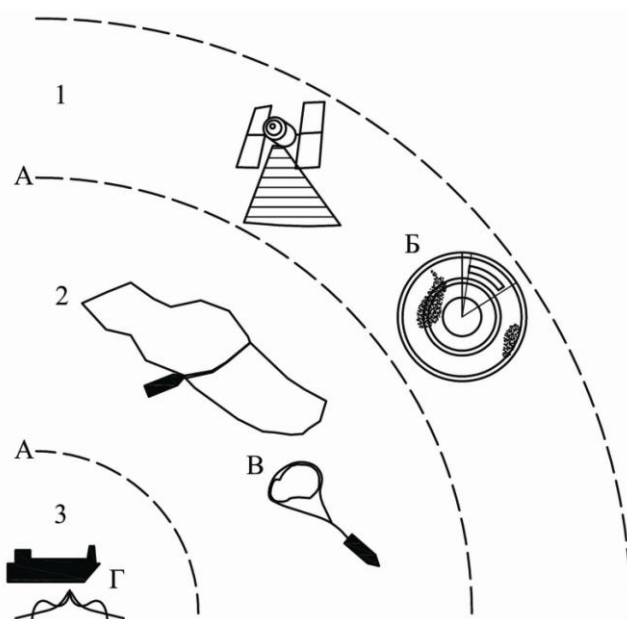
Система контроля над ледовой обстановкой оказывает значительное влияние на подход к проектированию тех или иных морских сооружений. Это зависит от уровня надежности системы контроля, например, возможности постоянного мониторинга и определения опасных ледовых условий и успешного их решения до того, как эти условия начнут воздействовать на конструкцию (например, при помощи буксировки айсбергов, очистки торосистого льда с мест доступа к путям покидания и эвакуации, размельчению крупных ледяных образований и т.п.).

Основные компоненты системы УЛО, применяемые для плавучих конструкций в регионах с потенциальной возможностью появления льда, показаны на рисунке А.17.1. Для обнаружения ледяных образований во внешней области или в зоне наблюдения используется множество методов, включая воздушную разведку (визуальную или с помощью радаров), спутниковые радары и оптические системы. Потенциально опасные ледяные образования, такие как айсберги, многолетние и толстые льдины, торосы или скопление битого льда отслеживаются и прогнозируются с учетом требований, предъявляемых для сохранения нормальной работы и безопасности объекта.

Вблизи конструкции находится зона контроля, где постоянно отслеживаются опасные объекты, оценивается необходимость применения системы физического воздействия и выполнения соответствующих действий. Технические методы включают буксировку айсбергов или изменение траектории движения крупных обломков льда при помощи водяной пушки, отталкивание крупных ледяных полей, разламывание толстого льда для уменьшения размеров льдин, размельчение торосов. Этот перечень не является исчерпывающим и следует рассматривать все возможные варианты. Размеры зон варьируются в зависимости от эксплуатационных характеристик платформы и ледовых условий. Для айсбергов у восточного побережья Канады зона контроля может определяться в соответствии со временем дрейфа, измеряемого в сутках, тогда как система УЛО в море редко обнаруживает объекты со временем дрейфа, превышающим несколько часов.

Каждое из плавучих сооружений имеет одну или несколько критических зон, которые определяются в соответствии со временем, необходимым для остано

добычи, отсоединения райзеров или якорных линий, перед окончательным разъединением. Эти обстоятельства обычно соотносятся с системой уровней останова, с соответствующим временем дрейфа, в течение которого по расчетам ледяное образование достигнет платформы. Все функции системы УЛО, обнаружение, отслеживание и прогнозирование, должны выполняться в течение всего времени, пока объект остается в критической зоне.



1 – Зона наблюдения; 2 – Зона контроля; 3 – Критическая зона;

А – Оценка угрозы; Б – Обнаружение; В – Физическое управление; Г – Отсоединение.

Рисунок А.17.1 – Компоненты системы управления ледовой обстановкой

Стратегия системы УЛО для айсбергов и многих других ледовых условий проиллюстрированы на рисунке А.17.2. Обнаружение, отслеживание и прогнозирование продолжают в течение всего времени, пока имеются ледяные образования, представляющие угрозу. Как только наличие угрозы зафиксировано, и опасный объект находится в определенной зоне и/или на определенном расстоянии (обычно эти параметры определяются в Плане УЛО), вводятся в действие все необходимые и предусмотренные системой УЛО ресурсы. Если угроза предотвращена, обнаружение, отслеживание и прогнозирование продолжается до тех пор, пока не будет обеспечена безопасность сооружения. Если угроза

сохраняется, производство должно быть приостановлено и платформа должна быть отсоединена.

В число систем УЛО, используемых в регионах с ледяным покровом, входят следующие:

- системы УЛО, использовавшиеся для поддержки бурения с плавучих буровых установок в море Бофорта [338];
- системы УЛО, использовавшиеся для поддержки установки выкидной линии и работ по добыче углеводородов в течение расширенного сезона (через одноякорный буй на плавучее нефтехранилище) в Охотском море к северо-востоку от острова Сахалин [339];
- системы УЛО, использовавшиеся для поддержки бурения и добычи в районе Гранд Бэнкс (Grand Banks) и бурения с плавучих сооружений в море Лабрадор и у берегов Западной Гренландии [340, 341];
- системы УЛО, использовавшиеся для поддержки многочисленных работ на шельфе Каспийского моря, например, для защиты буровых и добывающих сооружений от неблагоприятного воздействия льда, освобождения акватории ото льда для доступа морских судов к платформам и ледокольные работы для обеспечения возможности эвакуации, покидания и спасения.



Опыт в данной области незначителен или полностью отсутствовал, когда системы УЛО впервые были введены в строй для поддержки буровых работ на восточном побережье Канады и в море Бофорта. В результате структура этих систем определялась путем анализа на качественном уровне и применялась в сочетании с процедурами подготовки к опасной ледовой ситуации и ухода с точки бурения. Основная цель систем заключалась в уменьшении времени простоев. Объемы документации об эффективности систем УЛО, доступные на тот момент времени, не позволяли количественно оценить «уровень надежности в сочетании с конструктивной прочностью» для широкого диапазона ледовых условий, методов УЛО и типов судов.

Системы УЛО доказали свою эффективность во многих ситуациях, а уровни простоев, связанных с ледовой обстановкой, обеспеченные благодаря использованию этих систем, позволили убедиться в их общей надежности. Некоторые типичные примеры простоев, связанных с ледовой обстановкой, приведены в таблице А.17.1.

## **А.17.2 Система управления ледовой обстановкой**

### **А.17.2.1 Общая надежность и расчетный срок эксплуатации**

Руководство отсутствует.

### **А.17.2.2 УЛО с целью снижения ледовых нагрузок**

Необходимость использования УЛО как для снижения частоты, так и уровня ледовых нагрузок на морские системы не вызывает сомнений. В случае управления айсбергами, очевидно, что успешные операции по УЛО позволят избежать столкновения, в противном случае столкновение айсбергов с морскими конструкциями неизбежно. Успешность операций по УЛО сложнее оценить, поскольку преимущества такого управления зависят от уровня УЛО (например, от

размера обломков льда, от объема усилий, затрачиваемых на очистку зоны вокруг платформы ото льда).

Полномасштабные данные [338] демонстрируют, что в определенных ситуациях ледовые нагрузки можно снизить с коэффициентом от 2 до 10, в зависимости от «объемов УЛО». Однако опыт также показал, что не всеми нежелательными ледовыми ситуациями можно управлять своевременно и со 100% надежностью, даже в системах управления с широкими возможностями.

#### **А.17.2.3 Характеристика эффективности системы УЛО**

Были разработаны (и могут разрабатываться) различные аналитические методы определения характеристик системы УЛО для широкого диапазона сценариев ледовой обстановки. Однако опыт использования этих методов в полевых условиях, который необходим для их уточнения и подтверждения эффективности, остается весьма ограниченным, особенно для судов высокого ледового класса последней конструкции, находящихся в более суровой ледовой обстановке.

В этой связи важно подчеркнуть настоятельную необходимость систематического документирования будущей деятельности в сфере УЛО для повышения качества имеющихся баз данных. Полномасштабные демонстрационные проекты могли бы сыграть положительную роль, особенно в тех случаях, когда неопределенность в отношении эффективности систем УЛО высока и может иметь важные последствия.

Принимая во внимание современное состояние и отсутствие хорошо документированной количественной информации об эффективности систем УЛО (особенно для морского льда) рекомендуется использовать для работы в этих системах персонал, опыт которого позволяет сделать обоснованные выводы в отношении эффективности количественных оценок, предусмотренных настоящим стандартом. В этой связи даже недокументированные сведения, полученные от опытного технического персонала, являются важнейшим фактором и должны рассматриваться как ключевые исходные данные для любых оценок подходов к УЛО и их эффективности, как можно более полном объеме.

Т а б л и ц а А.17.1 – Время простоя и эффективность буксировки на основе опыта эксплуатации

Регион	Работы	Период времени	Ледовый режим	Возможности системы УЛО	Приблизит. время простоя	Справочные материалы (комментарии)
Море Бофорта	Буровые работы (Куллулук)	Начало вскрытия — конец ледостава	Толстый и тонкий, однолетний и многолетний паковый лед	Широкие (до 4 ледоколов РС2 <sup>a</sup> )	10% времени	[338]
	Буровые работы (Канмар)	Конец вскрытия — начало ледостава	Толстый и тонкий однолетний паковый лед и небольшое количество многолетнего пакового льда	Средние (1 ледокол РС2 и несколько ледоколов РС4)	30% времени	—
Охотское море	Установка трубопровода	Вскрытие	Толстый однолетний дрейфующий лед	Выше средних (1 ледокол РС4 и 2 ледокола РС2)	60% времени	[342] (серьезность ледовой нагрузки была недооценена)



Окончание таблицы А.17.1.

Охотское море	Добыча через однокорный буй на плавучее нефтехранилище	Конец вскрытия — начало ледостава	Толстый и тонкий (весной и осенью) однолетний лед	Выше средних (1 ледокол РС4 и 2 ледокола РС2)	0% во время ледостава, 15% во время вскрытия	[339]
Восточное побережье Канады	Бурение и добыча	Весна и лето	Айсберги (нет данных по дрейфующему льду)	Различные суда АНТС <sup>б</sup>	Эффективность буксировки около 80%	[343]
Западная Гренландия	Бурение	Лето	Айсберги (нет данных по дрейфующему льду)	Различные суда АНТС	Эффективность буксировки около 90%	[344]
<sup>а</sup> РС означает «полярный класс» <sup>б</sup> АНТС означает «буксир для установки якорей»						

#### 17.2.4 Надежность системы управления ледовой обстановкой

Руководство отсутствует

#### А.17.3 Возможности системы УЛО

##### А.17.3.1 Требования

Руководство отсутствует.

##### А.17.3.2 Обнаружение льдов

Некоторые системы обнаружения и отслеживания движения льдов, которые потенциально могут быть использованы, перечислены в таблице А.17.2. При оценке угроз можно использовать процедуру, описанную на рисунке А.17.2.

Т а б л и ц а А.17.2 – Сводная информация о возможных системах обнаружения и отслеживания льдов

Платформа	Система	Функции	Дополнительная информация
Конструкция	Визуальное наблюдение <sup>a</sup>	Обнаружение и отслеживание	
	Морской радар	Обнаружение и отслеживание	Может включать дополнительные возможности и функции, как например усреднение показаний при сканировании
	Специальные системы видеонаблюдения	Обнаружение и отслеживание	
Берег	Визуальное наблюдение <sup>a</sup>	Обнаружение и отслеживание	
	Морской радар	Обнаружение и отслеживание	Может включать дополнительные возможности и функции, как например усреднение показаний при сканировании
	Загоризонтный радар	Обнаружение и отслеживание	
	Специальные системы видеонаблюдения	Обнаружение и отслеживание	
Воздушное судно (жесткое крыло, вертолет, беспилотные средства)	Радар	Обнаружение	Поиск, синтезированная апертура, боковой обзор
	Визуальное наблюдение <sup>a</sup>	Обнаружение	
	Высотометр	Обнаружение	
Судно	Морской радар	Обнаружение	Может включать дополнительные возможности и функции, как например усреднение показаний при сканировании; некоторые возможности по отслеживанию
	Визуальное наблюдение <sup>a</sup>	Обнаружение и отслеживание	Некоторые возможности по отслеживанию

Окончание таблицы А.17.2.

Спутник	Радар	Обнаружение	Некоторые возможности по отслеживанию
	Высокочастотные приборы	Обнаружение	Некоторые возможности по отслеживанию, погодные ограничения
	Оптические приборы	Обнаружение	Некоторые возможности по отслеживанию, погодные ограничения
	Альтиметр, ЛИДАР	Обнаружение	
Подводные технические средства	Сонар	Обнаружение	Некоторые возможности по отслеживанию
Подводные стационарные конструкции	Гидролокатор верхнего обзора	Обнаружение	Толщина льда, выявление торосов
	ADCP (Доплеровский измеритель скорости течения)	Отслеживание	Измерение скорости
	Другие локационные системы	Обнаружение	Некоторые возможности по отслеживанию
<sup>a</sup> Возможности использования ограничены при плохой видимости и в темноте.			

Обнаружение айсбергов может включать широкий спектр мероприятий, включая дальнейшее наблюдение для подготовки и размещения судов, стратегический мониторинг для определения приоритета потенциальных угроз и тактический мониторинг для определения траектории и скорости дрейфа. Сводная информация о системах обнаружения айсбергов приведена в справочных материалах [343] и [341]. Важнейшим требованием является обнаружение всех айсбергов, представляющих угрозу для выполнения работ, и их непрерывное или почти непрерывное отслеживание. Потенциальные угрозы можно оценить на основе расчетного времени перемещения относительно времени, необходимого для поэтапного и упорядоченного прекращения работ с последующим отсоединением.

Системы обнаружения айсбергов всегда включают радары в том или ином виде, из-за возможного ухудшения видимости вследствие темноты или тумана. Радары могут быть установлены на сооружение (наиболее важно), на судах

поддержки, на самолетах (управляемых или беспилотных) и спутниках. Грамотная структура системы позволяет своевременно обнаруживать айсберги на различных расстояниях от сооружения и осуществлять сбор данных об ожидаемом волнении моря, размерах айсбергов и погодных условиях, в соответствии с требованиями к системе. Частота появления сигналов ложной тревоги должна быть сведена к минимуму для обеспечения эффективного использования судов УЛО.

При определении надежности систем управления следует учитывать человеческие факторы: опыт, обучение, работа в ночное время (в некоторых случаях в течение длительного времени) и т. д. Для новых объектов следует учесть пониженную эффективность с расчетом на ее увеличение в будущем. Следует определить целевые показатели и предусмотреть проведение сезонной проверки эффективности.

### **А.17.3.3 Оценка угрозы**

### **А.17.3.4 Физическое УЛО**

#### **А.17.3.4.1 Общая информация**

Физическое УЛО связано с операциями судов, которые предназначены для разлома морского льда и очистки акватории и/или других образований в ледяном покрове, а также с отведением айсбергов и небольших объектов ледникового происхождения. Сильно распространено мнение, что если судно способно к навигации в конкретных морских ледовых условиях, оно также может оказывать эффективную поддержку в УЛО в подобных условиях. Другим сильно распространенным мнением является, что на айсберги можно просто «накинуть лассо» и отбуксировать их при помощи любого доступного вспомогательного судна. Оба вышеуказанных мнения, бесспорно, являются чрезмерными упрощениями.

Здесь важно отметить, что были разработаны специальные подходы и методы управления как морскими, так и ледниковыми льдами, в которых указаны возможности и ограничения для используемых судов и оборудования для

имеющихся ледовых условий. Некоторые из методов, использовавшиеся для управления морскими и ледниковыми образованиями, описаны в А.17.3.4.2 и А.17.3.4.3 вместе с рядом ссылок на важные документы, в которых содержится подробная информация.

#### **А.17.3.4.2 Управление морскими льдами**

Следующие способы управления дрейфующим морским льдом использовались в разной ледовой обстановке и проиллюстрированы на рисунке А.17-3 для судна (например, танкера, пришвартованного к подводной системе или DP или к заякоренному FPSO) и одного вспомогательного судна для УЛО.

Очевидно, система управления морскими льдами зависит от количества судов, их возможностей и тактики, а также конкретной ледовой обстановки. Поскольку суда систем УЛО должны активно отводить наиболее опасные ледяные образования, их класс должен быть выше, чем у судов, предназначенных для обычного плавания в такой ледовой обстановке. Хорошим справочным документом, в котором обсуждается управление морскими льдами, является [345].

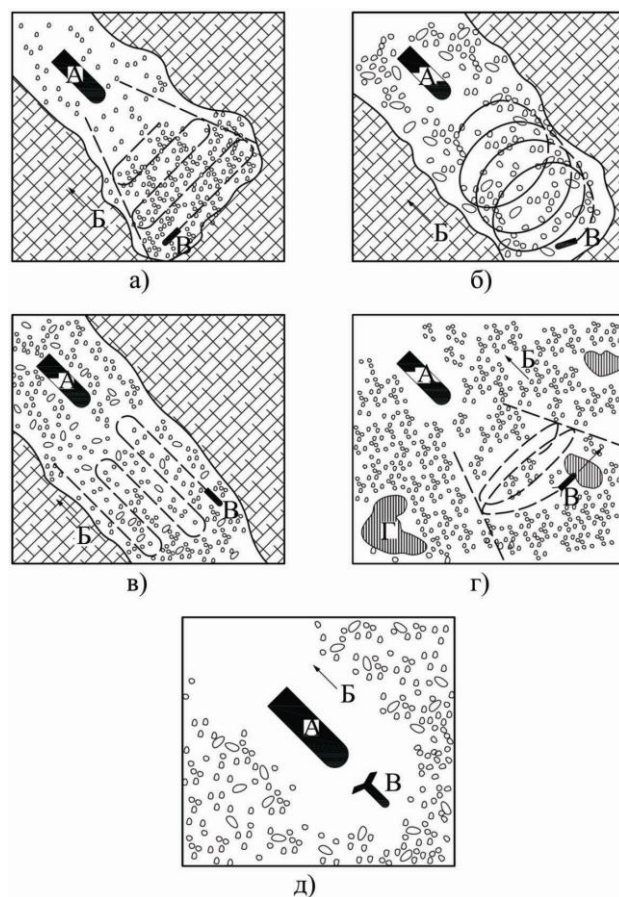
#### **А.17.3.4.3 Управление айсбергами**

Сводная информация о способах буксировки, использовавшихся в районе Гранд Бэнкс (Grand Banks), представлена в документе [341]. Традиционные методы управления айсбергами включают опоясывание ледяного образования плавучим канатом и буксировку при помощи вспомогательного судна. Для буксировки требуется судно с тяговым усилием 70–140 тонн, буксирной лебедкой, стальным буксирным канатом длиной от 100 м до 400 м и синтетическим плавучим тросом или канатом длиной приблизительно 1200 м. Обычно используется канат из плетеного полипропиленового волокна, имеющий диаметр около 11,5 см, используются две-три секции от 400 до 500 м. Процедура опоясывания и обвязки, а также окончательной подготовки показаны на рисунке А.17.4, а вид окончательной системы сбоку показан на рисунке А.17.5.

При использовании буксировки с одним буксировочным канатом, айсберги небольших размеров можно буксировать по заранее предписанному курсу. Если позволяют время и ресурсы, такие айсберги можно отбуксировать вниз по течению

относительно основной конструкции, но в общем случае достаточно отбуксировать айсберг на безопасное расстояние. Для айсбергов более крупных размеров задача состоит в отклонении траектории на несколько градусов от его естественного курса.

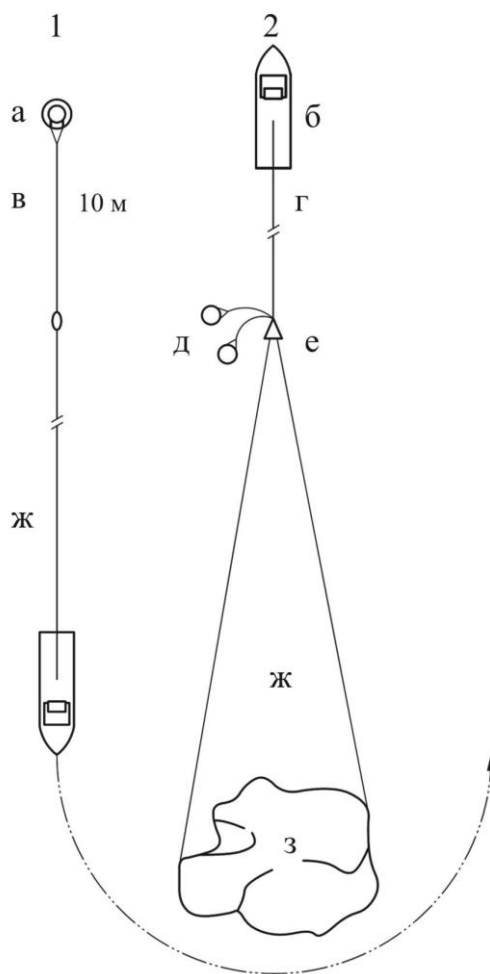
Метод буксировки с одним канатом не всегда является успешным. Для изменения траектории крупных обломков айсбергов часто используются водяные пушки и гребные винты судов. Для небольших айсбергов, которые трудно буксировать, используются специальные сети, эффективность которых доказана на практике. Для крупных и очень крупных айсбергов успешно использовались способы с участием двух или нескольких судов. Эти способы особенно уместны в случаях появления очень крупных столообразных айсбергов.



а) секторный способ; б) круговой способ; в) линейный способ; г) способ толкания льда;  
д) стационарный способ.

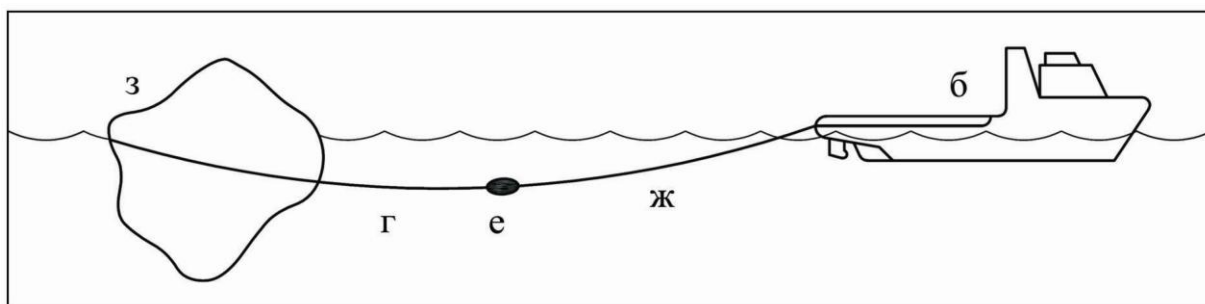
А — танкер или судно FPSO; Б — направление дрейфа льда; В — судно для УЛО; Г — потенциально опасное ледяное образование.

Рисунок А.17.3 – Схематическое изображение методов управления морскими льдами [345].



1) Соединение с однолинейной обвязкой; 2) Схема буксировки; а) Сигнальный буй или фонарь; б) Буксировочное судно; в) Буксировочный трос; г) Стальной буксировочный трос; д) Сигнальный буй; е) Соединительный узел; ж) Плавучий буксировочный канат; з) Айсберг.

Рисунок А.17.4 – Схематическое изображение для буксировки с однолинейной обвязкой [346]



б) Буксировочное судно; г) Стальной буксировочный трос; е) Соединительный узел; ж) Плавучий буксировочный канат; з) Айсберг;

Рисунок А.17.5 – Схематический вид сбоку с одним буксировочным канатом

## **А.17.4 Планирование УЛО и необходимые процедуры**

### **А.17.4.1 Состав плана УЛО**

Для получения более подробных сведений об объеме УЛО можно рассмотреть документацию, представленную в ходе утверждения различных проектов и ознакомиться с разнообразными нормативными актами. В число этих документов входят:

- требования национального комитета по энергетике в отношении получения данных об окружающей среде с целью выполнения работ по бурению и добыче в приграничной зоне Канады;
- пакет документов на утверждение программы бурения в районе Куллука с 1991 г. (находящийся в библиотеке Национального Комитета по энергетике, Калгари, Канада);
- Материалы проекта разработки месторождения «Терра Нова» (Terra Nova) (находящиеся в библиотеке Комитета по поставкам нефтепродуктов в регионе Канады-Ньюфаундленда и морского шельфа п-ова Лабрадор (C-NLOPB), Сент-Джонс, Канада);
- материалы разработки месторождения «Уайт Роуз» (White Rose) (находящиеся в библиотеке C-NLOPB, Сент-Джонс, Канада).

### **А.17.4.2 Ледовые явления, оценка угрозы и принятие решений**

Всемирная метеорологическая организация [346] предлагает классификацию и определения основных терминов, связанных с льдами и ледовыми условиями, которые могут использоваться при подготовке плана УЛО.

По отношению к системам аварийного оповещения о ледовой обстановке следует рассматривать следующие виды расчетов «времени оповещения». Настоящий пример приведен для буровых работ на стационарной конструкции, где в качестве одной из адекватных мер реагирования является эвакуация. Время



оповещения об опасности  $t_{HAT}$  является разность между временем возникновения  $t_{AT}$  опасной ситуации и временем обеспечения безопасности скважины  $t_{ST}$ , к которому добавлено время на эвакуацию  $t_{ET}$  и резервное время  $t_{MT}$  на непредвиденные обстоятельства (по усмотрению оператора, обоснованные в результате оценки рисков). В этом случае операции выполняются в соответствии со следующей формулой:

$$t_{HAT} = t_{AT} - (t_{ST} + t_{ET} + t_{MT}). \quad (A.17.1)$$

#### **A.17.4.3 Требования к вспомогательным судам**

Руководство отсутствует.

#### **A.17.4.4 Непрерывность осуществления плана УЛО**

Требуется постоянное обновление и корректирование плана УЛО для обеспечения возможности непрерывной работы. Оборудование и хорошо обученный и опытный персонал для УЛО должны всегда быть на месте в течение всего расчетного срока реализации проекта. Этого не всегда просто добиться, учитывая текучку квалифицированных кадров в морских командах. В этой связи необходим план по продвижению в должности людей.

#### **A.17.4.5 Обновление плана УЛО**

Руководство отсутствует.

### **A.18 Эвакуация, покидание и спасание**

#### **A.18.1 Общие положения**

##### **A.18.1.1 Стандарт качества**

Стандарт качества – это технические требования оператора к решению, позволяющему добиться целевых показателей качества работы. Стандарт качества устанавливается оператором и формирует основу доказательства оператором того факта, что задачи безопасности могут быть выполнены и будут выполнены. Это определение необходимых критериев качества оборудования, процедур или систем, которое возможно проверить. Стандарт качества должен быть определен в отношении соответствующих показателя или показателей, например, надежности,

функциональности, доступности, жизнеспособности, автономности, времени или расстояния. Этот стандарт должен очевидным образом способствовать достижению общей цели снижения риска ущерба.

Каждый стандарт должен создавать основу для мониторинга и сохранения необходимого соответствия оборудования, процедуры или системы своему целевому назначению в течение всего расчетного срока службы и должен учитывать конкретные обстоятельства, присущие данной установке и ее функционированию.

Общими задачами систем эвакуации, покидания и спасания, выполнение которых определяет эффективность данных систем, являются следующие:

- Предоставить персоналу адекватные средства индивидуальной защиты во время эвакуации с места потенциальной опасности, созданной вероятным сценарием чрезвычайной ситуации.
- Предоставить персоналу, включая травмированных, адекватные средства покидания установки управляемым способом.
- Предоставить адекватные средства поддержки операций по спасанию персонала.

#### **A.18.1.2 Термины в области эвакуации, покидания и спасания**

##### **A.18.1.2.1 Стандарт качества**

Стандарт, определяющий качественные и количественные требования к критичным в отношении безопасности системам и их элементам;

##### **A.18.1.2.2 Опасность**

Совокупность условий эксплуатации продукта или системы, характеризующая возможностью возникновения последовательности инцидентов, которая может стать причиной травм, экологического и (или) экономического ущерба, или любых сочетаний этих последствий;

##### **A.18.1.2.3 Опасная зона**

Зона, в которой безопасность персонала подвергается риску из-за опасностей на установке;

#### **А.18.1.2.4 Риск**

Комбинация вероятности возникновения конкретного нежелательного события и серьезности последствий этого события;

#### **А.18.1.2.5 Ответственное лицо**

Физическое или юридическое лицо или организация, имеющая законное право собственности на оборудование или процесс и отвечающее безопасности и здоровью соответствующего персонала,

Примечание: «Ответственное лицо» также может называться «владельцем»

#### **А.18.1.2.6 Крупная авария**

Событие, которое может повлечь травмирование нескольких людей, вызвать существенный экологический ущерб или разрушение установки, или любое сочетание этих последствий;

#### **А.18.1.2.7 Путь эвакуации**

Доступный в штатных условиях и беспрепятственный маршрут из всех возможных мест пребывания персонала во временное укрытие или другое альтернативное защищенное место сбора;

#### **А.18.1.2.8 Предупредительное покидание**

Управляемые средства покидания персоналом установки до возникновения неконтролируемой или каскадной аварии, которая в противном случае приведет к необходимости аварийного покидания;

#### **А.18.1.2.9 Предпочтительные средства покидания**

Метод покидания персонала, выбираемый в соответствии с минимальным риском, привычности для персонала, частоты использования, доступности и пригодности в сложившихся условиях;

Примечание: обычно это метод доставки и вывоза персонала морского объекта;

#### **А.18.1.2.10 Первичные средства покидания**

Метод покидания, который может быть реализован управляемым способом под руководством ответственного лица, и **предпочтительные средства покидания (А.18.1.2.9)** установки в чрезвычайной ситуации;

#### **A.18.1.2.11 Вторичные средства покидания**

Управляемые средства покидания персоналом установки, не зависящие от внешней поддержки;

#### **A.18.1.2.12 Третичные средства покидания**

Метод покидания установки, который в значительной степени полагается на собственные действия персонала; способ характеризуется высоким риском, используется в случае недоступности первичного и вторичного методов;

#### **A.18.1.2.13 Спасательное плавсредство**

Морское плавсредство, используемое персоналом установки в ходе покидания в море или на лед и обеспечивающее защиту от аварии и окружающей среды.

### **A.18.1.3 Травмирование и выживание**

Система эвакуации, покидания и спасания (EER) должна быть спроектирована таким образом, чтобы не возникло новых случаев травмирования персонала, исключая произошедшие в начале аварии. Система EER должна рассматриваться как часть системы охраны труда, безопасности и окружающей среды (ОТБОС/HSE).

Травмирование применительно к системе EER означает получение травм или гибель персонала в результате аварии, которая произошла во время эвакуации, покидания и спасания. Вероятность травмирования может быть снижена путем принятия обоснованных решений. Случаи травмирования в ходе EER должны повлечь изменения в проекте и (или) процедурах эксплуатации.

Требование об отсутствии травмирования персонала охватывает период времени от первого предупреждения до момента сбора всего персонала в безопасном месте. Это требование не применимо к травмам, вызванным крупной аварией.

Требование об отсутствии травмирования персонала относится к EER и является одним из множества критериев, которые необходимо включить в стандарты качества для критически важных элементов установки. Данное требование должно быть одной из целей системы EER.

Таким образом, владелец актива/ответственное лицо обязаны показать, что риски снижены до минимального практически приемлемого уровня, что подтвердит хорошие шансы избежать травмирования в ходе EER.

## А.18.2 Основные принципы эвакуации, покидания и спасения

### А.18.2.1 Общие положения

Пример иерархии (систематики) документов по ликвидации чрезвычайных ситуаций, соответствующий применимым международным стандартам, приведен на рисунке А.18.1. Эта систематика аварийного реагирования включает стандарты оператора, корпоративные стандарты и характерные стандарты, связанные со спецификой объекта.

#### Примечания

1 Примерами общих стандартов в области ликвидации чрезвычайных ситуаций являются ИСО 15544[347], ИСО 17776[348] и ИСО 13702[349].

2 Данный пример иерархии разработан на основе стандартов операторов, корпоративных стандартов и стандартов для конкретных установок.



Рисунок А.18.1 Иерархия EER

### **A.18.2.2 Руководящие принципы эвакуации, покидания и спасания**

#### **A.18.2.2.1. Определение принципов и описание элементов**

Первый руководящий принцип состоит в том, что система управления EER разрабатывается и внедряется на основе системного подхода. Данная концепция проиллюстрирована на рисунке A.18.2 в виде «треугольника EER», состоящего из трех главных элементов: целостности технических систем, компетентности персонала и процедур и элементов управления системой EER. Все три элемента имеют равную значимость при проектировании и эксплуатации системы EER на установках, расположенных в арктических или холодных регионах.

Второй руководящий принцип заключается в постоянном совершенствовании и оценке процессов. Это включает не только выбор на стадии проектирования системы EER технических средств, удовлетворяющих критериям работы системы, но и постоянное динамическое совершенствование и оценку. Последний аспект требует от оператора подтвердить, что процесс совершенствования на основе критериев качества внедрен, и его можно проверить на основе соответствующих отраслевых данных.

Три элемента, представленные на рисунке A.18.2, являются частью постоянного процесса оценки с учетом экологического состояния и других рисков, которые могут рассматриваться в качестве элементов общей системы охраны труда, безопасности и окружающей среды.

#### **A.18.2.2.2. Целостность технических систем**

Разработка системы EER (и соответствующих базовых стандартов) начинается с проектирования технических систем, таких как пути эвакуации, временные убежища, методы покидания и т.д. Оборудование должно быть спроектировано надлежащим образом в соответствии со стандартами качества системы EER. Необходимо поддерживать техническое состояние этого оборудования для соответствия ожидаемым природным, эксплуатационным и нештатным условиям.

#### **A.18.2.2.3. Компетентность персонала**

Вторым принципиальным элементом, который следует разрабатывать одновременно с проектированием технических систем, являются требования к

компетентности персонала. Эти требования должны быть определены заранее, чтобы обеспечить проведение регулярных тренингов по вопросам безопасности эвакуации, покидания и спасании, а также для разработки и оценки основных задач и распределения ответственности среди руководящего состава цепочки управления системой. Персонал следует обучать и готовить к работе в ожидаемых рабочих и аварийных условиях. Информация о каждом разворачивании средств, тренировке/учениях, проверке и техническом обслуживании должна быть документально зафиксирована в журнале установки.



Рисунок А.18.2 – Схема основных принципов системы EER для нефтегазовых сооружений

#### А.18.2.2.3. Процедуры и элементы управления

Третьим элементом системы является своевременная разработка процедур EER и элементов управления в дополнение к целостности технических систем и компетентности персонала. Обычно сюда входят процедуры сбора при EER, требования к связи, разработка сценариев EER и соответствующих учений и т.п. На

этапе эксплуатации добавляются процедуры поддержания целостности системы EER, охватывающие как технические средства, так и поддержание компетентности персонала.

Важно понимать, что все три элемента должны применяться в каждой части «треугольника EER» до начала каждого специального этапа проекта, включая одновременные операции. Соответствующие процедуры необходимо разработать, проверить и испытать до начала каких-либо работ персонала в море для всех этапов расчетного срока эксплуатации сооружения: изысканий, строительства, ввода в эксплуатацию, эксплуатации, вывода из эксплуатации и эвакуации. Эти элементы являются неотъемлемой частью определения эксплуатационной готовности системы EER. Эти принципы и обязательные элементы системы EER обычно являются частью системы охраны труда, безопасности и окружающей среды каждого конкретного объекта. В соответствующем разделе приведены данные по анализу и предупреждения рисков для сооружения, основные роли в области HSE, требования к компетентности и т.д.

В некоторых районах арктические или холодные условия внешней среды отмечаются лишь в отдельные периоды года. Следовательно, элементы EER (технические системы, компетентность персонала, процедуры и элементы управления) должны разрабатываться также с учетом требований теплого периода года.

### **A.18.3 Стратегия системы EER**

Дополнительные руководящие указания не представлены.

### **A.18.4 Окружающая среда**

#### **A.18.4.1 Общие положения**

Окружающая среда арктических районов и других регионов с холодным климатом оказывает существенное влияние на все аспекты системы EER. Поэтому различные условия окружающей среды должны учитываться при разработке и реализации плана EER. В A.18.4 представлены указания по выбору факторов, учитываемых при разработке системы EER для арктических сооружений в замерзающих морях. Дополнительные указания по выбору, проектированию и



обслуживанию морского оборудования для операций в арктических районах и других регионах с холодным климатом содержатся в [350].

Условия включают следующие факторы окружающей среды:

а) Температура воздуха и охлаждение ветром, включая эффект охрупчивания материалов, необходимость подготовки к зимнему сезону, пуск механических и гидравлических систем в холодную погоду, использование средств индивидуальной защиты, снижение возможности ручных манипуляций (ловкости рук) и вызванную этим необходимость качественного эргономичного дизайна для работы с внешними устройствами управления в условиях, когда персонал пользуется утепленной спецодеждой для защиты от холода.

Эргономичный дизайн может обеспечивать возможность эксплуатации в громоздкой зимней одежде, или же необходимо спроектировать менее громоздкую, но в достаточной степени теплую одежду. Смазочные материалы, топливо и гидравлические жидкости следует выбирать в соответствии с ожидаемыми минимальными температурами. Двигатели должны удовлетворять дополнительным требованиям по пуску при низких температурах (системами предварительного подогрева или аккумуляторами высокой мощности). Проектирование систем охлаждения (радиаторы и/или морская вода) должно исключать возможность закупорки вследствие замерзания впускных каналов. Из-за низких температур также требуется, чтобы одежда и обувь персонала была достаточно теплой и соответствовала условиям окружающей среды, однако это затрудняет движение. Защитные средства для лица и головы могут затруднять общение. Если панели управления спроектированы неверно, управление механизмами в тяжелых защитных перчатках может быть затруднительно и иногда невозможно.

б) Полный спектр естественного дневного освещения, включая такие аспекты как адекватное освещение и хорошая видимость для систем EER.

в) Ветер, включая эффекты плохой видимости для персонала на борту или в воздухе, передвижения по поверхности, защиту персонала и опасность обморожения.

г) Морское и атмосферное обледенение, включая такие аспекты, как обеспечение безопасных опор, целостности путей эвакуации, доступ к оборудованию для покидания, защиту критически важных механизмов, замерзание замков, остойчивость малых судов, вертолетные операции, палубные операции.

д) Видимость, включая влияние снежных бурь, туманов, ледяной дымки на летные условия, видимость для персонала, использующего капюшоны.

е) Открытая вода низкой температуры, включая вопросы выживания персонала (возможность быстрого переохлаждения при попадании в воду без специального спасательного костюма), использование систем покидания и влияние состояния моря на надежность эвакуационных и спасательных систем.

ж) Комбинация ледовых и волновых условий, включая эффекты снижения надежности системы EER в условиях, когда волны могут передать большую энергию малым кускам льда (например, риск повреждения и нарушения конструктивной целостности спасательного плавсредства).

з) Местные остаточные, ветровые и приливные течения, включая их воздействие на выбор и применение эффективной модели отслеживания движения воды и льдов для поддержки спасательных операций. Вопросы включают факторы различной скорости дрейфа людей, находящихся в воде и на льду, а также глубокую осадку ледяных образований вследствие действия глубинных течений и поверхностного ветра.

и) Ледовые условия, влияющие на выбор систем покидания и возможность применения альтернативных вариантов, например, использование устойчивого ледяного покрова в некоторые периоды года в качестве временного безопасного места или площадки для спасательного плавсредства (если предусмотрено стратегией покидания). Некоторые факторы, возникающие при ледовом воздействии, влияют на надежность и применение различных систем покидания. В системах покидания необходимо учитывать как выживаемость в воде, так и на поверхности льда. В различных ледовых условиях ряд факторов оказывают влияние на выбор типа системы EER, включая следующее:

– Сплоченность льда. Сплоченность льда может оказывать влияние на используемые системы покидания и спасания. Для разных систем в силу отдельных факторов могут возникать преимущества использования при низкой, средней или высокой сплоченности льда, а некоторые системы могут лучше работать в определенной сплоченности льда сравнительно с иными.

– Скорость дрейфа льда. Наиболее трудными могут стать ледовые условия, характеризующиеся высокой динамикой. К примеру, быстродвигающиеся ледяные поля могут препятствовать спуску на воду спасательного плавсредства. С другой стороны, высокая скорость дрейфа может помочь выжившим быстро удалиться от платформы. Возможность точного прогноза ледового дрейфа является важным фактором для планирования и проведения эффективных поисково-спасательных операций в арктических регионах и районах с холодным климатом.

– Толщина льда. При новом тонком льде обычно возникает меньше проблем, однако однозначно исключается возможность покидания на поверхность льда. Толстый лед, как правило, создает массу трудностей для малых спасательных плавсредств и мощных дежурных судов. С другой стороны, иногда толстый лед может использоваться для поддержки эвакуационного средства или временного места покидания.

– Тип льда. В некоторых арктических и холодных районах наблюдаются смешанные однолетние, двухлетние и многолетние льды. Поля старого льда могут быть значительно прочнее однолетнего и могут представлять угрозу целостности плавсредств и влиять на возможность удержания на точке ледокольных судов. С другой стороны, такие поля могут также использоваться как стабильные площадки для выживших.

– Размер ледяного поля. Размер ледяного поля является важным. Крупные поля мощного льда (диаметром сотни метров) могут использоваться для размещения убежища, тогда как сочетание малых динамичных полей с высоким волнением и качкой может создавать опасность для малых спасательных плавсредств.

– Неровность льда. Неровности на поверхности льда могут создавать трудности при перемещении по его поверхности. Это может иметь критическое значение, если выжившим будет необходимо пересечь ледовые завалы, чтобы добраться до дежурного спасательного судна. Мощный неровный лед может не позволить дежурному судну подойти к платформе и забрать выживших на борт. Неровный паковый лед может создавать дополнительные проблемы для удержания на точке дежурных судов.

– Давление льда. Внутреннее давление во льдах может значительно влиять на возможность отхода спасательных плавсредств от платформы или передвижения. Сильное давление может привести к опрокидыванию и потенциальному разрушению малых спасательных плавсредств.

– Сочетание ледовых и волновых условий. При малой сплоченности льда волнение или качка могут вызывать дополнительные трудности при спуске спасательных аппаратов в море. Малые льды могут угрожать целостности спасательного плавсредства, т.к. сочетание энергии волн и малых ледяных полей может создать высокую локальную ударную нагрузку.

– Весеннее таяние. В этой ситуации возникает множество проблем для проведения покидания в зависимости от типа выбранной системы. Мобильность на поверхности льда резко снижается из-за участков таяния и открытой воды, и ледовая поверхность становится слишком опасной, чтобы рассматривать вариант покидания на лед.

#### **А.18.4.2 Условия окружающей среды**

Компетентность принятия решений в процессе постоянного анализа системы EER частично зависит от доступности точных и актуальных метеорологических, ледовых и океанографических данных.

Применимые правила и публикации, содержащие подробные требования к спасательному оборудованию, применяемому в арктических условиях и в районах с холодными водами, включая защитные водные костюмы и влияние условий окружающей среды на выбор оборудования, включают документ [351], ИСО 15027

[352] и документ [353]. Дополнительное руководство можно найти в документах [354] и [355].

## А.18.5 Анализ опасностей и рисков

### А.18.5.1 Общие положения

Система эвакуации, покидания и спасения предназначена для смягчения воздействия на персонал опасностей, возникающих при крупной аварии. Начальной задачей системы является максимально раннее выявление потенциальной опасности, а конечной задачей – устранение опасности или спасение всего персонала и доставку его безопасное место.

В процессе анализа рисков определяются опасности, оцениваются частоты их возникновения и последствия, разрабатываются соответствующие меры по предупреждению, обнаружению, управлению и смягчению. Этот процесс обычно называется процессом управления опасностями и последствиями. Целью проведения подобного анализа является оценка проекта и возможных изменений на основных стадиях для подтверждения, что риски для персонала в рамках всего проекта снижены, по крайней мере, до минимального практически достижимого уровня. На рисунке А.18.3 приводится пример последовательности этапов, и их взаимосвязь в ходе процесса проектирования.

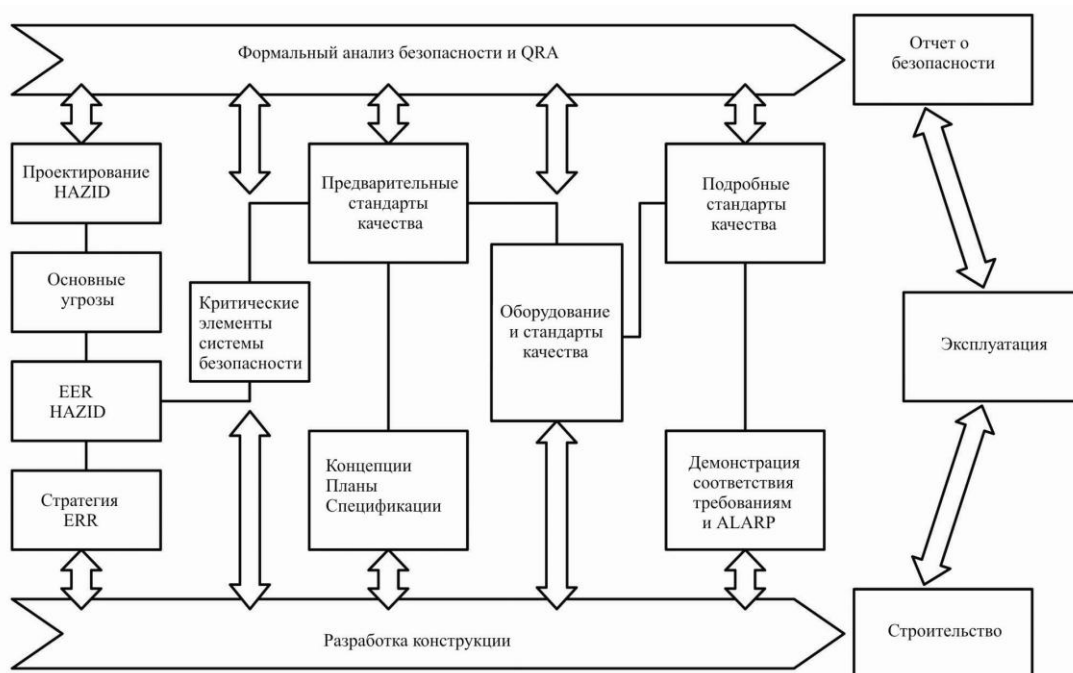


Рисунок А.18.3 – Процесс разработки системы EER на основе стандартов качества

В ходе анализа рисков необходимо рассмотреть сценарии развития событий и последствий для морских операций. Сюда может относиться следующее: плавучие гостиницы, баржи, резервные суда и любые другие конструкции или суда, которые могут подвергаться опасностям, возникающим на установке. Определение границ опасной зоны и их возможного изменения является фундаментальной задачей при создании системы EER.

Стандарты качества EER определяют критерии, учитывающие специфику данной установки или места, в соответствии с которыми в ходе проектирования и в течение всего расчетного срока службы установки должна осуществляться оценка оборудования и процедур системы безопасности на их соответствие требованиям. Проектирование EER должно являться неотъемлемой частью разработки концептуального и рабочего проекта установки, предназначенного минимизировать риск для персонала в ходе EER и снизить вероятность убытков (затрат и нарушения графика работ). Критерии стандартов качества являются поддающимися проверке показателями или контрольными точками, которые определяют целевые качественные уровни и (или) количественные показатели. Важно понимать, что соответствие требованиям предписывающих нормативных документов не является достаточным условием обеспечения соответствия стандартам качества.

Документально оформленная процедура проверки, распространяющаяся на систему EER, должна определять содержание и периодичность проверок, и, при необходимости, предусматривать проверки до начала использования оборудования или после его модификации или ремонта. Эти требования также можно сформулировать в стандартах качества.

Требования к спасательным средствам могут различаться в зависимости от установки, уровня воздействию низких температур и т. д. Целью проверки спасательных средств является:

- оценка пригодности с начала применения, совместимости с другими спасательными средствами, пригодности в течение срока эксплуатации;
- оценка состояния;

- определение необходимых мер по исправлению ситуации.

Данная процедура необходима для подтверждения того, что были выбраны наилучшие элементы, процедуры и службы поддержки, соответствующие стандартам качества системы EER и принципу ALARP.

Своевременное выполнение всех рекомендаций в отношении системы EER (т.е. действий HAZID) на соответствующем этапе и подтверждение их выполнения является важным фактором, который часто недооценивается, и поэтому требует особого внимания в условиях арктических районов и регионов с холодным климатом.

#### **A.18.5.2 Идентификация опасностей**

В исследованиях по идентификации опасностей (HAZID) должны принимать участие представители всех ключевых дисциплин, имеющих отношение к эвакуации, покиданию и спасанию. Если применимо, необходимо включать специалистов по эксплуатации, морским и авиационным операциям, специалистов по эвакуации и ликвидации ЧС, консультантов по ледовой обстановке и т.д. Если имеется взаимосвязь с какой-либо областью деятельности, должны привлекаться соответствующие специалисты.

Если оцениваемые риски соответствуют неприемлемым значениям матрицы рисков, необходимо вносить изменения в проект.

Процесс оценки должен проводиться с учетом новых технологий, исследований новых и инновационных методов покидания, которые могут быть более надежными и лучше соответствовать условиям арктических районов, чем используемое сейчас традиционное оборудование.

Методики, которые могут использоваться для обеспечения принятия решений и обоснования соответствия принципу разумной достаточности, включают:

- количественный анализ риска (QRA);
- анализ живучести аварийных систем;
- моделирование/анализ последствий;

- дерево событий (например, вероятностные логические цепочки для системного определения вероятностей различных исходов при возникновении заданного нежелательного события);

- анализ последствий (например, анализ последствий при распространении газа и дыма, анализ распространения газового факела, анализ риска пожара и взрыва и т.п.).

Применимые методики для оптимизации проекта EER включают трехмерное моделирование последствий и имитационное моделирование эвакуации/покидания.

При проведении количественного анализа риска рассчитываются частоты возникновения событий и их последствий с использованием соответствующих методик. Количественный анализ риска может являться действенным инструментом для:

- определения, какая из опасностей крупной аварии характеризуется наибольшим риском;

- определения отдельных элементов системы EER, выполняющих критически важные функции в области безопасности для различных сценариев аварийной ситуации;

- оценки эффекта предлагаемых мер по снижению риска.

Результаты количественного анализа риска для определенного перечня элементов системы EER сравниваются с результатами для другого перечня элементов при возникновении заданных событий на установке. Для обоснования предлагаемых мер снижения риска (например, применения новой технологии или дополнительных способов покидания) результаты количественного анализа риска обычно выполняются совместно с анализом экономической эффективности, оценкой затрат на предотвращение смертельных случаев и оценкой частоты повреждения временного убежища. Результаты количественной оценки риска используются в качестве исходных данных для определения стандартов качества EER.



### **A.18.5.3 Анализ риска**

#### **A.18.5.3.1 Анализ риска при эвакуации**

Компоновка и местоположение морской установки оказывают ключевое влияние на результаты анализа рисков, возникающих при эвакуации.

Аспекты, которые должны быть рассмотрены, включают, но не ограничиваются, следующим перечнем:

- сценарии ухудшения состояния путей эвакуации (например, при воздействии льда, снежной бури, низкой видимости, низких температур, воздействии тепла, токсичных газов, дыма, разрушенного или сдвинутого взрывом оборудования и т.п.);
- возможность использования защищенных или не поврежденных при аварии других путей к защищенному пункту сбора во временном убежище (ВУ);
- распределение персонала и местонахождение людей во время инцидента;
- время, необходимое для мобилизации;
- время в пути, вертикальные и горизонтальные лестницы, трапы, межуровневые проходы, учитывая воздействие низких температур, обледенения, потерю устойчивости, физическую ловкость людей, одежду и т.п.
- ширина путей эвакуации относительно местонахождения персонала и возможные узкие места с возникновением затора;
- время для сбора всего персонала, включая время оказания помощи травмированным и учитывая уровень подготовки персонала;
- надежность ВУ, включая устойчивость к воздействию пожара, конструктивную целостность и подачу воздуха;
- надежность основных опорных конструкций ВУ;
- защита границ зон, противопожарные и взрывозащитные стены требуемого класса, увлажнители системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ);

- соответствующие средства жизнеобеспечения персонала в месте сбора для максимальной продолжительности пребывания, учитывая надлежащим образом внешние факторы;
- доступность и размещение средств индивидуальной защиты, средств покидания объекта;
- человеческий фактор, включая влияние психологического фактора на уровень ошибок в действиях персонала и возможности выполнения персоналом своих функций в условиях стресса;
- средства управления, мониторинг уровня опасности, связь;
- связь с центром управления и вспомогательными службами;
- управление и контроль, наличие необходимой организационной структуры ликвидации ЧС, когда это потребуется.

#### **A.18.5.3.2 Анализ риска при покидании**

##### **A.18.5.3.2.1. Виды покидания**

Метод(ы) и процедуру покидания необходимо выбирать с учетом уровня рисков. Соответствие системы стандартам качества должно быть проанализировано с момента раннего предупреждения о возможном инциденте (дающего время на проведение предупредительного покидания) до потери управления, угрожающей безопасности персонала (что приводит к необходимости аварийного покидания).

##### **A.18.5.3.2.2. Предупредительное покидание**

При подаче сигнала о возможном инциденте необходимо рассмотреть необходимость покидания для не ключевого персонала как меру снижения/устранения воздействия опасности. Оператор должен обосновать, что риски для эвакуируемого персонала при проведении предупредительного покидания не превышают риски пребывания на объекте. Покидание персоналом в этом случае также называют предупредительным покиданием. Во время проведения предупредительного покидания следует использовать наиболее надежные методы покидания. Обычно это предпочтительные средства покидания.

Анализ риска, необходимый для обоснования выбора метода предупредительного покидания, должен включать, не ограничиваясь, следующие критерии:

- оценку периода времени от возникновения возможного инцидента до необходимости аварийного покидания;
- имеющееся время для мобилизации метода покидания;
- время проведения покидания;
- определение не ключевого персонала, который должен эвакуироваться с объекта;
- дистанция до спасательных платформ или безопасных мест;
- существующие и прогнозируемые условия окружающей среды (погода, ледовые условия, состояние моря и т.п.) в период покидания и спасания;
- имеющиеся в наличии средства для погрузки и транспортировки персонала;
- человеческий фактор, включая уровень подготовки персонала;
- возможность транспортировки эвакуируемого персонала за пределы потенциально опасной зоны.

#### **А.18.5.3.2.3. Аварийное покидания**

При возникновении прямой опасности для персонала объекта необходимо проводить аварийное покидание.

Анализ риска, необходимый для обоснования соответствующих методов аварийного покидания, обычно должен включать, не ограничиваясь, следующие критерии:

- подготовку к покиданию в период пребывания в ВУ, включая оценку состояния персонала, опасности аварии, существующие и прогнозируемые условия окружающей среды, близость и доступность спасательных платформ и/или безопасных мест;
- осведомленность о развитии/изменении ситуации и ее последствий в опасной зоне в период проведения покидания;

- защита путей покидания установки от ВУ до первичной системы покидания;
- возможность применения метода покидания и соответствие стандартам качества (функциональность, доступность, надежность, выживаемость, взаимозависимость с другими системами);
- время погрузки персонала в зависимости от его размещения с учетом времени для оказания помощи пострадавшим;
- распределение людей и их поведение в различных сценариях, учитывая возможности имеющихся систем;
- человеческий фактор в условиях стресса, учитывая уровень подготовки к действиям при аварии;
- доступ к носилкам, наличие травмированных, оказание медицинской помощи в ходе покидания после выхода из ВУ и при перемещении к спасательной платформе;
- воздействие морской болезни на проведение операций;
- возможность применения метода покидания при ожидаемых низких температурах и ледовых условиях;
- видимость на участке транспортировки, риск столкновений в ночное время и т.п.;
- спуск на воду и путь от установки до мест сбора на спасательных платформах.

#### **А.18.5.3.3 Анализ риска для спасания**

Процесс спасания (и транспортировки) начинается, когда в ходе покидания персонал переместился за пределы опасной зоны объекта. Спасание включает жизнеобеспечение и подъем людей непосредственно из моря и/или с поверхности льда, подъем/перемещение спасательных средств с людьми из воды или с поверхности льда на спасательную платформу. Спасательные операции считаются завершенными, когда весь эвакуируемый персонал доставлен в определенное безопасное место.

Анализ риска для оценки надежности и обоснования применения доступных методов при спасании должен включать следующие критерии:

- погодные ограничения (состояние моря, ледовые условия) при проведении спасательных операций и применении соответствующих средств (в воздухе и на поверхности);
- возможности эвакуируемого персонала и состава спасательных подразделений, включая уровень подготовки;
- технические возможности, вместимость и соответствие спасательных платформ (количество перемещений, возможность применения в опасной зоне);
- время от начала эвакуации до завершения спасательных операций;
- время поиска для спасательных систем с учетом соответствующих ограничений по видимости и погодным условиям;
- надежность каналов связи между эвакуируемым персоналом и спасательной платформой или системой поиска, включая точность радиолокационного метода;
- уровни медицинского обеспечения (возможность сортировки раненых) на спасательной платформе;
- устройства для перемещения носилок на спасательную платформу;
- риски для экипажа спасательной платформы в ожидаемых ледовых и погодных условиях (взаимозависимость с другими системами);
- кривая смертности относительно применения СИЗ/времени спасания для каждой отдельной системы покидания.

## **А.18.6 Регулярная оценка**

### **А.18.6.1 Описание постоянной оценки**

Регулярная оценка помогает обеспечить соответствие стандартам качества EER независимо от возможных изменений.

Для проверки состояния готовности системы EER может использоваться простой подход, заключающийся в опросе с ответами «да» / «нет», что позволит

оценить и отразить состояние готовности элементов системы EER, как показано на рисунке А.18.4.

Постоянная оценка и усовершенствование			Состояние EER
Условия окружающей среды (прогнозирование морских и погодных условий)	<input checked="" type="checkbox"/>	или	<input type="checkbox"/>
Анализ риска и минимизация воздействия (рук-во по допуст. операциям матрица EER)	<input checked="" type="checkbox"/>	или	<input type="checkbox"/>
Целостность аппаратуры (конструкция, ТО, подготовка к зимним условиям)	<input checked="" type="checkbox"/>	или	<input type="checkbox"/>
Компетенция персонала (обучение, тренировки, управление персоналом на борту)	<input checked="" type="checkbox"/>	или	<input type="checkbox"/>
Проведение мероприятий и управление (связь, сигнализация, управленческая цепь)	<input checked="" type="checkbox"/>	или	<input type="checkbox"/>

Рисунок А.18.4 – Иллюстрация процесса постоянной оценки и усовершенствования для систем EER

Данная оценка включает вспомогательные процессы, представленные с А.18.6.2 по А.18.6.6.

#### А.18.6.2 Окружающая среда

Как обсуждалось в А.18.5, частью элементов управления системой EER является разработка соответствующих процедур прогнозирования ледовых, метеорологических и природных условий. Процедуры прогнозирования используются для оценки влияния внешних воздействий на эффективность системы EER и позволяют убедиться, что расчетные параметры системы EER находятся в пределах заданных эксплуатационных показателей. Этот процесс является постоянным и включает регулярное обновление соответствующих параметров начальником морской установки, который несет полную ответственность за принятие решений, командование и управление в области EER.

#### А.18.6.3 Риск

Риск является вторым внешним параметром, влияющим на оценку системы EER. Анализ риска следует начинать на ранних этапах проектирования путем идентификации основных рисков установки (процесса). Частью данного процесса оценки рисков является определение мер по его снижению, которые могут потребоваться для выполнения условия соответствия ALARP. Для соответствия

ALARP и формирования части процесса EER необходимо разработать и внедрить руководящие механизмы управления. Сюда относится разработка руководства по допустимым операциям, которое рекомендуется дополнить критериями выбора системы EER, чтобы предоставить начальнику морской установки возможность постоянной оценки процесса принятия решений в области EER.

Другими словами, оценка рисков является не разовым процессом в ходе проектирования, а повторяющимся процессом подтверждения соответствия и частью принятия решений EER, что способствует или определяет состояние готовности системы.

#### **A.18.6.4 Целостность технических систем**

После проектирования, строительства и подготовки к работе оборудования объекта (включая систему EER) необходимо обеспечить предусмотренную проектом целостность сооружения в указанных пределах, независимо от условий окружающей среды. Проект системы EER должен предусматривать необходимые процедуры профилактического технического обслуживания. Своевременное выполнение на этапе эксплуатации этих процедур профилактического обслуживания системы EER, которые должны быть классифицированы как критически важные для безопасности, является обязательным.

#### **A.18.6.5 Компетентность персонала**

После определения требований к компетентности персонала системы EER (включая выполнение критических задач HSE), необходимо внедрить программу обучения и повышения квалификации. Частью этой программы обучения является оценка компетентности персонала до начала работ на установке, особенно в случае выполнения им критически важных обязанностей HSE (например, начальник морской установки). Для персонала необходимо установить процедуры медицинского/физического освидетельствования, в соответствии с требованиями к проведению работ на арктических морских объектах и учитывая должностные обязанности персонала и его обязанности в области EER. Для поддержания компетентности необходимо регулярно проводить учения и тренировки EER по сценариям чрезвычайных ситуаций.

#### **A.18.6.6 Процедуры и элементы управления**

Процедуры и элементы управления системы EER, разработанные на этапе проектирования, должны регулярно пересматриваться и приводиться в соответствие требованиям путем аудита. Эти процедуры обычно включают определение персональной ответственности за целостность системы EER, определение цепочки команд и списка важнейших задач HSE системы EER. Обычно указанные процедуры включаются в сценарий HSE для объекта. Проведение регулярных учений по сценариям чрезвычайных ситуаций является критически важным элементом обучения и обеспечения необходимого состояния готовности объекта и персонала. Частью системы управления эвакуацией, покиданием и спасением HSE служит система обнаружения находящегося на борту персонала (POB) (т.е. использование идентификационных карт или более современной электронной системы слежения). Это позволяет обеспечить необходимый уровень управления учетом персонала на борту, в том числе процедурой сбора.

#### **A.18.7 Проектирование системы EER**

Должен быть учтен ряд вероятных сочетаний природных условий, ожидаемых на объекте, включающих температуру моря и воздуха, параметры ветра, волн, течений, морского льда, айсбергов и условия видимости. При проектировании сооружения и обеспечении надежности технологических операций учитываются элементы, которые могут повлиять на систему EER и на выбор оптимальных составляющих EER:

- присутствует ли в штатных условиях на объекте персонал, ожидаемые максимальная и средняя численность персонала, расписание смен, места расположения персонала, смены команды, частота посещений и обстоятельства для объекта без постоянного присутствия персонала;
- сценарии крупных аварий и их воздействие на систему EER, определенные в оценке риска для объекта, включая пожар, взрыв, токсичные выбросы, крупные разрушения конструкции, столкновение с судном или айсбергом и другой урон важным вспомогательным системам;



- возможные опасности для персонала в рассмотренных сценариях, включая опасности во всех возможных местах нахождения персонала;
- меры предотвращения ущерба системе EER;
- расположение и целостность места сбора и/или временных убежищ, путей к ним или другим пунктам сбора, а также путей от них к защищенным/неповрежденным местам покидания;
- время, необходимое персоналу для эвакуации с рабочего места во временное убежище и для перемещения из временного убежища в места покидания при ожидаемых сценариях ЧС, принимая во внимание диапазон погодных и природных условий;
- время, необходимое персоналу объекта для покидания;
- планы действий в чрезвычайных ситуациях, включающие использование запасных пунктов сбора и методов покидания;
- используемые методы и время перемещения при использовании первичных, вторичных и третичных методов покидания и последующей доставки в безопасное место;
- водонепроницаемые костюмы и другие требуемые средства индивидуальной защиты, а также их количество и места расположения на установке, которые должны быть должным образом выбраны и предусмотрены, чтобы обеспечить максимальную защиту от опасностей сценариев и условий окружающей среды;
- график и процедура технического обслуживания оборудования EER, проверки, испытания и оперативные учения для обеспечения знания, надежности и пригодности в соответствии с требованиями качества;
- проектирование оборудования для обеспечения простоты операций при низких температурах с целью отказа от использования малого или сложного оборудования;

– график и процедуры проведения обучения персонала в области EER, тренировок и крупных учений по EER в соответствии с распределением критически важных функций в области охраны труда, здоровья и окружающей среды.

– эффект факторов, вызывающих стресс, на действия персонала при EER;

– координация и связь с внешними аварийно-спасательными службами в ходе EER.

После определения критически важных элементов безопасности необходимо определить их критические функции в рамках стандартов качества. На этих стандартах можно определить гарантийные задачи в системе технического обслуживания, которые обеспечивают требуемое качество.

Стандарт качества может применяться к людям и процедурам, а также к техническим системам и отдельным единицам оборудования.

Примеры критически важных элементов применительно к ликвидации чрезвычайных ситуаций и спасательным средствам, а также шаблоны стандартов качества приведены в таблицах с А.18.1 по А.18.3.

#### **А.18.8 Организация действий в чрезвычайных ситуациях**

В инструкции об обязанностях персонала при чрезвычайных ситуациях необходимо определить аварийные сигналы, цепочки командования, места временных убежищ и альтернативных пунктов сбора, соответствующего руководителя для каждого пункта сбора, и обязанности каждого человека для каждого сценария инцидента.

#### **А.18.9 Обеспечение компетентности**

Процедура подтверждения компетентности должна быть расширена и распространяться на весь персонал поддержки, не проживающий на установке (например, команду судна обеспечения и воздушного судна, а также персонал береговой базы), но выполняющий важные задачи при ликвидации чрезвычайной ситуации.

Таблица А.18.1 – Пример групп критически важных элементов безопасности - ликвидация чрезвычайной ситуации

Критически важный элемент безопасности	Опасности для персонала / окружающей среды													Назначение элемента		
	Разрушение конструкции	Столкновение с судном	Отказ швартовых	Падение предметов	Нарушение устойчивости	LoC -пожар	LoC -взрыв	LoC – Вредные вещества	Столкновение автомот./вертол.	Отказ системы обеспечения водолазов	Просадка грунта	Загрязнение почвы/подземных вод	Загрязнение морских/речных вод		Загрязнение воздуха	
Ликвидация чрезвычайных ситуаций																
ER001 – Временные убежища/основные места сбора	–	V	V	V	V	V	V	V	V	–	–	–	–	–	Обеспечить безопасное убежище, место сбора и/или выполнить процедуры ликвидации чрезвычайных ситуаций после инцидента.	
ER002 – Маршруты эвакуации и покидания		V	V	V	V	V	V	V	V	–	–	–	–	–	Обеспечить эвакуацию и покидание для персонала после возникновения инцидента.	
ER003 –Аварийное / эвакуационное освещение		V	V	V	V	V	V	V	V	–	–	–	–	–	Освещать пути эвакуации после возникновения инцидента.	
ER004 – Системы связи		V	V	V	V	V	V	V	V	–	–	–	–	–	Обеспечить средства связи в ходе возникновения инцидента и координировать ликвидацию.	
ER005 – Система бесперебойного электропитания		V	V	V	–	V	V	V	V	V	–	–	–	–	Обеспечить подачу энергии важным потребителям при возникновении инцидента.	
ER006 – Вертолетные площадки	–	V	V	V	–	V	V	V	V	–	–	–	–	–	Обеспечить технические средства для безопасных операций вертолетов и предотвратить или смягчить последствия аварии вертолета.	
ER007 – Аварийное энергоснабжение	–	–	–	–	–	V	V	V	V	V	–	–	–	–	Обеспечить подачу энергии важным потребителям и способствовать ликвидации крупной аварии при отказе основных источников питания	
ER010 – Открытая дренажная система опасных стоков		–	–	–	–	–	V	V	V	–	–	–	V	V	–	После разлива удалить горючие или опасные жидкости управляемым способом в безопасное место
ER011 – Открытая дренажная система неопасных стоков		–	–	–	–	–	V	V	V	–	–	–	V	V	–	После выброса предотвратить распространение токсичного или горючего газа в безопасную зону
П р и м е ч а н и е – В данном примере ниже приведены критически важные элементы для EER, являющиеся частью плана ликвидации чрезвычайных ситуаций.																

Таблица А.18.2 – Группы критически важных элементов безопасности – спасательные средства

Критически важный элемент безопасности	Опасности для персонала / окружающей среды													Назначение элемента	
Спасательные средства	Разрушение конструкции	Столкновение с судном	Отказ швартовых	Падение предметов	Нарушение устойчивости	LoC -пожар	LoC -взрыв	LoC – Вредные вещества	Столкновение автоб./вертол.	Отказ системы обеспечения водолазов	Просадка грунта	Загрязнение почвы/подземных вод	Загрязнение морских/речных вод		Загрязнение воздуха
LS001 Индивидуальные средства выживания (PSE)	— V	— V	— V	— —	— V	— V	— V	— V	— —	— —	— —	— —	— —	— —	Повысить вероятность эвакуации и покидания объекта персоналом после возникновения инцидента.
LS002 Спасательные средства резервное судно	— — V	— — V	— — V	— — —	— — V	— — V	— — V	— — V	— — V	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	Повысить вероятность спасания и подъема персонала из моря.
LS003 Плавсредство аварийного покидания	— — V	— — V	— — V	— — —	— — V	— — V	— — V	— — V	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	Обеспечить средства покидания для персонала платформы, не зависящие от внешней поддержки
LS004 Третичные средства покидания	— — V	— — V	— — V	— — —	— — V	— — V	— — V	— — V	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	Обеспечить средства покидания для персонала, не имеющего возможности воспользоваться вертолетом или спасательными шлюпками.

Т а б л и ц а А.18.3 – Пример шаблона стандарта качества

(НАЗВАНИЕ УСТАНОВКИ) СТАНДАРТ КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ XXPS-E001		
КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЙ ЭЛЕМЕНТ БЕЗОПАСНОСТИ:		МАРШРУТЫ ЭВАКУАЦИИ И ПОКИДАНИЯ
Цель: Цель элемента		
ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ		
Ссылки на гарантийные задачи.	Описание гарантийных задач	Критерий приемки (да/нет)
ФУНКЦИЯ 1:	Описание функции 1.	
XXPS-E001-01-01 Связь между гарантийной задачей и техническим обслуживанием	Описание гарантийных задач (техническое обслуживание, испытания или проверка)	Описание измеряемых критериев приемки (да/нет)
НАДЕЖНОСТЬ/ДОСТУПНОСТЬ		
Ссылки на гарантийные задачи.	Описание гарантийных задач	Критерий приемки (да/нет)
ФУНКЦИЯ 2:	Доступность критически важных элементов для безопасности	
XXPS-E001-02-01	Детальные требования по доступности	Описание измеряемых критериев приемки (да/нет)
ФУНКЦИЯ 3:	Надежность критически важных элементов для безопасности	
XXPS-E001-03-01	Детальные требования по надежности	Описание измеряемых критериев приемки (да/нет)
ВЫЖИВАЕМОСТЬ		
Событие	Описание гарантийных задач	Критерий приемки (да/нет)
Пожар и взрыв	Детальные требования по выживаемости в случае пожара и взрыва	Описание измеряемых критериев приемки (да/нет)
Разрушение конструкции	Детальные требования по выживаемости в случае поломки конструкции	Описание измеряемых критериев приемки (да/нет)
Столкновение с судном	Детальные требования по выживаемости в случае столкновения с судном	Описание измеряемых критериев приемки (да/нет)
ЗАВИСИМОСТЬ		
Система	Критичность	Применимые стандарты качества
Зависимость от других элементов		

#### **А.18.10 Системы связи и оповещения**

Необходимо стандартизировать сигналы звукового и визуального оповещения о чрезвычайной ситуации для района операций, если это практически возможно.

В зонах с высоким уровнем шума необходимо дополнить звуковое оповещение визуальными сигналами, такими как проблесковые маячки.

Начальник установки должен иметь во временном убежище доступ ко всей требуемой информации для принятия решения о необходимости и методах покидания установки, включая информацию о состоянии установки, средствах управления и мониторинга технологического процесса и другую применимую информацию.

Если для связи предусмотрены портативные радиостанции, они должны быть полностью заряжены и доступны на каждом пункте сбора. Следует оценить потребность во взрывобезопасных средствах связи для персонала, отвечающего за ликвидацию чрезвычайной ситуации.

Если практически возможно, необходимо стандартизировать способы передачи информации о состоянии платформы.

#### **А.18.11 Средства индивидуальной защиты**

Выбор СИЗ, включая количество, типы и места хранения, должен быть частью стратегии системы EER. Количество СИЗ должно включать комплекты, размещенные в жилом комплексе в расчете на максимальную численность персонала на борту, а также запасные комплекты, размещенные в стратегических точках на установке.

Необходимо предусмотреть, в достаточном количестве, следующий минимальный перечень типов СИЗ, который должен быть проанализирован в ходе разработке системы EER:

- водонепроницаемые костюмы, если предусмотрено законодательством и (или) стратегией EER;
- спасательные жилеты (одеваемые через ноги с привязными ремнями, не смещающиеся при прыжках или падениях с высоты);

– противодымные капюшоны (малые, не требующие технического обслуживания сумки, не респиратор или кислородная маска). Также нужно оценить потребность в эвакуационных кислородных масках;

– фонарики.

Места размещения должны включать жилой комплекс и другие стратегические точки.

Когда стратегия EER включает использование вертолетов, наилучшим при перевозках персонала на установку и с нее является использование транзитных или водонепроницаемых костюмов, предотвращающих охлаждение тела, если иное не будет определено анализом EER. При выборе вертолетного транзитного костюма необходимо учесть требуемый запас плавучести (выбор между удобством перемещения и выживаемостью на воде).

Если необходимо, в дизайне водонепроницаемого костюма необходимо предусмотреть возможность использования устройства для дыхания под водой для удобства эвакуации с затонувшего вертолета, также костюм должен иметь брызговик для защиты от волн для увеличения срока выживания, проблесковый маячок, индивидуальный датчик места нахождения и свисток для содействия в поисково-спасательных операциях.

При выборе СИЗ нужно учесть их работу в замерзающей воде и (или) при арктических температурах воздуха в расчете на максимальный требуемый срок выживания.

#### **A.18.12 Спасание человека за бортом**

В зависимости от состояния моря и наличия льда спасание человека за бортом может включать использование быстроходного спасательного катера, размещенного на судне обеспечения или на установке, плавсредства для покидания в море или иных мер, предусмотренных анализом EER.

В стратегических точках установки, где возможно падение за борт, необходимо предусмотреть индивидуальные средства спасания человека за бортом. Количество средств, снабженных фонариками, активируемыми при контакте с

водой, дымовыми сигналами и извлекающими тросами, должно быть определено в анализе EER.

Где необходимо, размещение и дизайн средств спасания людей за бортом должны учитывать эффект морского брызгового обледенения, наличие льда и снега.

### **А. 18.13 Проектирование системы эвакуации**

#### **А. 18.13.1 Общие положения плана эвакуации**

Целью эвакуации является обеспечение передвижения персонала при возникновении чрезвычайной ситуации в относительно безопасное место на установке, в соответствии с установленными стандартами качества.

#### **А.18.13.2 Пути эвакуации**

В надлежащем плане эвакуации должно быть учтено следующее:

- достаточное число путей эвакуации должно быть доступно персоналу в течение требуемого времени для передвижения во временное убежище или пункт сбора;
- проект путей эвакуации и лестниц должен обеспечивать передвижение с носилками, работу аварийно-спасательных и пожарных команд.
- необходимые средства для обеспечения быстрого спуска персонала, одевшего громоздкие СИЗ, на основной путь эвакуации на палубе из удаленных мест, таких как верх буровой вышки или факельная стрела.
- пути эвакуации должны быть максимально прямыми и горизонтальными, с минимальным количеством лестниц. Основные пути эвакуации не должны включать вертикальные лестницы. На внешних участках необходимо обеспечить слив или иные средства для уменьшения образования льда, в том числе средства удаления льда и снега с путей эвакуации, если проектом невозможно предотвратить их накопление.
- максимальное практически возможное разнесение выходов. Необходимо оценить интерьер помещений на предмет возможного блокирования выходов после аварии, а также возможность внешнего блокирования с целью обеспечить как минимум один свободный выход.



– если предусмотрено дистанционное управление шлюзовыми и водонепроницаемыми дверьми, необходимо обеспечить соответствующую сигнализацию, срабатывающую до закрытия двери.

#### **А.18.13.3 Временное убежище**

Проект временного убежища должен учитывать следующее:

– достаточная вместительность для максимальной разрешенной численности персонала на борту на весь срок пребывания.

– подача воздуха во временное убежище должна производиться из различных источников, при этом каждый воздухозаборник должен автоматически перекрываться при локальном обнаружении дыма или газа и быть защищенным от влияния окружающей среды. Необходимо предусмотреть достаточное количество и формы хранения кислорода для обеспечения подачи воздуха в полностью изолированном помещении в течение необходимого срока.

– во временном убежище должно быть обеспечено оказание медицинской помощи в соответствии с проектом EER.

– в стратегических точках установки должна быть информация о размещении персонала, организации ликвидации чрезвычайной ситуации и аварийном оповещении.

– внутри или в непосредственной близости от временного убежища должны находиться соответствующие СИЗ для поисково-спасательных операций, данные СИЗ необходимо держать в состоянии готовности и обеспечить защиту от низких температур.

– критически важные элементы безопасности, включая ОВКВ, герметизацию проемов, устройства запираения / закрытия дверей.

#### **А.18.13.4 Пункт сбора**

При определении размера пунктов сбора нужно учитывать возможность размещения травмированного персонала, а также дополнительный персонал, прибывший на вертолете, когда вертолет не может улететь; персонал с судна обеспечения, находящийся на установке и т.д.

Альтернативные пункты сбора должны обеспечить защиту от факторов аварии и окружающей среды в течение времени, достаточного для локализации чрезвычайной ситуации или принятия решения об покидании установки.

#### **A.18.14 Проектирование системы покидания**

##### **A. 18.14.1 Покидание – общие положения**

Целью покидания является обеспечение покидания персоналом установки в относительно безопасное место за пределы опасной зоны, в соответствии с установленными стандартами качества.

В матрице, представленной в таблице А. 18.4, приведен пример, почему начальник морской установки, работающей в условиях арктического или холодного климата, должен иметь несколько возможных вариантов покидания. Также в данной матрице описывается процесс принятия решения.

При проектировании доступа на площадки посадки и эвакуационные плавсредства необходимо обеспечить быструю посадку персонала и предотвратить поступление углеводородов и токсичных газов. Дизайн интерьера должен обеспечить эффективную погрузку и размещение персонала на судах, и уход за ранеными.

##### **A. 18.14.2 Разработка методов покидания**

При разработке системы покидания нужно рассмотреть следующие вопросы:

- При необходимости, средства покидания должны быть обеспечены ограждением или обладать достаточной прочностью для минимизации эффекта удара о другие конструкции или лед. При проектировании устройств необходимо обеспечить функциональность, учитывая морское и атмосферное обледенение, низкие температуры и снег.

- Применяемые методы покидания должны быть осуществимы в природных условиях холодных и арктических районов. Нужно учитывать обеспечение доступа и посадки, эксплуатацию в зимних условиях, обледенение (до и после пуска), видимость и т. д. Существующие системы покидания имеют ограничения по эксплуатации в различных ледовых условиях. Например, обычные

спасательные шлюпки (TEMPSC) не могут передвигаться, если сплоченность льда превышает 5 баллов. Морские системы покидания следует выбирать или разрабатывать с учетом необходимости эксплуатации в любых проектных ледовых условиях.

Т а б л и ц а А.18.4 – Пример иерархии принятия решения о методе покидания:  
Матрица принятия решения о покидании начальника морской установки.

<b>Ситуация:</b> Происходит выброс из скважины, и имеется время для предупредительного покидания 80 не основных работников. 22 основных работника остаются для управления скважиной, но терпят неудачу. Они эвакуируются из опасной зоны и собираются во временном убежище, где начальник морской установки принимает решение о покидании установки, используя один или несколько ПЕРВИЧНЫХ методов (если они доступны и приемлемы в данных опасных условиях), ВТОРИЧНЫХ методов или даже ТРЕТИЧНЫХ методов покидания, если один или несколько человек не могут добраться до временного убежища.				
	<b>Предупредительные</b>	<b>Аварийные</b>		
	<b>Первичные</b>	<b>Первичные</b>	<b>Вторичные</b>	<b>Третичные</b>
Вариант 1 <sup>а</sup>	Метод А	Метод В	Метод С	Метод D
Вариант 2 <sup>а</sup>	Метод В	Метод С	Метод D	Метод Е
Вариант 3 <sup>а</sup>	N/A <sup>б</sup>	Метод D	Метод Е	Метод F
а) В случае, если первый метод недоступен (или неприемлем при существующих опасностях), начальник морской установки выбирает следующий имеющийся и надежный метод, и так далее, до полного покидания не основным и основным персоналом.				
б) Возможно отсутствие других методов с требуемым уровнем надежности для предупредительного покидания.				

– В регионах, где температура может негативно влиять на пуск двигателей, нужно принять необходимые меры по эксплуатации в зимних условиях, включая использование смазочных материалов и топлива для низких температур. В

проекте также следует оценить потребность в обогревателях двигателей, устройств непрерывной подзарядки аккумуляторов и т.д.

– В большинстве случаев необходимо предусмотреть площади, превышающие 100% максимально возможной численности для обеспечения травмированного персонала, отказ и (или) недоступность одного или нескольких методов покидания из-за возникновения непредвиденного сценария опасностей и т.д. Площади должны быть достаточными для размещения персонала, одевшего СИЗ.

– Методы покидания должны быть разработаны в соответствии с установленными принципами проектирования для человека и эргономической адекватностью, например, громоздкие СИЗ, соответствующие физическим данным человека и учитывающие эффективное применение в холодной воде при арктических температурах.

– При разработке методов покидания нужно рассмотреть потребность в автономной системе дыхания и огнезащите, и, в случае покидания морским путем, эти методы должны обладать остойчивостью и живучестью при воздействии давления ледяных полей.

– Метод покидания должен быть предусматривать средства, необходимым для содействия в поисково-спасательных операциях.

– При чрезвычайной ситуации необходимо обеспечить бесперебойное освещение площадки посадки на спасательные плавсредства, включая участок моря или льда ниже плавсредства.

– Средства третичных методов должны располагаться и храниться таким образом, чтобы они были защищены от сценария аварии, повредившей средства вторичных методов.

– Третичные средства покидания могут включать в себя закрепленные наклонные и вертикальные лестницы, веревочные лестницы и индивидуальные средства для спуска на тросе, но лишь в случае, когда их использование возможно по условиям окружающей среды.

- Вторичные методы покидания обеспечивают управляемое перемещение персонала на спасательную платформу, исключая попадание в море.
- Если предусмотрено стратегией покидания, многочисленные третичные методы (по результатам анализа EER), упрощающие спуск непосредственно на лед / в море, должны быть расположены так, чтобы обеспечить эвакуацию с установки персонала, для которого недоступны другие средства. Если предусмотрены пути покидания по льду, необходимо учитывать опасности, существующие на ледяном покрове, и уязвимость персонала при воздействии факторов аварии и окружающей среды.
- Третичные методы должны предусматривать соответствующие СИЗ для применения в холодную погоду и (или) холодной воде.

#### **A.18.15 Проектирование системы спасания**

Целью спасания является доставка эвакуируемых в безопасное место.

План системы спасания должен включать в себя следующее:

- Выживание: необходимо учитывать диапазон условий окружающей среды, в том числе температуру морской воды и воздуха, эффект ледового истирания;
- Укрытия: в ходе анализа EER следует рассмотреть стратегии, включающие применение укрытий на устойчивом ледяном покрове.
- Целостность плана: необходимо учитывать как состояние технических систем, так и человеческий фактор;
- Перемещение персонала: необходимо предусмотреть средства транспортировки на спасательную платформу для первичных и вторичных методов покидания, исключая попадание персонала в море;
- Связь: первичная и вторичная системы покидания должны обеспечивать связь со спасательной платформой во время процесса перемещения;
- Подъемные устройства для перемещения эвакуированных: условия и методы перемещения эвакуируемых с первичной и вторичной систем покидания и (или) из моря, со льда за счет использования подъемных устройств. Эти устройства

должны быть оценены в ходе анализа EER и применяться соответствующим образом;

– Взаимосвязь с третичной системой покидания: если необходимо по результатам анализа EER, третичные средства покидания должны предусматривать возможность подъема на спасательную платформу или это необходимо обеспечить средствами первичных или вторичных методов покидания;

– Требования к медицинской помощи: требуемый уровень медицинской помощи на спасательной платформе должен быть определен с учетом времени транспортировки в медицинское учреждение, возможности этого учреждения принять большое количество пострадавших и т.д.;

– Судовая спасательная платформа: мостик судна должен быть устроен таким образом, чтобы капитан судна (морьяк, уполномоченный соответствующими властями и ответственный за эксплуатацию судна) мог постоянно наблюдать за ходом спасательных операций;

– Материалы: необходимо оценить свойства материалов используемых при низких температурах и во льду;

– Двигатель: необходимо учитывать спасательную миссию и диапазон природных и возникших в результате аварии условий окружающей среды.