

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА С СООРУЖЕНИЕМ

В статье рассматривается вопрос определения ледовой нагрузки для расчета глубины ледовой абразии в опасной зоне истирания. Действующие в настоящее время нормы проектирования не позволяют определить глубину ледовой абразии основания гравитационного типа морских ледостойких платформ (МЛП). Поэтому принятие конструктивных решений по ледозащитным приспособлениям является сложной и актуальной задачей на современном этапе. Для определения максимально возможного ежегодного износа основания гравитационного типа МЛП при его взаимодействии со льдом в зоне переменного уровня в статье предлагается вероятностная имитационная модель формирования ледовых воздействий.

Ключевые слова: шельф, ледовая нагрузка, основание гравитационного типа, ледовая абразия.

Высокая динамичность ледяного покрова, большая продолжительность ледового периода, значительная сплоченность льдов характеризуют Охотское море как одно из самых суровых. В связи с обнаружением, развитием и началом эксплуатации месторождений углеводородов на северо-восточном шельфе о. Сахалин проблема расчета ледовых нагрузок и воздействий, действующих на морские ледостойкие платформы, стала особенно актуальной.

Анализ результатов исследований отечественных и зарубежных ученых показал, что формирование ледовой нагрузки является комплексной проблемой. Изменчивость ледовых нагрузок определяется ледовым режимом морских акваторий, т. е. высокой динамичностью ледяного покрова, многообразием его форм и изменчивостью свойств морского льда как материала. Основные факторы, влияющие на величину ледовой нагрузки, имеют случайную природу, а сами ледовые нагрузки имеют ярко выраженный случайный характер.

В настоящее время существуют множество строительных норм и правил (СНиП, ВСН, DNV, ISO, API), в которых определяется расчетное значение ледовой нагрузки с точки зрения внезапного отказа сооружения при взаимодействии с ледяным образованием. Практический опыт эксплуатации показывает, что есть вероятность потери несущей способности конструкции (элемента конструкции) от сравнительно умеренных воздействий большой повторяемости. В результате динамических воздействий бетонная поверхность, контактирующая со льдом, постоянно подвергается

воздействию ледовой абразии («сглаживается», «истирается»), что может привести к разрушению защитного слоя арматуры и, как следствие, разрушению сооружения в целом.

Величина ледовой абразии зависит от множества факторов, основными из которых являются контактное давление, длина пути истирания и сопротивление материала ледовой абразии.

В то время как экспериментальные исследования различных материалов на сопротивление ледовой абразии позволяют установить эмпирическую зависимость интенсивности ледовой абразии, для определения контактного давления и длины пути истирания необходимо иметь математический аппарат расчета ледовой нагрузки. Таким образом, расчет ледовой абразии должен учитывать и воздействие льда на сооружение, и сопротивление материала ледовой абразии. Совместное использование теоретической модели взаимодействия и эмпирической модели разрушения материала позволяет создать методику расчета глубины ледовой абразии.

Вероятностная имитационная модель взаимодействия ледяного покрова с сооружением основана на численном формировании функции распределения параметров ледового режима и имитации всех возможных ситуаций, характеризующихся случайным сочетанием значений входных параметров. Для каждой ситуации выполняется расчет ледовой нагрузки, для чего используются разработанные авторами модели процесса механического взаимодействия ледяных полей с МЛП. В результате численного моделирования и имитации

всех расчетных ситуаций за весь период эксплуатации сооружения определяются вероятностные характеристики ледовой нагрузки, контактного напряжения в ледяной плите, длины пути взаимодействия, длины пути истирания и глубины истирания материала корпуса конструкции.

При разработке модели были приняты следующие *допущения*, которые соответствуют современному уровню знаний о ледяном покрове и его воздействии на инженерные сооружения.

1. Ледяной покров представляет собой совокупность ледяных образований, равномерно распределенных по площади акватории, характеризующихся следующими параметрами: толщиной h , скоростью дрейфа по направлениям V , диаметром D , температурой t , сплоченностью N .

2. Параметры ледяного покрова являются независимыми случайными величинами и представлены в виде помесячных гистограмм распределения, построенных на основе многолетних рядов наблюдений в конкретном районе морских акваторий.

3. Время расчетной ситуации определяется по формуле:

4.

$$t_k = P(V_k)P(D_k)P(h_k)(T_k)P(N_k)P(Z_k)t_s \quad (1)$$

где $P(V_k)$, $P(D_k)$, $P(h_k)$, $P(T_k)$, $P(N_k)$, $P(Z_k)$ – вероятности появления исходных параметров скорости дрейфа льда, размеров льдин, толщины и температуры льда, сплоченности и колебания уровня соответственно; t_s – время расчетного месяца из ледового сезона.

Время расчетной ситуации уменьшается с учетом вероятности столкновения ледяных образований с основанием гравитационного типа МЛП в соответствии с формулой:

$$t_c = t_k \frac{N}{10 \cdot D_k^2} (D_k + D) \cdot (L_0 + D) , \quad (2)$$

где t_k – время действия расчетной ситуации; D – диаметр сооружения; D_k – диаметр льдины; V – скорость льдины; n_0 – плотность ледяных образований на единицу площади, L_0 – начальное расстояние между ледяными образованиями.

5. Начальное расстояние между ледяными образованиями определяется в соответствии со схемой (рис. 1 и 2) следующим образом.

$$L_0 = \sqrt{\frac{D_k^2 \cdot 10}{N_k} - D_k} , \quad (3)$$

где D_k – диаметр ледяного образования, м; N_k – сплоченность ледяного покрова, балл.

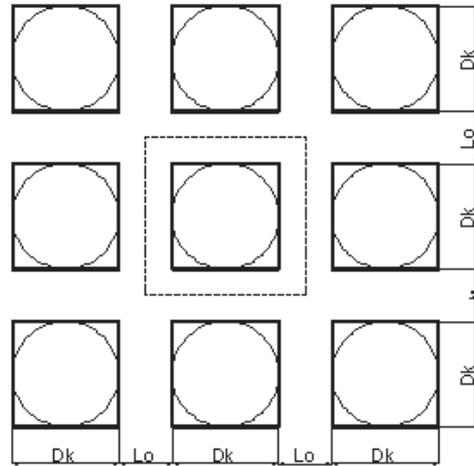


Рис. 1. Расположение льдин в плане.

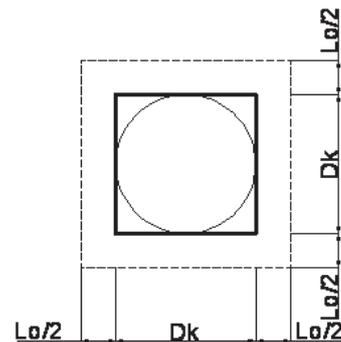


Рис. 2. Элементарный участок.

6. Разрушение ледяного поля толщиной h на контакте с ОГТ происходит путем двустороннего скола (сдвига) ледяных треугольных призм. Угол скола β определяется из теории предельного равновесия Кулона. Второй и последующие сколы происходят при достижении вертикального размера контактной площади, равного

$$h_1 = h / (a \cdot \sqrt[3]{\epsilon'}) , \quad (4)$$

где h – толщина ледяного поля, м; a – эмпирический коэффициент, $a=(7 \div 10)c^{-1}$; ϵ' – эффективная скорость деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой, c^{-1} , определяемая по формуле: $\epsilon' = V_i / 4d$, где V_i – скорость взаимодействия ледяного образования с сооружением, d – диаметр опоры.

7. На процесс истирания материала корпуса конструкции ледяным покровом оказывают влияние следующие формы ледяных образований в соответствии с международной клас-

сификацией [1]: мелкобитый лед < 2 м, крупнобитый лед 20-100 м, обломки ледяных полей 100-500 м, большие ледяные поля 200-2000 м, обширные ледяные поля 2-10 км.

На основании предложенной классификации выделяются три основные группы возможных воздействий от движущихся ледяных формирований на отдельно стоящие опоры в зависимости от их размеров (рис. 3):

- нагрузка от битого льда с размером ледяных образований ($D_k \leq 4d$, где D_k – диаметр ледяного образования, d – диаметр опоры сооружения);

- нагрузка от обломков ледяных полей с размерами ледяных образований ($4d < D_k \leq 500$ м);

- нагрузка от ледяных полей ($D_k > 500$ м).

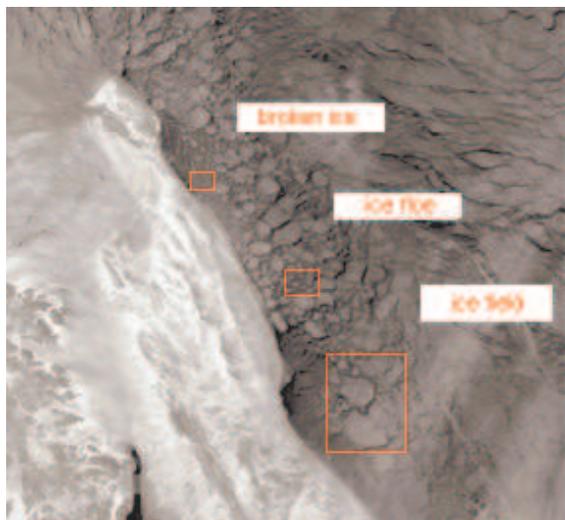


Рис. 3. Схема форм ледяных образований.

Для реализации задачи расчета глубины ледовой абразии были разработаны следующие модели:

- математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки от ледяных полей;

- математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки от обломков ледяных полей;

- математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки от битого льда;

- математическая модель определения глубины ледовой абразии.

Блок-схема расчета приведена на рис. 4.

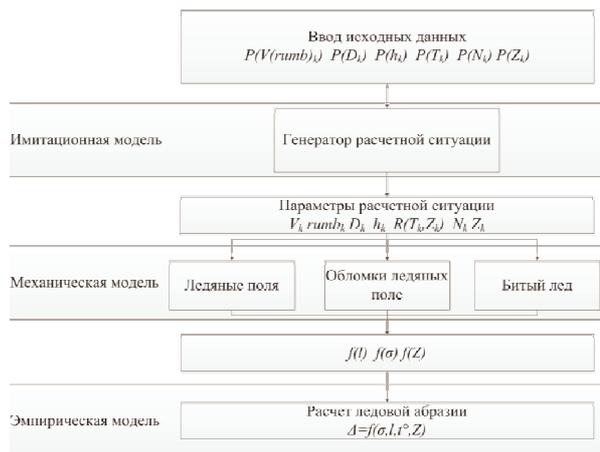


Рис. 4. Принципиальная схема расчета.

Математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки от ледяных полей. Для математического описания механического взаимодействия дрейфующих ледяных полей с сооружениями приняты следующие допущения.

1. Значение ледовой нагрузки при внедрении ледяных полей определяется по формуле [2]:

$$F_{bp} = m k_b k_v d R_k h_1, \quad (5)$$

где m – коэффициент формы опоры; k_b – коэффициент, зависящий от d/h_1 и учитывающий пространственно-напряженное состояние ледяного поля; d – диаметр опоры сооружения, м; h_1 – толщина ледяного поля, м, определенная в соответствии с формулой (4); R_k – прочность льда на одноосное сжатие, МПа; k_v – коэффициент, определяемый в зависимости от ε' эффективной скорости деформации льда в зоне его взаимодействия с опорой, c^{-1} .

2. Значение ледовой нагрузки при остановке ледяных полей определяется по формуле [2]:

$$F_{cp} = 0,04 V_i h_1 \sqrt{m A k_b k_v R_k \tan \gamma}, \quad (6)$$

где V_i – скорость движения ледяного поля, м/с, A – максимальная площадь ледяного поля (или суммарная площадь нескольких ледяных полей, оказывающих давление друг на друга), m^2 ; γ – половина угла заострения передней грани опоры в плане на уровне действия льда, град. (для опоры с передней гранью в виде многогранника или полуциркульного очертания необходимо принимать $\gamma=70^\circ$).

3. Сила от воздействия движущегося ледяного поля на сооружение, состоящее из системы вертикальных колонн, необходимо определять по формуле:

$$F_p = n_t k_1 k_2 F_{bp}, \quad (7)$$

где n_t – общее число колонн в сооружении; k_1 – коэффициент, определяемый по формуле:

$$k_1 = 0,83 + 0,17 n_t^2, \quad (8)$$

где k_2 – коэффициент, принимается по [2], в зависимости от d/a , где a – шаг колонн, м; k_n и k – коэффициенты, принимаются по [2], в зависимости от $n_f d/h_k$, где n_f – число колонн в первом ряду по фронту сооружения и d/h_k соответственно:

$$k_n = 0,0007(n_f d / h_k)^2 + 0,9539 \quad (9)$$

$$k = 0,0007(d / h_k)^2 - 0,0395(d / h_k) + 0,9539 \quad (10)$$

при $d/a < 0,1$ – $k_2 = 1,0$; при $d/a = 0,5$ – $k_2 = 0,55 + 0,45(k_n/k)$; при $d/a = 1,0$ – $k_2 = k_n/k$.

4. Значение ледовой нагрузки при потере устойчивости определяется в соответствии с [3] из соотношения:

$$\frac{F_{bu}}{d \rho_w l_{bu}^2} = C_{bu} + \frac{D_{bu}}{R_{bu} / l_{bu}}, \quad (11)$$

где ρ_w – удельный вес воды т/м³; C_{bu} , D_{bu} – коэффициенты, определяемые в зависимости от угла клина ледяного поля α и условия защемления опоры [3]; R_{bu} – усеченная ширина, измеренная от вершины, м; l_{bu} – характерная длина, определяемая по [3]:

$$l_{bu} = \sqrt[4]{\frac{E h_1}{12 \rho_w (1 - \nu^2)}}, \quad (12)$$

где E – модуль упругости ледяного покрова, МПа; ν – коэффициент Пуассона для льда, $\nu = 0,33$.

Учет температуры при расчете ледовой абразии описан в статье [4].

При взаимодействии сооружения с ледяной плитой могут наблюдаться следующие характерные случаи.

В. Внедрение опор сооружения в ледяное поле.

В.1 Внедрение блока льда и торможение его перед сооружением.

В.2 Внедрение блока льда и увеличение скорости за счет добавления импульса прибывшей льдины.

В.3 Внедрение блока льда и скол ледяной плиты, взаимодействующей с сооружением.

С. Остановка ледяного поля перед сооружением.

С.1 Остановка блока льда и сброс скорости.

С.2 Остановка блока льда и начало движения за счет добавления импульса прибывшей льдины.

Д. Потеря устойчивости блока льда.

Е. Наличие чистой воды перед сооружением.

Под *блоком льда* понимаются одна или несколько льдин, взаимодействующих с сооружением.

Для описания механизмов кинематического процесса механического взаимодействия между льдинами и процесса разрушения ледяных полей на контакте с сооружением использовался дискретный подход.

Основную трудность в расчете представляет определение времени и длины пути взаимодействия ледяной плиты с основанием МЛП. Для реализации этой задачи используются закон сохранения импульса и теорема об изменении кинетической энергии ледяного поля. Методика расчета приведена в статье [5].

Ширина зоны контакта для ледяных полей принимается равной диаметру опоры $d_{rb} = d$, тогда длина зоны контакта для ледяных полей принимается равной длине дуги $d_k = \pi d / 2$, где d – диаметр опоры, м.

Математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки от обломков ледяных полей. Для условий северо-восточного шельфа о. Сахалин преобладающими являются мелкобитые льды, крупнобитые льды и обломки ледяных полей, воздействие от которых является наиболее вероятным при расчете ледовой нагрузки.

При взаимодействии обломков ледяных полей размером от $4d$ до 500 м с опорой сооружения с целью упрощения математической интерпретации принимаются следующие допущения.

1. Предполагается, что кинетической энергии ледяного образования достаточно для внедрения опоры в лед, тогда ледовая нагрузка определяется, как сила от воздействия движущегося ледяного поля на сооружение,

состоящее из системы вертикальных колонн, определяемая по формуле (7).

2. Ширина зоны контакта принимается равной $d_{rb}=d/4$ (как наиболее вероятная величина контактной зоны), тогда длина зоны контакта определится, как длина дуги в соответствии со схемой (рис. 5) по формуле:

$$d_k = d \cdot \arccos(1/2) \cdot (d/2), \quad (13)$$

где d – диаметр опоры сооружения, м.

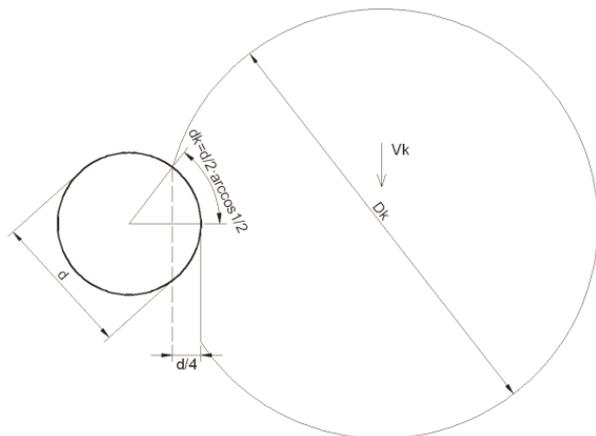


Рис. 5. Схема к определению длины зоны контакта.

С целью точного описания математической модели формирования ледовой нагрузки и расчета длины пути абразии от обломков ледяных полей предлагается разделить расчет на две составляющие:

- взаимодействие ледяных образований с опорой сооружения сплоченностью $N < 9$;
- взаимодействие ледяных образований с опорой сооружения при высокой сплоченности $N > 9$.

При взаимодействии обломков ледяных полей сплоченностью $N < 9$ предполагается, что все ледяные образования движутся с одинаковой скоростью V_k и равными расстояниями между ними L_0 , тогда, в соответствии с расчетной схемой (рис. 6), длина пути взаимодействия определится по формуле:

$$X = k_t V_k t_c, \quad (14)$$

где t_c – время действия расчетной ситуации с учетом вероятности столкновения, с; V_k – скорость дрейфа ледяного образования для k -ой расчетной ситуации, м/с; k_t – коэффициент, учитывающий уменьшение времени взаимо-

действия, определяемый в соответствии со схемой (рис. 6) по формуле:

$$k_t = \frac{d_{rb}}{D_k + L_0 - d_{rb}}. \quad (15)$$

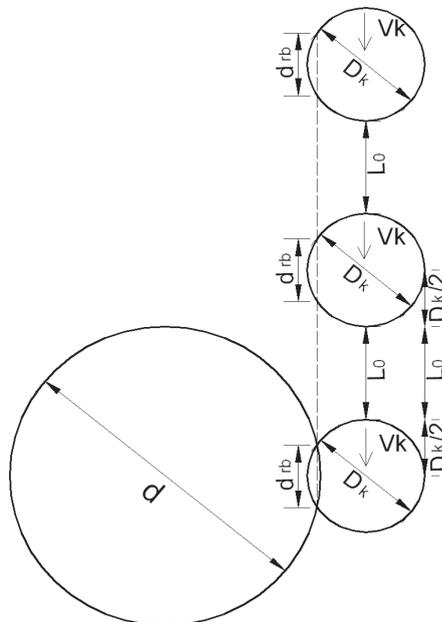


Рис. 6. Схема для расчета длины пути взаимодействия.

При высокой сплоченности ледяных образований $N > 9$ принимается, что все ледяные образования движутся с одинаковой скоростью V_k , тогда длина пути взаимодействия определяется по формуле:

$$X = V_k t_c, \quad (16)$$

где t_c – время действия расчетной ситуации с учетом вероятности столкновения, с, V_k – скорость дрейфа ледяного образования для k -ой расчетной ситуации.

Математическая имитационная модель формирования ледовой нагрузки от битого льда. В случае взаимодействия бетонного основания МЛП с битым льдом особого внимания заслуживает вопрос определения ширины контактной зоны для битого льда d_{rb} и длины пути взаимодействия.

По аналогии с имитационной моделью формирования ледовой нагрузки от обломков ледяных полей, рассматриваются два расчетных случая: взаимодействие воздействия битого льда с опорой сооружения сплоченностью $N < 9$ и взаимодействие со сплоченностью $N > 9$.

Для математического описания *механического взаимодействия битого льда* с сооружениями приняты следующие *допущения*. В случае многоопорного сооружения при определении величины ледовой нагрузки для расчета ледовой нагрузки от битого льда влияние многоопорности не учитывается, расчет выполняется для каждой опоры отдельно. При этом ледовая нагрузка определяется по формуле (5) при внедрении опоры сооружения в ледяное образование; при остановке ледяного образования – по формуле (6).

При сплоченности битого льда $N < 9$ (т. е., между ледяными образованиями имеется чистая вода) ширина зоны контакта d_{rb} определяется подбором, в зависимости от соотношения силы внедрения ледяного поля в опору МЛП F_{bp} , определенной по формуле (5), и силы остановки F_{cp} , определенной по формуле (6) для единичной зоны контакта.

Под *единичной зоной контакта* понимается зона взаимодействия *одного* ледяного образования с опорой сооружения.

При этом ледовая нагрузка от силы остановки не должна превышать нагрузку от внедрения опоры в ледяное поле на ширине единичной зоны контакта, т. е. $F_{cp} \leq F_{bp}$. Если условие выполняется (т. е., ледяное образование стоит перед опорой сооружения), ширина зоны контакта увеличивается на заданную величину Δd_{rb} , а расчет продолжается до тех пор, пока F_{cp} станет равным F_{bp} (т. е., ледяное образование внедряется в опору сооружения).

На следующем шаге расчета ширина зоны контакта увеличивается за добавления в систему новых ледяных образований и возникновения *силы обжатия* основания МЛП – это сила, возникающая за счет вытеснения ледяных образований опорой сооружения. При этом создается сжимающая боковая нагрузка на опору в зоне контакта ледяных образований с опорой, что увеличивает возможную зону контакта с опорой сооружения.

Для уточнения величины зоны контакта за счет добавления в систему новых ледяных образований принимается, что при взаимодействии сооружения с битым льдом свободное ледяное поле движется равноускоренно вдоль цилиндрической опоры сооружения по окружности радиусом R_ϕ (радиус поворота), в соответствии со схемой (рис. 7).

В этом случае угловая скорость ω при движении от $\phi=0$ до $\phi=\pi/2$ (рис. 8) изменяется в соответствии с законом:

– при $\phi=0 \omega_0=0$;

– при $\phi=\pi/2 \omega_{\pi/2}=V_k/R_\phi$.

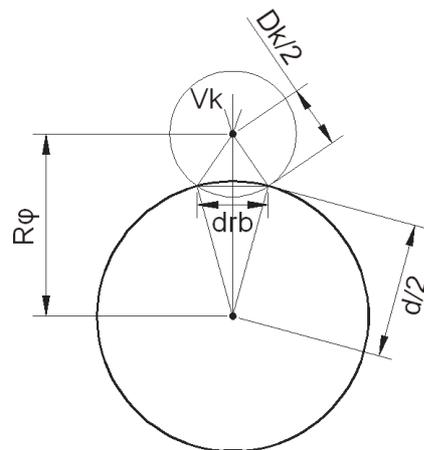


Рис. 7. Расчетная схема.

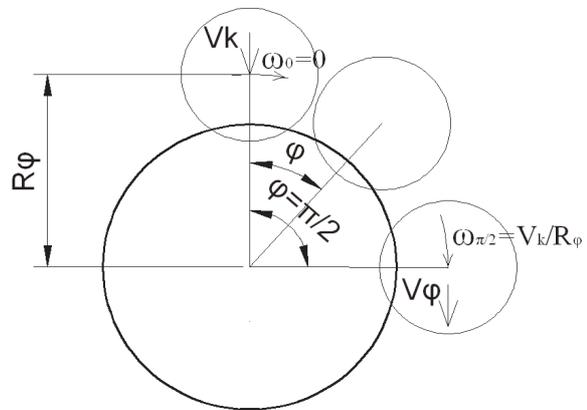


Рис. 8. Схема расчета движения битого льда.

Центростремительную силу движения ледяного образования определяют из уравнения:

$$F_\beta = \frac{M_0 V_k^2}{L_0} \cdot \frac{2\phi}{\pi} \cdot (1 - \cos(\phi)). \quad (17)$$

При взаимодействии ледяного поля с опорой сооружения ледовая нагрузка от силы обжатия (центростремительной силы движения ледяного образования) не должна превышать нагрузку от внедрения опоры в ледяное поле на ширине единичной зоны контакта, т. е. $F_\beta \leq F_{bp}$. Если условие выполняется, т. е. ледовой нагрузки недостаточно для внедрения опоры сооружения в ледяное образование, тогда необходимо увеличить ширину зоны контакта d_{rb} , и расчет продолжается до тех пор, пока F_β не станет равным F_{bp} ($F_\beta = F_{bp}$).

В противном случае (если условие $F_\beta \leq F_{bp}$ не выполняется) за расчетную нагрузку от битого льда принимается сила обжатия ледяного образования $F_i = F_\beta$.

Длина единичной зоны контакта определится, как длина дуги, при условии, что d_{rb} является ее хордой по формуле (рис. 9):

$$d_k = d \cdot \arctan(d_{rb} / d). \quad (18)$$

В случае взаимодействия сооружения с битым льдом предполагается, что все ледяные образования движутся с одинаковой скоростью V_k и равными расстояниями между ними L_0 , тогда длина пути взаимодействия определится по формуле (14).

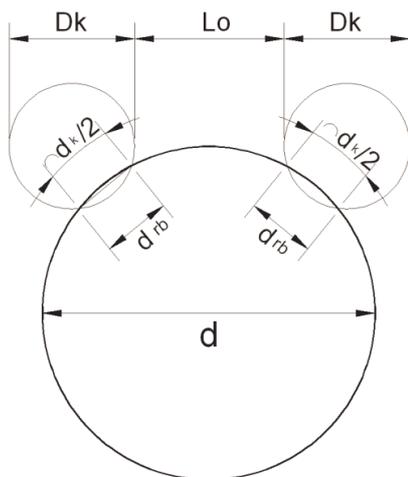


Рис. 9. Схема к расчету ширины зоны контакта.

Если сплоченность битого льда $N > 9$ (т. е. наблюдается практически сплошной ледяной покров), контактное напряжение в ледяной плите при взаимодействии с опорой сооружения определяется в соответствии с [3]:

$$\sigma_p = 2C \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (19)$$

где C – коэффициент сцепления, кПа; φ – угол внутреннего трения льда.

Таким образом, контактное напряжение принимается равным $\sigma_v = \sigma_p$.

Ширина зоны контакта d_{rb} определяется подбором вышеописанным методом. Длина пути взаимодействия определится по формуле (14).

Общий порядок расчета. Исходными данными для расчета являются параметры сооружения (диаметр сооружения d , форма опоры m) и параметры ледового режима акватории.

1. Осуществляется моделирование ледового режима перебором входных параметров h ,

D, N, T, V, Z таким образом, чтобы охватить все расчетные ситуации, т. е. все возможные сочетания параметров.

В результате k -ого сочетания параметров имитируется конкретная расчетная ситуация ледового режима со следующими параметрами: $h_k, D_k, N_k, T_k, V_k, Z_k$. Кроме того, определяются вероятности их появления $P(V_k), P(D_k), P(h_k), P(T_k), P(N_k), P(Z_k)$.

2. Определяется время существования k -ого сочетания параметров ледового режима t_k с учетом вероятностного сочетания параметров по формуле (2).

3. На каждом i -ом шаге имитационного расчета моделируется процесс механического взаимодействия ледяных полей с опорой морских инженерных сооружений с толщиной h_k , размерами ледяных полей D_k , сплоченностью N_k , температурой ледяного покрова T_k , прочностью R_k и скоростью V_k , а также учитывается процесс колебания уровня моря Z_k . Рассматриваемый процесс имеет продолжительность t_k .

В результате моделирования процесса взаимодействия можно получить значения ледовой нагрузки F_i и длину перемещения ледяного покрова при взаимодействии с сооружением X_i – длина пути взаимодействия, d_{ki} – ширина зоны контакта.

4. На основе полученных данных моделируется процесс истирания материала конструкции. В результате получают контактное напряжение в ледяной плите $\sigma_{v,i}$, длину пути истирания $l_{v,i}$ и глубину истирания материала конструкции Δ_i с учетом колебания уровня моря [6].

5. Процесс повторяется до полного перебора всех возможных сочетаний значений параметров ледового режима.

В результате определяются следующие характеристики процесса за весь ледовый период:

- гистограмма режима истирания, т. е. зависимость $\bar{\Delta} = f(\sum \sigma \cdot l)$;

- гистограмма интенсивности истирания $\Delta = f(\sum \sigma)$;

- общая глубина истирания по уровням $\bar{\Delta} = f(Z)$;

- вероятностные характеристики ледовой нагрузки $P=f(F)$, глубины истирания $P=f(\Delta)$ и других параметров.

На основе разработанного автором алгоритма расчета была написана программа «IceStrIn» (Ice Structure Interaction) (рис. 10).



Рис. 10. Интерфейс программы «IceStrIn».

Расчетный комплекс «IceStrIn» позволяет выполнять расчеты глубины ледовой абразии в плане и по высоте в зоне истирания в любых естественных условиях. При небольшой модернизации расчетный комплекс может использоваться для расчета различных типов конструкций (наклонные опоры, протяженные сооружения).

Литература

1. Хрусталеv Н.К. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеоиздат, 1984.
2. СНиП 2.04.06-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стройиздат, 1995. С. 40.
3. API RP 2N Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions [Отчет] - API

RP 2N // Dallas: Amer. Petroleum Inst. Bulletin, 1995.

4. Bekker A.T., Uvarova T.E., Pomnikov E.E. The Registration of Temperature during Calculation of the Ice Abrasion // Ninth Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium ISOPE (2010), Busan, Korea, November 14-17, 2010

5. Bekker A.T., Uvarova T.E., Kim S.D. Numerical Simulation of the Process of Interaction between Drifting Ice Fields and Structure Support // Proc. of The Sixth (2004) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Vladivostok, Russia, September 12-16, 2004. P. 123-128

6. Bekker AT, Uvarova TE, Slautenko MA. Evaluation of Area Extent of Structure Body of Marine Engineering Structures Suffering ice abrasion // Proc. Int. Symposium on the Okhotsk sea and sea ice. February 17-22, Mombetsu, Japan, 2008.

7. Hanada, M., Ujihira, M., Hara, F. and Sae-ki, H. Abrasion Rate of Various Materials Due to the Movement of Ice Sheets // Proc. of the 6th (1996) - International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, USA May 26-31, 1996

8. PSTS 5 Ice: Environmental Conditions and Loads Sakhalin II Phase II Project Facilities Design 3400-Z-90-01-P-0075, June, 2002

9. Ice Abrasion Test Sakhalin-1 Arkutun-Dagi GBS Project RUSD-HYY-J2-BR-37000.8888.01. Vladivostok, October, 2009

10. РД 31.31.27-81 (1982) Руководство по проектированию морских причальных сооружений:РД 31.31.27-81. Государственным проектно-изыскательским и научно-исследовательским институтом морского транспорта (Союзмор-НИИпроект). М., 1982.

11. Barker A., Timco G., Sayed M. and Wright B.D. Numerical Simulation of the "Kulluk" In Pack Ice Conditions // Proc. 15th International IAHR Symposium on Ice. Poland. Gdansk, 2000. Vol. 1. P. 165-171.