

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЛЕДОВОЙ АБРАЗИИ

В статье описан концептуальный подход к расчету глубины ледовой абразии, рассматриваются основные положения методики расчета ледовой абразии, описывается математическая модель плано-высотной изменчивости действия ледовой нагрузки.

Ключевые слова: ледовая абразия, основание гравитационного типа, математическая модель.

В суровых климатических условиях Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока, Аляски и северных районов Канады гидротехнические и транспортные сооружения в течение длительного времени, а иногда и круглогодично, противостоят различным ледовым воздействиям (рис. 1).

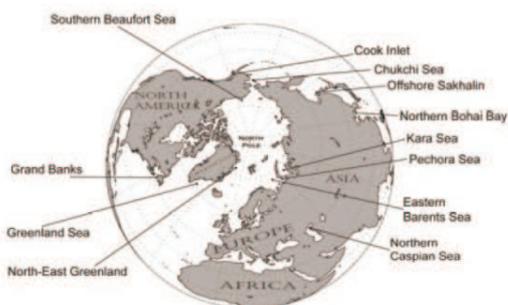


Рис. 1. Места строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в суровых ледовых условиях.

Основным фактором, влияющим на условия эксплуатации и надежности гидротехнических сооружений, расположенных в районах с суровыми ледовыми условиями, является ледовый режим морской акватории в районе строительства и, как следствие, ледовые нагрузки и воздействия на сооружение. Особое внимание в последние годы уделяется истирающему воздействию льда.

Величина ледовой абразии зависит от множества факторов, основными из которых являются контактное давление, длина пути истирания и сопротивление материала ледовой абразии [1, 2, 3].

Результаты долгосрочных исследований ледяного покрова и его воздействия позволяют сделать вывод, о том, что проблема абразии оснований гравитационного типа может быть разделена на две части [4]:

- - проблема ледовых воздействий, вызывающих абразию;
- - проблема сопротивления материала истирающему воздействию.

Практически, с одной стороны, глубина абразии определяется интенсивностью и продолжительностью ледового воздействия, а с другой стороны, она обусловлена способностью материала конструкции сопротивляться истирающим воздействиям (рис. 2).

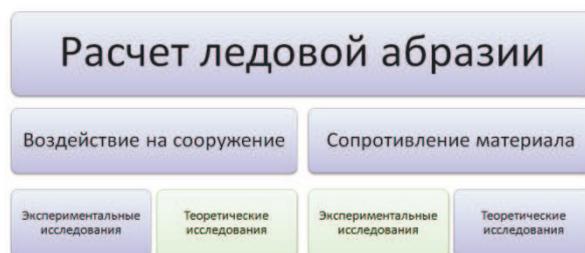


Рис. 2. Концептуальная модель.

Для определения контактного давления и длины пути истирания необходимо иметь математический аппарат расчета ледовой нагрузки, величина которой зависит не только от свойств льда, но и от модели разрушения льда на контакте «лед – сооружение», а длина пути истирания определяется процессами дрейфа ледяных образований и их взаимодействием с опорой сооружения [5, 6]. Экспериментальные исследования сопротивления материала ледовой абразии позволяют получить эмпирическую модель интенсивности ледовой абразии [7]. Таким образом, расчет ледовой абразии должен учитывать и воздействие льда на сооружение, и сопротивление ледовой абразии. Общая схема расчета ледовой абразии представлена на рис. 3.

Математическая модель определения глубины истирания. Допущение: распреде-

ление контактного давления по длине зоны контакта d_k принимается равномерным [8].



Рис. 3. Схема расчета.

Длина пути взаимодействия X , определенная на основании вероятностной имитационной модели взаимодействия ледяного покрова с сооружением, позволяет определить интересное нас значение пути скольжения ледяного поля относительно опоры сооружения l_k , (длина пути истирания), которое распределено по синусу (рис. 4):

$$l_k(\varphi) = X \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – это угол между румбом и точкой на опоре, для которой рассчитывается глубина истирания (рис. 4); X – длина пути взаимодействия.

Таким образом, длина пути истирания определяется на каждом шаге расчета, как $dl_i(\varphi) = dx \cdot \sin \varphi$, тогда относительная скорость истирания (взаимодействия) пересчитывается по формуле

$$dV_\varphi = dl_i(\varphi) / dt, \quad (2)$$

где $dl_i(\varphi)$ – длина пути истирания на каждом шаге расчета, φ – угловая координата расчетной точки; dt – шаг расчета по времени.

Относительная скорость истирания (взаимодействия) dV_φ уточняется при помощи поправочного скоростного коэффициента абразии $k_a = f(V_\varphi)$, определяемого в соответствии с рис. 5 [9].

Распределение давления на контакте опоры с ледяными образованиями формируется за счет ледовой нагрузки в зоне разрушения ледяного поля, которое образует контактную зону. Контактное напряжение, при его равномерном распределении, определяется по формуле:

$$\sigma_v = \frac{F}{h d_k}, \quad (4)$$

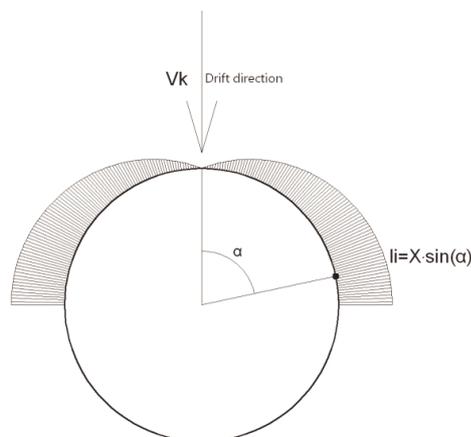


Рис. 4. Схема к расчету длины пути истирания.

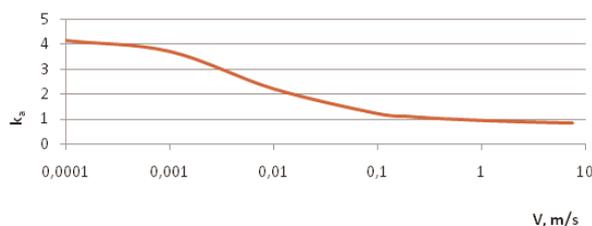


Рис. 5. Поправочный скоростной коэффициент абразии (k_a).

где F – сила взаимодействия ледяного образования с сооружением, определяемая согласно предложенному выше алгоритму; h – толщина ледяного покрова.

Учитывая принятое распределение давления на контакте и общепринятое разделение результатов наблюдений за скоростью дрейфа льда по восьми румбам, для определения максимальной глубины абразии в точке в расчет принимаются пять направлений дрейфа, в соответствии с рис. 6, для учета всех неблагоприятных направлений воздействия льда для рассматриваемой точки, что важно при проектировании ледозащитного пояса.

Математическая модель учета планово-высотной изменчивости ледовых воздействий. Назначение зоны истирания. При назначении зоны сооружения, подверженной истирающему воздействию ледяных образований в конкретной акватории, необходимо учитывать следующие наиболее важные факторы:

- колебания уровня моря;

- направление дрейфа льда;
- изменчивость толщины дрейфующих ледяных образований;
- изменчивость температуры воздуха и прочности ледяного покрова;
- механизм разрушения ледяного образования на контакте с сооружением;
- эффект затенения от действия ледовой нагрузки;
- ориентацию сооружения по отношению к сторонам света на месте установки.

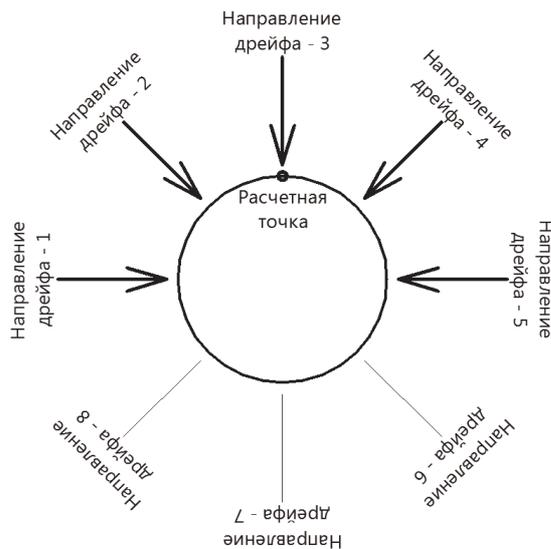


Рис. 6. Схема к определению общего истирания в расчетной точке.

Ориентация сооружения в районе установки имеет большое значение для расчета глубины ледовой абразии, т. к. напрямую влияет на определение размеров и положения опасной зоны истирания поверхности опоры сооружения (рис. 7).

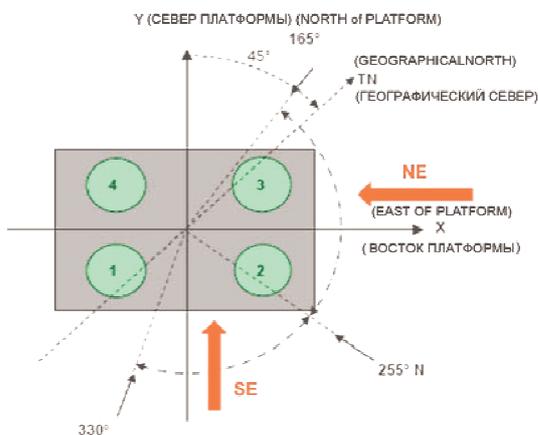


Рис. 7. Плановая схема ориентации сооружения по отношению к сторонам света.

Определение зоны истирания опор морских инженерных сооружений, подверженных воздействию льда, рассчитывается согласно [10]. За минимальный уровень колебания моря принимается отсчетный уровень (ОУ, для приливных морей уровень – 98 %) обеспеченности, за максимальный уровень колебания моря – расчетный уровень (РУ, 1 % обеспеченности).

Определение величины зоны абразии опор сооружения проводится согласно схемам рис. 8 на основе гистограмм колебания уровня моря.

Под общей зоной истирания конструкции понимается зона истирания корпуса конструкции от уровня $Z_{a,max}$ (при максимальном уровне моря) до уровня $Z_{a,min}$ (при минимальном уровне моря).

При изменении уровня моря и толщины льда не все зоны (по высоте) подвержены истиранию (рис. 8). Для накопления и расчета глубины ледовой абразии в зоне взаимодействия необходимо зону истирания по высоте разбить на равные участки ΔZ , в которых накапливаются результаты расчета глубины ледовой абразии за расчетный период времени.

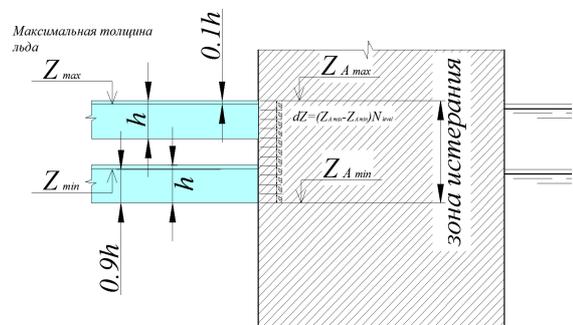


Рис. 8. Схема к расчету зоны абразии.

Истирающее воздействие ледяного покрова является сложным процессом, параметры которого трудно поддаются количественной оценке, что является следствием изменчивости взаимодействия ледяного образования с сооружением.

На плано-высотную изменчивость ледовых воздействий оказывают влияние следующие параметры:

по высоте – колебание уровня (Z) и толщина ледяного образования (h) (модель разрушения льда h_1);

в плане – направление дрейфа льда (румб, определяемый по розе скоростей дрейфа

(gumb) и соответствующая ему скорость дрейфа льда (V); эффект затенения от действия ледовой нагрузки; распределение контактного давления в плане $\sigma=f(\alpha)$;

неоднородность свойств льда – распределение температуры льда по толщине $T=f(h)$, которое влияет на прочность льда R и, как следствие, на ледовую нагрузку F ;

расчетные параметры – длина пути взаимодействия (X) и длина зоны контакта (d_k) (размеры ледяных образований (D)).

Глубина истирания материала сооружения является функцией времени. Поэтому расчетные параметры истирающего воздействия ледяного покрова необходимо накапливать за каждый шаг расчета, что является, с математической точки зрения, матрицей огромного числа данных.

С целью усовершенствования алгоритма вывода расчетных параметров и для учета плано-высотной изменчивости действия ледовой нагрузки все сооружение предварительно разбивается на ячейки (рис. 9), в которых накапливаются расчетные параметры ледовой нагрузки и ледовой абразии.

При этом все сооружение помещается в систему отсчета (рис. 10), где любой расчетный параметр в любой точке контактной зоны является функцией двух переменных. Например, для глубины ледовой абразии можно записать:

$$\Delta = f(\varphi_h, h_z), \quad (5)$$

где φ_h – угол привязки расчетной точки к системе отсчета; h_z – привязка расчетной точки по высоте к системе отсчета.

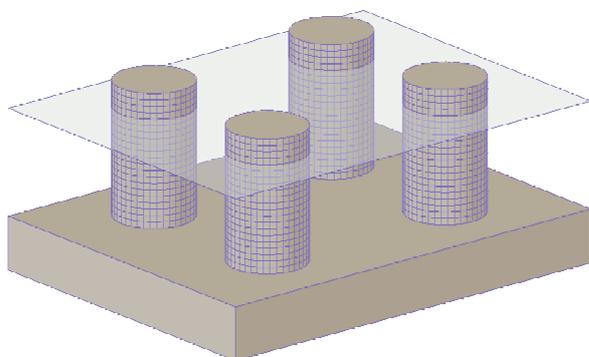


Рис. 9. Расчетная схема сооружения.

Границы зоны контакта определяются в зависимости от следующих факторов, влияющих на величину ледовой абразии:

– направления скорости дрейфа льда (gumb) и эффекта затенения от действия ледовой нагрузки [11] (рис. 11);

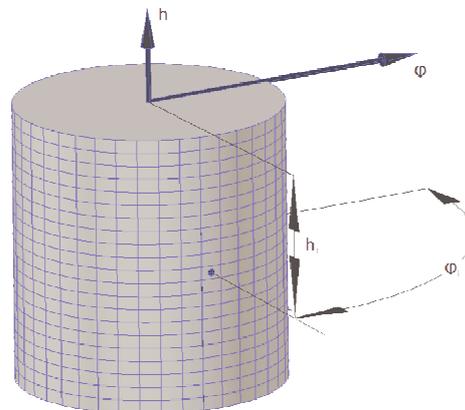


Рис. 10. Система отсчета.

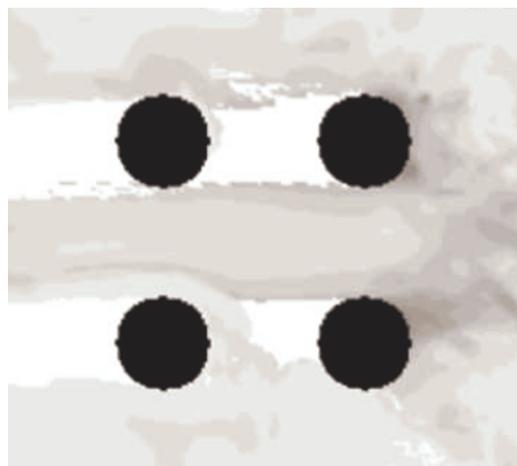


Рис. 11. Эффект затенения [11].

– расчетного положения уровня моря Z и толщины ледяного образования h (рис. 12);
– модели разрушения ледяной плиты перед сооружением (h_1) (рис. 12);

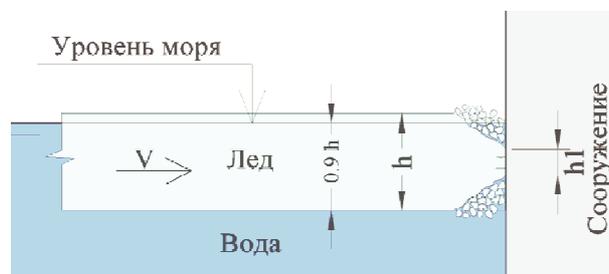


Рис. 12. Границы зоны контакта по высоте.

– длины зоны контакта d_k , являющейся расчетной величиной, которая зависит от раз-

меров ледяных образований D и, как следствие, типа математической модели формирования ледовой нагрузки (рис. 13).

Границы зоны контакта определяются на каждом шаге расчета и накладываются на сетку ячеек (кластеров) сооружения (рис. 14), которые обеспечивают хранение и накопление расчетных данных.

Предложенная модель учета планово-высотной неоднородности ледовых воздействий является структурной оболочкой программы расчета. Модель позволяет определить все расчетные параметры ледовой абразии в любой точке зоны истирания сооружения.

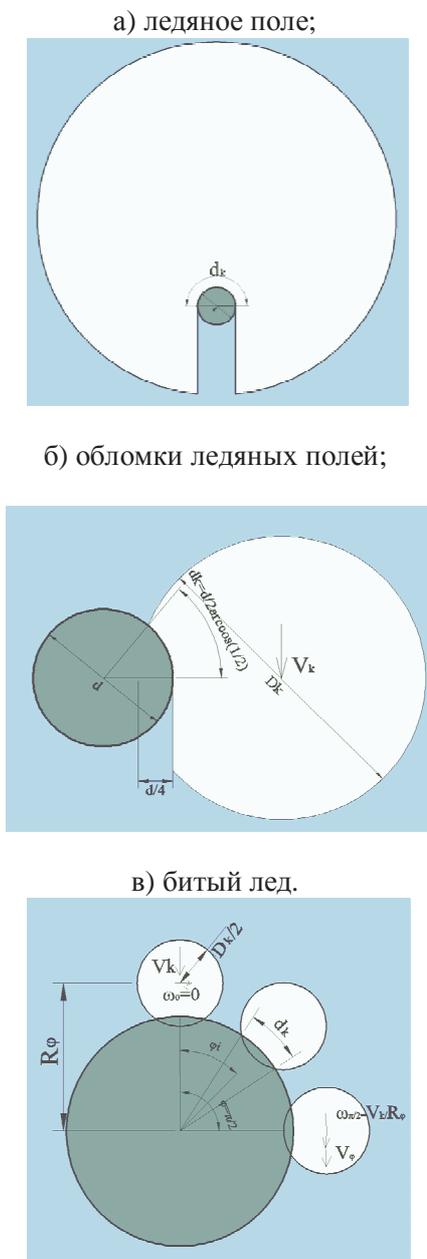


Рис. 13. Длина зоны контакта для различных типов ледяных образований.

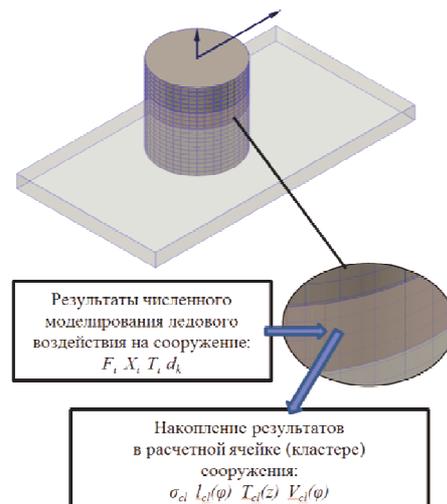


Рис. 14. Накопление и хранение данных в кластере сооружения.

Таким образом, пошаговый метод расчета, используемый в математических моделях формирования ледовых нагрузок, интегрирует ледовые воздействия, а математическая модель расчета глубины ледовой абразии и модель учета планово-высотной неоднородности ледовых воздействий позволяет сформировать «поверхность» глубины ледовой абразии (рис. 15).

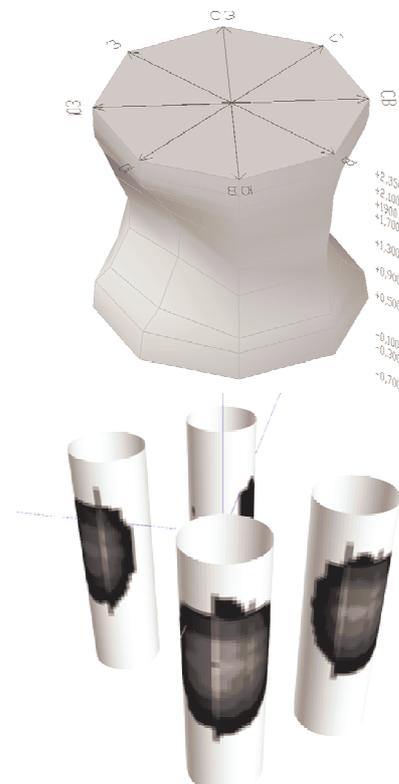


Рис. 15. Результаты расчета ледовой абразии.

На основе предложенной модели предлагается следующий метод накопления результатов расчета.

1. Предварительно все сооружение разбивается на кластеры и формируется система отсчета.

2. Осуществляется привязка системы отсчета к плановой ориентации сооружения по отношению к сторонам света и выбирается расчетное направление скорости дрейфа льда. При этом в расчете не рассматривается зона затенения.

3. Рассчитываются параметры ледовой нагрузки, которые являются исходными данными для расчета глубины ледовой абразии.

4. Определяются границы зоны контакта, которые накладываются на сетку кластеров сооружения.

5. Рассчитываются параметры ледовой абразии для всех кластеров зоны контакта и сохраняются в расчетных кластерах.

6. Результаты расчета на каждом шаге накапливаются в кластерах сооружения.

7. Результатом расчета является суммарная глубина ледовой абразии каждого кластера сооружения.

Разработанная автором оригинальная методика расчета, хранения и накопления данных позволяет оценить глубину ледовой абразии в любой точке зоны истирания сооружения дрейфующим ледяным покровом с учетом планово-высотной неоднородности ледовых воздействий и построить 3D-поверхность распределения глубины ледовой абразии по всей зоне истирания сооружения.

Последовательность расчета. В соответствии с предложенной концепцией расчета глубины ледовой абразии, совместное использование эмпирической модели абразии, полученной на основе лабораторных испытаний, и теоретической модели ледовых воздействий позволяет создать методику расчета глубины ледовой абразии.

Последовательность расчета глубины ледовой абразии состоит из следующих основных этапов.

I этап. Экспериментальные исследования. В результате лабораторных исследований получают эмпирическую модель интенсивности ледовой абразии строительного материала или материала защитного покрытия, для чего может использоваться лабораторное оборудование ледовой лаборатории «Гидротекс» (установка для исследования ледовой абразии, сис-

тема для приготовления образцов льда и временный измерительный комплекс).

II этап. Численное моделирование. На основе разработанной автором вероятностной имитационной модели формирования ледовых воздействий и модели расчета глубины ледовой абразии получают расчетные параметры ледовой нагрузки, длину пути истирания, скорость взаимодействия, интенсивность давления на контакте «лед – сооружение» и глубину ледовой абразии.

Исходными данными для расчета являются:

- эмпирическая модель ледовой абразии;
- параметры сооружения (диаметр сооружения d , форма опоры m и ориентация сооружения на местности);
- параметры ледяного покрова (толщина льда h , диаметр ледяных образований D , сплоченность льда N , температура льда T , скорость дрейфа льда V , колебание уровня Z).

Порядок расчета следующий.

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_c с учетом вероятностного сочетания параметров.

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 получают значения ледовой нагрузки F_i , длину перемещения ледяного покрова при взаимодействии с сооружением X_i – длина пути взаимодействия.

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 S_i с учетом колебания уровня моря.

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

III этап. Анализ результатов расчета. На выходе из программы определяются следующие характеристики процесса за весь ледовый период:

– гистограмма интенсивности истирания $S = f(\sum \sigma)$;

– общая глубина истирания по уровням $\Delta = f(Z)$;

– вероятностные характеристики ледовой нагрузки $P=f(F)$, глубины истирания $P=f(S)$ и других параметров.

Определяется предполагаемая глубина ледовой абразии за год или за весь срок эксплуатации сооружения.

IV этап. Рекомендации по использованию тестируемых материалов и конструкции ледозащиты.

На основе разработанного автором алгоритма расчета была написана программа «ICESTRIN» (ICE STRucture INteraction).

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).

Выводы.

Некорректность определения ледовых воздействий на сооружения может привести к негативным последствиям. Завышение расчетной ледовой нагрузки приводит к неэффективному использованию финансовых средств, затрачиваемых на возведение капитальных сооружений, а занижение может

явиться причиной нарушения работоспособности конструкции и возникновения экономического ущерба. Методика позволяет определить истирающее воздействие ледяного покрова на сооружение с учетом его дрейфа со всех сторон, что дает возможность получить общую картину глубины абразии по всей поверхности в плане и по высоте в контактной зоне.

Литература

1. Abrasion Test for Concrete Due to Sea Ice, Proc. of Port and Ocean Eng / H. Saeki, T. Takeuchi, A. Yoshida, Y. Asai, EL Suenaga // Arctic Conditions (POAC) Conference. Alaska, 1987.
2. Estimation Method for Abrasion of Concrete Structures Due to Sea Ice Movement / Y. Itoh, Y. Tanaka, H. Saeki // 4th Int. Offshore and Polar Eng. Conference. Japan: Osaka, 1994. P. 545-552
3. Abrasion Mode of a Circular Cylindrical Concrete Structure Due to sea Ice Movement / Y. Itoh, Y. Tanaka, A. Delgado, H. Saeki // 5th Int. Offshore and Polar Eng. Conference. Netherlands: Hague, June 11-16, 1995. P. 381-388
4. Bekker A.T. Problems of the Ice Cover Abrading Action on Legs of Concrete Offshore Structures // Workshop on Ice abrasion concrete structures. Helsingfors, 2007. October, 26-25.
5. Bekker A.T. Uvarova T.E., Kim S.D. Numerical Simulation of the Process of Interaction between Drifting Ice Fields and Structure Support // the 6th (2004) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Russia. Vladivostok, September 12-16, 2004. P. 123-128.
6. Bekker A.T., Uvarova T.E., Kim S.D. Model of mechanical ice-structure interaction for Sakhalin offshore conditions // 14th (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference. France. Volume I - Toulon, May 23-28, 2004.