ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА СООРУЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА ДЛЯ АНАЛИЗА ИХ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ

А.С. Большев, К.Н. Шхинек, С.А. Фролов, Е.В. Уварова

Санкт-Петербургский государственный технический университет, Россия

АННОТАЦИЯ

При создании платформ для освоения крупнейших российских месторождений в арктических районах ледовые нагрузки часто оказываются определяющими, и необходима достоверная оценка их значений, возможных в течение всего периода эксплуатации платформ. В настоящее время наиболее подробно изучены экстремальные нагрузки, которые могут возникнуть при взаимодействии сооружения с ледовыми образованиями. Именно на их определение ориентированы российские и зарубежные нормы. Однако сооружение может быть повреждено и при многократном воздействии относительно небольших ледовых нагрузок в результате возникновения усталостных эффектов. Для изучения циклических нагрузок на сооружение, анализа его надежности и долговечности, в настоящей работе предлагается использовать методы вероятностного моделирования характеристик льдов в сочетании с детерминированными методами расчета ледовых нагрузок.

ABSTRACT

Ice loads are the most significant environmental forces on arctic offshore structures. Reliable estimation of ice loads what can realise during the whole period of life of structures designed for mastering of arctic hydrocarbon fields appears to be urgent. Extreme loads on the structures are the most widely investigated and different Codes (as Russian as well Western) deal with these loads. But structure also can be damaged as a result of repeated action of relatively small ice loads, e.g. as a result of fatigue effects. To define cyclic loads on the structure and to analyze its safety and durability it is suggested in the paper to use methods of probabilistic modeling of ice characteristics in the combination with the deterministic of ice loads calculation.

1. Введение

Ледовые нагрузки на сооружения арктического континентального шельфа являются одним из самых опасных типов внешних нагрузок на данный класс сооружений.

Обычно методология определения этих нагрузок базируется на положениях СНиП 2.06.04-82*[1]. Однако, ввиду изменчивости параметров льда (прочности, толщины, площади льдин и скорости их движения) за время эксплуатации сооружения невозможно определить значение ледовой нагрузки заданной обеспеченности без использования вероятностных подходов. В указанных СНиП, с учетом распределения вероятностей варьируемых величин, параметры льда принимаются с заданной обеспеченностью. В результате рассчитывается некоторая экстремальная нагрузка с неизвестной, строго говоря, обеспеченностью. Кроме того, сами распределения существенно различны в различные месяцы года. Поэтому трудно сказать, как часто подобная ледовая нагрузка будет иметь место в течение срока эксплуатации сооружения.

СНиП, как и ряд иных зарубежных норм [2], ориентирован на определение экстремальных нагрузок. При проектировании сооружения принимается обычно экстремальная нагрузка, однократное воздействие которой сооружение должно выдержать. Однако при выполнении этого условия сооружение, на наш взгляд, все же может быть повреждено в результате многократного воздействия относительно небольших ледовых нагрузок в результате возникновения усталостных эффектов. Опасность усталостного разрушения подчеркивается Норвежскими нормами [3], в которых этот вид разрушения рассматривается как один из видов предельного состояния.

Для получения наиболее обоснованных значений экстремальных нагрузок можно использовать методологию вероятностного моделирования параметров льда, в сочетании с методами расчета ледовых нагрузок, которые используются в соответствующих нормативных документах различных стран.

Для того чтобы изучить ситуации, связанные с возникновением усталостных эффектов в конструкции, необходимо описать все циклы нагружения в течение всего периода ее эксплуатации. Учитывая высокую пространственную, временную и параметрическую изменчивость ледовых образований, подобная задача представляется значительно более сложной, чем анализ экстремальных воздействий. Кроме того, следует подчеркнуть, что в существующей литературе мало проработаны вопросы описания циклов прорезания сооружением льдин (амплитуд усилий, временных или пространственных периодов и.т.п.) при различных их параметрах и скоростях подвижки.

Для изучения циклических нагрузок на сооружение в данной работе также предлагается использовать методы вероятностного моделирования характеристик льдов в сочетании с детерминированными методами расчета ледовых нагрузок. При этом методика анализа усталостных эффектов может быть подразделена на несколько составных частей:

- вероятностное моделирование ледовой обстановки и параметров льдин;
- построение сценария взаимодействия сооружения с каждым из типом ледовых образований;
- расчет нагрузок на сооружение при взаимодействии его с ледовым образованием;
- построение вероятностных оценок ледовых нагрузок и оценка усталостных эффектов в конструкции сооружения.

2. Вероятностное моделирование ледовой обстановки и параметров льдин

Вероятностное моделирование ледовой обстановки осуществляется за период времени, многократно превышающий срок эксплуатации сооружения, для получения достаточно достоверных оценок, действующих на него нагрузок. На основании данных натурных наблюдений и полученных ранее распределений вероятности параметров льдов в заданной акватории моделируются характеристики ледовой обстановки и параметры льдов, с которыми сооружение взаимодействует в течение срока его эксплуатации: наличие каких-либо льдин в данный момент времени в районе постановки сооружения, торосистость льдин, сплоченность льдов, геометрические характеристики ровных или торосистых льдин, скорости движения льдин, температура воздуха и.т.п.

Законы распределения вероятностей различных параметров льдов принимаются постоянными в течение каждого месяца года, но сами параметры, моделируемые по методу Монте-Карло, изменяются с разной интенсивностью. Например, коэффициент сплоченности льдов, показатель торосистости льдин, температура воздуха моделируются один раз в сутки и считаются постоянными в течение этого промежутка времени. Для каждых суток моделируется число льдин, с которыми предположительно может взаимодействовать сооружение, их линейные размеры и толщина. Если льды в данный момент времени оказываются торосистыми - в структуру каждой льдины включаются гряды торосов, суммарная площадь которых обуславливается показателем торосистости, а толщина консолидированной части, глубина и ширина киля моделируются в силу известных законов распределения при заданной толщине ровной части льдины.

Наиболее интенсивным изменениям подвергается скорость движения льдов $\mathbf{V_i}$, определяемая в силу следующего выражения:

$$V_i = |\vec{V}_c + \vec{V}_t + k\vec{W}|, \qquad (1)$$

где k - коэффициент, V_c - постоянная скорость течения , V_t - скорость приливного течения, изменяемая два раза в сутки, W - скорость ветра, моделируемая заново каждые 6 часов.

Поскольку законы распределения вероятностей всех генерируемых параметров изменяются в зависимости от месяца года - в неявном виде учитывается корреляция между данными случайными величинами.

Таким образом, на основании законов распределения вероятностей характеристик льдов (изменяемых месяц от месяца) моделируются параметры, необходимые для описания взаимодействия сооружения с каждой из льдин в течение заданного временного интервала.

3.Сценарии взаимодействия сооружения с льдинами

В настоящей работе рассматривается взаимодействие вертикальных сооружений цилиндрической формы с ровными однолетними или торосистыми льдами.

В результате подхода льдины к сооружению она может либо остановиться, полностью потеряв кинетическую энергию, либо быть прорезанной ледостойкой частью этого сооружения, если ее кинетической энергии для этого достаточно. В российских нормативных документах анализируются оба этих типа взаимодействия, но для одной абстрактной льдины имеющей известную толщину, площадь, прочность и скорость подвижки.

Однако на практике наблюдается прорезание отдельных льдин, движущихся с очень маленькой скоростью и обладающих недостаточной для этого кинетической энергией.

Подобный эффект наблюдается из-за высокой сплоченности льдов вследствие объединения энергии множества льдин. Поэтому в настоящей работе разделяются случаи взаимодействия сооружения со льдами относительно высокой сплоченности (коэффициент сплоченности более k_c>0.5) и льдов малой сплоченности ($k_c \le 0.5$).

При высокой сплоченности предполагается, что сооружение взаимодействует с полем, состоящим из отдельных льдин и обладающим неограниченным запасом кинетической энергии. Поэтому рассматривается исключительно прорезание каждой льдины.

При малой сплоченности считается, что льдины движутся независимо друг от друга и, в соответствии со СНиП [1], для каждой льдины анализируется возможность остановки или прорезания в зависимости от ее параметров и размеров сооружения. Однако ввиду необходимости определения всех циклов нагружения в процессе взаимодействия с льдиной, при анализе каждого цикла нагружения учитываются происходящие при этом потери кинетической энергии льдины. При этом возникают следующие сценарии взаимодействия: льдина останавливается при первом же контакте с сооружением; льдина полностью прорезается; после некоторого числа прорезаний льдина, потеряв всю кинетическую энергию, останавливается.

4. Расчет ледовых нагрузок на сооружение

Расчет ледовых нагрузок обеспечивает описание всех циклов нагружения сооружения при взаимодействии с самыми разнообразными ледовыми образованиями в течение интервала времени, многократно превышающего срок эксплуатации сооружения

Характер циклического нагружения существенным образом зависит от свойств льда и скорости внедрения в него сооружения.

Для расчета первой амплитуды нагружения при внедрении опоры в ледовое поле можно использовать методы, изложенные в российских [1] или зарубежных [2] нормативных документах. Временные характеристики циклов нагружения, амплитуды последующих усилий в указанных документах не указаны. Для восполнения данного пробела авторы использовали математическую модель и конечно-элементную компьютерную программу [5], по которой проведены и систематизированы расчеты взаимодействия вертикальной цилиндрической преграды различных диаметров с ровным однолетним льдом при различных его упруго-прочностных характеристиках и толщине.

В результате анализа выполненных расчетов и данных, приводимых в литературе [5,6,7], при моделировании ледовой нагрузки учитывалось, что характер взаимодействия при малых и больших скоростях движения льда коренным образом отличается. При малых скоростях (но превышающих скорости, соответствующие пластическому течению льда) лед перед сооружением разбивается трещинами на трапеции, которые впоследствии ломаются благодаря изгибу и потере устойчивости. При больших скоростях происходит непрерывное дробление льда по части поверхностного контакта с сооружением.

На основании анализа численного эксперимента [5] предложено в качестве определяющего параметра использовать эффективную безразмерную скорость V_{eff} :

$$V_{eff} = \frac{V_i \sqrt{\rho_i E}}{R_c}, \qquad (2)$$

где ρ_i - плотность льда; R_c - прочность льда на одноосное сжатие; E - модуль упругости льда.

Малое значение скорости соответствует $V_{eff} \cong 0.1$, а большое V_{eff} >0.7.

В соответствии с изложенной физикой процесса принималось, что нагрузка при малой скорости внедрения состоит из следующих элементов: первого пика с амплитудой F_1 и длительностью τ_1 , вызванного разрушением льда и образованием трапеций; второго, интенсивностью F_2 и длительностью τ_2, связанного с наползанием и разрушением ледяных трапеций; и третьего, с амплитудой F_3 и длительностью τ_1, соответствующего новой встрече сооружения со льдом. При дальнейшем прорезании продолжаются циклы с амплитудами F_2, F_3 и длительностями τ_2, τ_1.

Многочисленными исследованиями показано [8,9], что последующие пики существенно меньше первого, поэтому принималось $F_3=k_3F_1$.

При большой скорости внедрения все пики, кроме первого, принимались равными: $F_2=k_2F_1$. Также одинаковой принималась и длительность этих усилий - τ_1.

Значения k_2, k_3, τ_1, τ_2 определялись на основании численных экспериментов [5] по результатам натурных и модельных исследований [8,9].

В диапазоне $0.1<V_{eff}<0.7$ пики нагрузки и длительности вычислялись путем линейной интерполяции в зависимости от параметра V_{eff}.

При реализации описанного подхода к определению циклических усилий необходимо вычислить первое усилие внедрения и скорость движения льдины, проверить, произойдет ли цикл прорезания или льдина остановится; при продолжении циклов прорезания - вычислять усилия нагружения с учетом текущих значений эффективной скорости.

В рамках данной работы для определения первого усилия внедрения использовалась мето-

дика СНиП [1] и авторская методика определения ледовой нагрузки.

В соответствии со СНиП 2.06.04-82* (ред. 1996г.) прочность льда вычислялась с учетом толщины льдин, их строения, средней температуры воздуха за необходимый промежуток времени, а также солености морской воды. Усилия при остановке и прорезании льдин вычислялись по предлагаемым в этом нормативном документе формулам, причем наличие торосов учитывалось путем умножения нагрузок на коэффициент торосистости k_r=1.5.

При реализации авторской методики прочность ровного льда на сжатие определялась по СНиП 2.06.04-82* с использованием следующих дополнений.

Соленость льда принималась постоянной в весенне-летний период и зависимой от толщины льдин в остальные периоды времени.

Характер изменения температуры льда по его толщине принимался по линейному закону только при среднесуточной температуре воздуха (за период времени зависящий от толщины льдин) t_a<-2°. При t_a>-2° закон изменения температуры льда аппроксимировался параболой

$$t(z) = a_1 + a_2 \frac{z}{h} + a_3 \left(\frac{z}{h}\right)^2, \qquad (3),$$

где *t(z)* - изменение температуры льда по его толщине; *z* - координата расчетной точки по толщине льда, отсчитываемая от границы раздела воздух-лед; a_1, a_2, a_3 - параметры .

Для получения неизвестных параметров в выражении (3) можно использовать условия на границе раздела сред и данные о средней температуре по толщине ледового покрова в зависимости от среднесуточной температуры воздуха. Применение подобных (3) аппроксимаций температуры льда является, на наш взгляд, весьма необходимым дополнением к СНиП 2.06.04-82*, так как большинство наиболее толстых льдин, обуславливающих максимальные нагрузки, взаимодействуют с сооружением в весенний (или летний) период, когда даже средние температуры воздуха становятся положительными.

При вычислении прочности ровного льда на одноосное сжатие учитывалась скорость его деформации:

$$R_{c,e} = R_c \begin{cases} (\frac{\dot{\varepsilon}}{10^{-3}})^{0,33}, \dot{\varepsilon} < 10^{-3} \\ (\frac{1}{8})^{0,23}, \dot{\varepsilon} \geq 8 \cdot 10^{-3} \\ (\frac{10^{-3}}{\dot{\varepsilon}})^{0,23}, 8 \cdot 10^{-3} \geq \dot{\varepsilon} \geq 10^{-3} \end{cases}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon} = kV_i/b$ - эффективная скорость деформации льда; *b* - диаметр сооружения; *k* - коэффициент зависящий от скорости движения льда и диаметра сооружения; R_c - прочность ровного льда на сжатие, определяемая по методике СНиП с учетом описанных выше дополнений.

В рамках авторской методики первое усилие при внедрении сооружения в льдину вычислялось в соответствии с выражением, полученным на основании обобщения численных расчетов [5]:

$$F_1 = \begin{cases} (0,6 + 0,75\frac{V_i}{R_c}) b R_{c,e} h, V_{eff} < 0,4 \\ 0,9 b R_{c,e} h, V_{eff} \geq 0,4 \end{cases}, \quad (5),$$

где *h* - толщина ровной части льдины.

Нагрузка при остановке ровной льдины вычислялась следующим образом:

$$F_{c.p} = 0,5h\ L \left(\frac{6\pi\rho_i b}{g(b+L)}\right)^{1/3} [R_{c,e} V_i]^{2/3}, \quad (6),$$

где *L* - линейный размер льдины (льдины считались квадратными); а *g* - ускорение свободного падения.

При взаимодействии сооружения с торосистой льдиной усилие, возникающее при ее остановке, вычислялось следующим образом:

$$F_{c,p} = 0,5L \left[\frac{6\pi\rho_i b(0,175hs + hh + 0,15hk}{g(b+L)}\right]^{1/3} (0,75V_i R_{c,e} hh)^{2/3} \quad (7)$$

где *hh*, *hs*, *hk* - средняя толщина консолидированной части тороса, средняя высота паруса и киля в грядах торосов, соответственно.

При прорезании торосистой части льдины, в рамках авторской методики, усилие вычислялось путем суммирования нагрузок от консолидированной части тороса и его киля. Усилие, возникающее при прорезании консолидированной части, вычислялось по выражению (5), где вместо толщины ровного льда использовалась толщина консолидированной части тороса, а прочность ее принималась в пределах 75% от прочности ровной части той же льдины. Нагрузки от киля тороса вычислялись по методике Кроусдейла [10].

Следует отметить, что при использовании различных методик определения нагрузок для моделирования циклических нагружений могут изменяться не только абсолютные значения амплитуд усилий, но и число циклов нагружения вследствие изменения характера моделируемого взаимодействия льдин с сооружением.

Число циклических нагружений не совпадает по обеим методикам даже при прохождении льдов высокой сплоченности, когда предполагается непрерывное прорезание льдин. Это происходит вследствие различий в эффективной скорости их движения (из-за различного определения прочности на сжатие). Еще большие разли-

чия происходят при моделировании взаимодействия сооружения с льдами малой сплоченности. Здесь после каждого цикла нагружения рассчитывается новая скорость движения льдины:

$$V(t+\Delta t)=\sqrt{\frac{mV^2(t)-2P_i+2P_w}{m}}\,, \qquad (8),$$

где m - масса льдины; P_i - энергия расходуемая на один цикл прорезания льдины сооружением; P_w - энергия получаемая льдиной в течении одного цикла прорезания за счет разности ее скорости со скоростью ветра и течения; $V(t)$ - скорость льдины до цикла прорезания; $V(t+\Delta t)$ - скорость льдины после цикла прорезания.

После каждого цикла прорезания осуществляется проверка, показывающая, что произойдет дальше - прорезание или остановка льдины. Поскольку методики расчета нагрузок заметно различаются, то различается и «история» взаимодействия каждой льдины с сооружением.

5. Построение вероятностных оценок ледовых нагрузок и оценка усталостных эффектов в конструкции сооружения

В результате моделирования ледовой обстановки, параметров льдин и расчета ледовых нагрузок осуществляется накопление информации, необходимой для построения кривой плотности вероятности амплитуд нагружения. При этом диапазон изменения значений ледовой нагрузки ранжируется и подсчитывается число попаданий амплитуд нагружения в каждый из поддиапазонов за время моделирования. В этом случае вероятностное распределение может быть представлено либо с помощью гистограммы (рис.1*а*), либо кривой плотности вероятности (рис.1*б*).

Общее число циклов нагружения *N*, определенное за все время моделирования, обуславливает связь между числом ранжированных нагрузок и соответствующим значением плотности вероятности :

$$p(F_i)=N_i/N\,, \qquad (9),$$

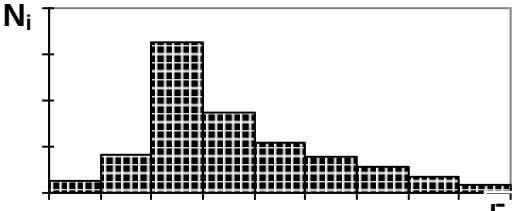


Рис.1*а*. Гистограмма распределения амплитуд ледовых нагрузок

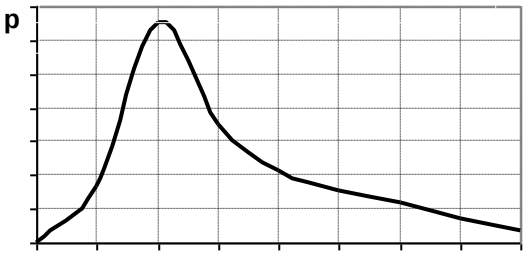


Рис.1*б*. График плотности вероятности амплитуд ледовых нагрузок

где $p(F_i)$ - значение плотности вероятности при амплитуде ледового усилия, соответствующей i диапазону ранжирования; N_i - число усилий, попавших в i диапазон ранжирования в результате моделирования.

Кривая плотности вероятности является весьма универсальным инструментом для получения различных вероятностных оценок.

Так, например, нетрудно получить достаточно строгую (в отличие от действующего СНиП) оценку значений экстремальной нагрузки, повторяющейся один раз в заданное число лет *T*. Действительно, поскольку число циклов нагружения *N* определено за известное время моделирования - нетрудно указать число циклов нагружения *N(T)* на любом произвольном интервале времени. Тогда задача определения нагрузки $F_{1/N(T)}$, повторяющейся один раз за *T* лет, сводится к решению следующего уравнения:

$$\int_{F_{1/N(T)}}^{\infty} p(F)dF=\frac{1}{N(T)}\,. \qquad (10)$$

Задача легко решается после аппроксимации «хвоста» распределения аналитической функцией.

Для осуществления усталостного анализа необходимо получить плотность вероятности напряжений в наиболее опасных элементах конструкции. Используя значения сил из гистограммы рис.1*а*, зная точки приложения ледовой нагрузки и, применяя ту или иную расчетную модель для каждой конструкции, можно в квазистатической постановке построить семейство гистограмм для напряжений σ в элементах конструкции. Таким образом для каждой узловой точки конструкции, в гистограмме на рис.1*а* значение амплитуды усилий заменяется на амплиту-

ду напряжений, а число циклов нагружения N_i остается неизменным. По данной гистограмме могут быть воспроизведены кривые плотности вероятности, как функции напряжений в элементах конструкции.

При анализе усталостных эффектов за заданный интервал времени T (например, за время эксплуатации сооружения) значения ординат N_i на рис. 1*а* следует пересчитать на n_i соответствующих числу циклов нагружения за этот промежуток времени

$$n_i = \frac{N_i N(T)}{N}.$$

Тогда гистограммы, аналогичные рис.1*а*, будут связывать ранжированные значения напряжений σ_i с числом их повторения n_i за заданный промежуток времени T.

Используя полученное семейство гистограмм, нетрудно проверить каждый элемент конструкции на условие отсутствия усталостных повреждений за указанный интервал времени:

$$\sum_i \frac{n_i K_{S-F}}{N_{i,S-F}} < 1.0\,, \qquad (11),$$

где $K_{S\text{-}F}$ - коэффициент запаса; $N_{i,S\text{-}F}$ - максимально допустимое число циклов нагружения с напряжением σ_i.

5. Некоторые результаты вероятностного моделирования

В качестве примера реализации предлагаемой методики моделирования далее приводятся некоторые результаты вероятностного анализа ледовых нагрузок для одного из северных морей России.

Гидрометеорологические данные по ледовой обстановке, параметрам льдин, скоростям течения и ветра использовались для условий Печорского моря. Изучалось взаимодействие льдин с вертикальными цилиндрическими преградами диаметра 30, 50 и 100 м. Интервал моделирования выбирался 10^4 лет и обеспечивал удовлетворительное среднеквадратическое отклонение (5-10%) получаемых значений нагрузок с малой обеспеченностью.

На рис.2 приводится зависимость толщины льдин с 1% (одна льдина из ста) обеспеченностью в зависимости от месяца года.

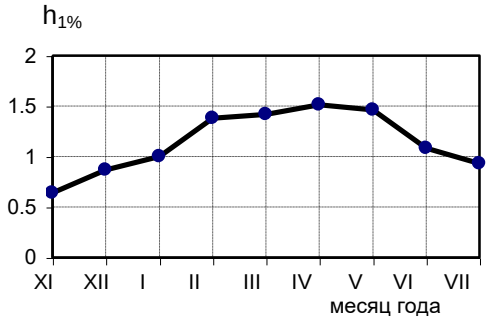


Рис.2 Изменение толщины льдин 1% обеспеченности в течение года

Очевидно, что наиболее толстые льдины встречаются в Печорском море преимущественно в весенне-летний период. Для некоторых иных северных морей России [2] оказывается, что экстремальные по толщине льдины взаимодействуют с сооружением в летний период времени.

На рис.3 предлагается зависимость прочности льда на одноосное сжатие 1% обеспеченности в зависимости от месяца года.

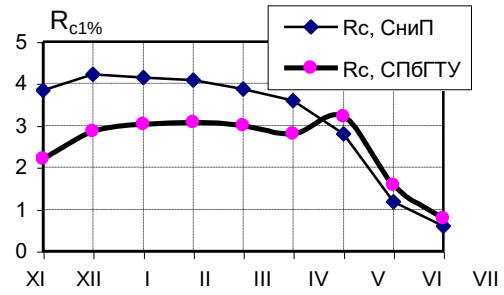


Рис.3 Изменение прочности 1% обеспеченности ровных льдин в течение года

Анализ зависимостей показывает, что прочность льда существенно снижается в летний период хотя толщины его остаются весьма значительными. Тем не менее в Печорском море можно ожидать взаимодействия сооружения с высокопрочными льдами в течение более чем полугодового периода времени. Отличие методики СПбГТУ в определении прочности от стандартной методики СНиП обуславливается более гибким учетом солености льдов (в зависимости от их толщины).

На рис.4*а,б,в* представлены зависимости ледовых усилий 1% обеспеченности (одно усилие на сто нагружений) для вертикальных цилиндрических преград различного диаметра.

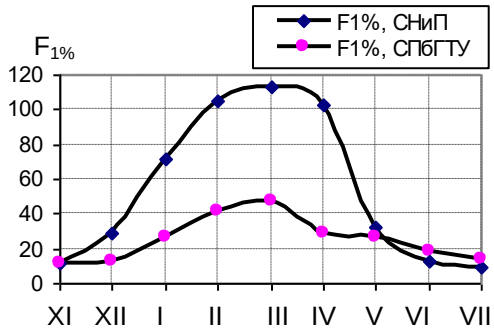


Рис.4*а* Изменение ледовых усилий 1% обеспеченности на преграду с b=30 m в течение года

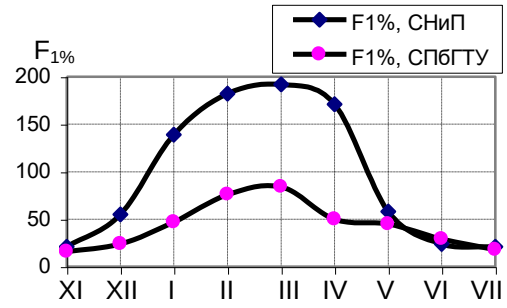


Рис.4*б* Изменение ледовых усилий 1% обеспеченности на преграду с b=50 в течение года

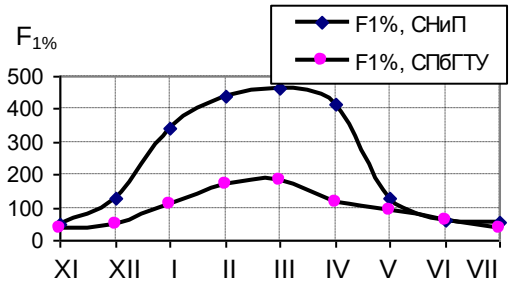


Рис.4*в* Изменение ледовых усилий 1% обеспеченности на преграду с *b* =100 в течение года

Сопоставление ледовых нагрузок, определенных по различным методикам показывает, что авторский метод расчета дает значительно более низкие значения нагрузок. Поскольку авторская методика разрабатывалась для получения менее жестких, по сравнению со СНиП, оценок ледовых нагрузок, отмеченная тенденция в расхождении результатов вполне естественна. Однако, количественные расхождения будут в дальнейшем изучены авторами более детально.

Кроме того, следует подчеркнуть, что нагрузки с заданной процентной обеспеченностью, моделируемые по изложенной методологии, оказываются меньше, чем аналогичные нагрузки, полученные моделированием экстремальных нагрузок при взаимодействии сооружения с льдом [4]. Дело в том, что при моделировании всех циклов нагружения среди нагрузок превалируют относительно небольшие усилия. Максимальное число нагружений собирается при $V_{eff} > 0.7$, а подобные значения эффективной скорости достигаются при увеличении скорости движения льдин и снижении их прочности - и то и другое не способствует возникновению экстремальных ледовых усилий.

На рис.5 представлена зависимость экстремальных нагрузок повторяющихся один раз в сто лет для различных диаметров преграды.

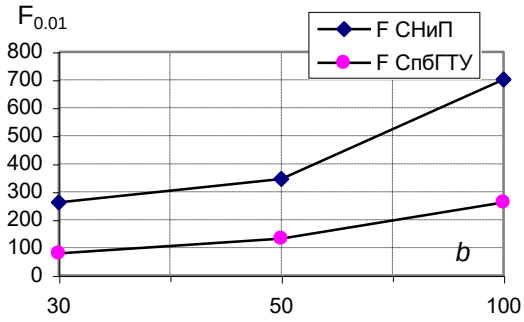


Рис.5 Зависимость экстремальных ледовых нагрузок, повторяющихся один раз за сто лет, от диаметра преграды

Зависимость отражает отмеченное ранее расхождение между расчетом по СНиП и авторской методикой. Полученные кривые можно интерпретировать как оценку верхней и нижней границ экстремальных нагрузок. Тем не менее, в обоих случаях снимается неопределенность, связанная с интерпретацией результатов, на которые оказывает влияние ряд факторов, имеющих вероятностный характер изменения.

На рис.6 *а,б* представлены кривые плотности вероятности ледовых усилий, полученные в результате моделирования для преграды диаметром 100м .

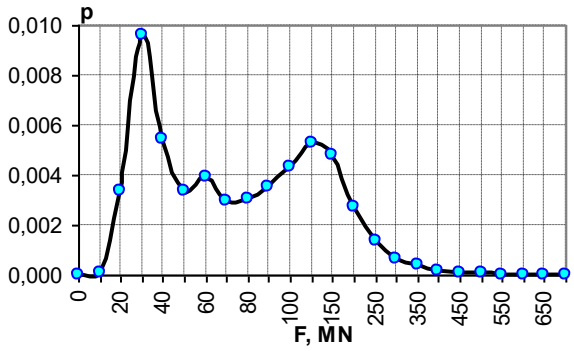


Рис.6*а*. Кривая плотности вероятности ледовой нагрузки на преграду с *b*=100 м при вычислении нагрузок по СНиП.

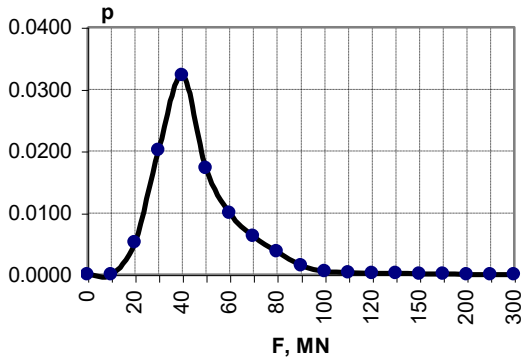


Рис. 6*б*. Кривая плотности вероятности ледовой нагрузки на преграду с b=100 м при вычислении нагрузок по авторской методике

Как видно из полученных зависимостей, метод расчета нагрузок оказывает существенное влияние не только на их абсолютные значения, но и на форму кривой плотности вероятности. Заметно различается и число циклов нагружения, однако при использовании обоих методов расчета нагрузок число циклов нагружения в условиях Печорского моря оказывалось в пределах от 1 до 10 миллионов в год.

7. Заключение

Предложенная в настоящей работе методика вероятностного моделирования ледовых нагрузок на сооружения континентального шельфа позволяет получить оценки экстремальных ледовых усилий заданной обеспеченности, которые могут на него воздействовать в течение всего срока эксплуатации. Кроме того, данная методика предоставляет необходимую информацию для оценки усталостных эффектов, возникающих в конструкции под действием циклических ледовых нагрузок.

Применение подобных подходов позволяет получить ясные и интерпретируемые (со статистической точки зрения) результаты, но одновременно требует использования значительно более обширного перечня данных о гидрометеорологических условиях в заданной акватории.

Развитие и совершенствование методологии настоятельно требует дальнейшего всестороннего изучения циклических ледовых нагрузок, описание которых до настоящего времени не нашло должного раскрытия в научно-технической литературе и нормативных документах.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.06.04-82*, Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Ред. 1996г.
2. General Requirements, design criteria the environment and loads. CAN/CSA-S471-92. A national standard of Canada.
3. Det Norske Veritas Rules for Construction and Classification of Mobil Offshore Units, Oslo, 1992.
4. A. Bolshev, E.Chasovskih, S. Frolov, K. Shkhinek, T. Karna Probabilistic model of ice loads on Russian arctic offshore structures, Proc. Of 16th Int.Conf. OMAE'97 and 14th Int.Conf. POAC'97, Vol.IV Arctic/Polar Technology p.159-164
5. K. Shkhinek, D. Blancet, Sh. Bhut, S. Kapustyansky, A. Zhilenkov The Moving ice-structure interaction, Proc. of the 2d Int. Conference "RAO-95", St.Petersburg, 1996
6. Chin, S.N. and Sodhi, D.S. Analysis of Data from Indentation Tests on Freshwater Ice. Proc. of OMAE Conference, 1993, p.p.73-82.
7. Sodhi , D.S. Ice-Structure Interaction During Indentation Tests. Proc. of IUTAM-IAHR Ice Symposium, 1991, pp.619-637.
8. Marine Structures and Ships in Ice (Carstens, T. – editor). Report № 81-06/2, 1981.
9. Takeuchi, T. And Saeki, H. Significance of Ice Sheet's Leading-Edge Roughness in Relation to Ice Load. Journ. ISOPE, vol. 8 № 3, 1998, pp.161-167.
10. Croasdale K.R. Ice forces on fixed rigid structures, part II of special report 80-26 T.Carstens editor, U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, 1980.