

УДК 69.059.22:551.578

Т.Э. Уварова

ФГАОУ ВПО «ДВФУ»

МНОГОЦИКЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НА СООРУЖЕНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА

Предложена модель механического взаимодействия ледяных полей с сооружением, которая направлена на определение количества циклов нагружения, времени прорезания, длины пути взаимодействия и режима нагружения сооружения.

Ключевые слова: сооружения континентального шельфа, ледяные поля, ледовая нагрузка, количество циклов нагружения, режим нагружения, многоцикловое воздействие.

Введение. При рассмотрении надежности сооружения с позиций постепенного отказа (разрушение от накопления усталостных повреждений материала) необходимо знание не только экстремальных значений нагрузок, но и их средних значений. Это обуславливает необходимость получения подробной информации и изучения вероятностных распределений параметров ледового режима во всем диапазоне их изменений. В этом случае наиболее целесообразно математическую модель ледового режима представлять в виде имитационной модели для моделирования процессов формирования ледовых нагрузок на сооружение во всем диапазоне их изменений.

Модель позволяет рассмотреть процесс воздействия ледяных полей на сооружение за весь период его эксплуатации с расчетом основных параметров, определяющих интенсивность многоциклического воздействия, т.е. количество циклов нагружения, период нагружения и время внедрения опоры сооружения в ледяное поле. Эти параметры определяются дифференцированно для каждой имитируемой ситуации. Моделируя каждую ситуацию путем перебора характеризующих ее входных параметров, фактически рассматриваются все возможные сочетания этих параметров.

Постановка задачи. Входными данными в механической модели являются параметры, характеризующие изменчивость ледяного покрова (ледовый режим), а именно: сплоченность ледяного покрова N , размер льдин D , скорость дрейфа льда V , толщина h , прочность R , плотность льда ρ , а также диаметр опоры d и коэффициент формы опоры m .

Для математического описания механического взаимодействия дрейфующих ледяных полей с сооружениями приняты следующие допущения.

1. Значение ледовой нагрузки определяется по формуле СНиП [1].

2. Ширина зоны контакта льда с сооружением определяется в зависимости от длины прорезания льда опорой следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{а)} \quad l_{\text{пр}} < d/2, \quad d' = 2l_{\text{пр}} \sqrt{1 - D/l_{\text{пр}}}, \\ \text{б)} \quad l_{\text{пр}} > d/2, \quad d' = d, \end{aligned} \quad (1)$$

где $l_{\text{пр}}$ — длина внедрения опоры сооружения в ледяную плиту, м; d — диаметр сооружения, м; D — диаметр ледяного поля, м.

3. Льдины принятые круглые в плане и распределены равномерно по рассматриваемой площади с шириной квадрата R . Первоначальное расстояние между льдинами одинаково и определяется по формуле

$$l_0 = D(1 - \sqrt{N}) / (2\sqrt{N/\pi}), \quad (2)$$

где N — сплоченность льда, балл.

4. При прорезании ледяного поля оно раскалывается, когда длина полосы прорезания достигает значения $l_{\text{пр}} = D - 2d$.

5. Разрушение льда в зоне контакта с опорой носит хрупкий характер, происходит скол и раздробление. Нагрузка ото льда действует циклически с частотой разрушения, определяемой по формуле [2]

$$f = 4a \frac{d}{h} \frac{\dot{\varepsilon}^{5/4}}{\operatorname{tg}(45 + \varphi/2)}, \quad (3)$$

где $a=7\dots10$ — эмпирический коэффициент; $\beta=45^\circ+\varphi/2$ — угол скола; φ — угол внутреннего трения льда, град.

6. Период нагружения (изменения ледовой нагрузки) обратно пропорционален частоте разрушения f и определяется по формуле

$$T = 1/f. \quad (4)$$

7. Количество циклов нагружения сооружения ледяным покровом определяется по формуле

$$n = \tau / f, \quad (5)$$

где τ — время внедрения опоры сооружения в ледяную плиту, с.

Процесс взаимодействия с сооружением дрейфующего ледяного покрова, состоящего из отдельных льдин, достаточно сложен. В этом процессе могут наблюдаться четыре характерных случая взаимодействия:

А) внедрение опоры сооружения в ледяную плиту (на величину менее $d/2$) и остановка льдины;

Б) прорезание ледяного поля опорой сооружения на величину более $d/2$ и остановка ледяного поля;

В) прорезание ледяного поля опорой сооружения на величину более $D - 2d$ с раскалыванием льдины;

Г) вторичное внедрение или прорезание остановившегося ледяного поля при взаимодействии с подходящими к сооружению другими ледяными полями [3].

В первых трех случаях (А, Б, В) вся кинетическая энергия приравнивается к работе контактной силы на пути внедрения опоры в лед. В данном случае вся кинетическая энергия льдины приравнивается работе контактной силы на пути внедрения опоры в лед. Контактная сила определяется согласно СНиП [1], как произведение значения предела прочности льда на сжатие на площадь зоны контакта, при этом геометрия зоны контакта определяется формой опоры сооружения, тогда можно записать:

$$\int_0^x F dx = \frac{M_{i+1} V_{i+1}^2}{2} - \frac{M_i V_i^2}{2}, \quad (6)$$

где dx — длина прорезания льда на i -м шаге; M_i — масса льда на i -м шаге, M_{i+1} — масса льда на следующем шаге; V_i — скорость движения льдины на i -м шаге; V_{i+1} — скорость прорезания льда опорой на следующем шаге; F_i — сила прорезания льда на i -м шаге.

Длина прорезания льда опорой на i -м шаге определяется по формуле

$$dx = V_i dt, \quad (7)$$

где dt — шаг прорезания льда по времени.

Закон изменения скорости прорезания льда определяется по формуле

$$V_{i+1} = \sqrt{\frac{M_i V_i^2 - 2F_i V_i dt}{M_{i+1}}}. \quad (8)$$

При полной потере ледяным полем кинетической энергии оно остановится, тогда $V_i = 0$, время прорезания определится как $\tau = \sum dt$, а длина прорезания как $l_{\text{пр}} = \sum dx$.

Процесс прорезания может возобновиться, когда последующие дрейфующие льдины соприкоснутся со стоящей у опоры льдиной или блоком льда (случай Г). В данном случае условием возобновления процесса прорезания является передача импульса подошедшей льдины к блоку льда, стоящему перед сооружением. Если имеется не одна, а несколько льдин, то складывая импульсы этих льдин, можно найти полный импульс системы (блока льда), тогда скорость блока льда определится из соотношения

$$V_{\text{бл}} = \frac{M_i V_i + M_{i+1} V_{i+1}}{M_i + M_{i+1}}. \quad (9)$$

В случае Г прорезание льда возобновится со скоростью блока льда равной $V_{\text{бл}}$, а процесс прорезания повторяется по выше предложенной модели.

В рамках имитационной модели сценарий эволюции движения ледяного покрова при его взаимодействии с МЛП развивается следующим образом.

При первом взаимодействии льда с опорой МЛП имеет место один из трех первых расчетных случаев (А, Б, В). При этом, если кинетической энергии льдины достаточно для внедрения, то после удара льдина прорезается сооружением и останавливается (А, Б) или прорезается сооружением и раскалывается (В). При этом скорость прорезания льда убывает от некоторого значения $V_0 = V_{\text{др}}$, где $V_{\text{др}}$ — скорость дрейфа льда, до $V_i = 0$, где V_i — скорость прорезания льда опорой, которая изменяется по закону, полученному на основании теоремы об изменении кинетической энергии (8). После остановки первого или очередного ледяного поля перед опорой происходит накопление льдин (случай Г). При этом каждая вновь прибывающая льдина передает свой импульс блоку льда, стоящему перед сооружением, благодаря чему процесс прорезания может возобновиться при условии достаточности кинетической энергии от переданного импульса стоящему перед опорой блоку льда. Тогда скорость блока льда определится из соотношения (9). После остановки и сброса нагрузки (случай Г) картина циклически повторяется по мере поступления новых льдин. При этом оценивается время, за которое приближающаяся льдина достигнет крайней в скопившемся и остановившемся перед опорой блоке льда. В случае скола льда (случай В) необходимо определить время, за которое первая льдина в блоке льда, стоящего перед сооружением, соприкоснется с опорой и только после этого рассматривается процесс взаимодействия льда с опорой по выше предложенной модели.

В результате расчета по имитационной модели механического взаимодействия ледяного поля с опорой сооружения определяются следующие параметры процесса взаимодействия ледяного поля с сооружением: величина ледовой нагрузки F , продолжительность процесса прорезания τ , период (частота) изменения ледовой нагрузки в процессе прорезания T , количество циклов нагружения n сооружения ледовой нагрузкой, длина пути прорезания L , а так же определяются вероятностные распределения этих величин.

Для исследования функционирования разработанной имитационной модели процесса взаимодействия дрейфующего ледяного покрова с МЛП были выполнены численные эксперименты по разработанной программе для условий Охотского моря и МЛП «Моликпак». Численное моделирование осуществлялось путем перебора всех возможных сочетаний исходных параметров в соответствии с их распределениями. В качестве входных параметров использовались гистограммы: сплоченности льда, размеров льдин, толщины льда, прочности льда и скорости льда по северному направлению.

В результате расчетов были получены следующие зависимости: силы прорезания от времени прорезания (рис. 1); скорости блока льда от времени; количества циклов нагружения от времени (рис. 2); длины прорезания от времени; периода прорезания льда от времени, а также режим нагружения сооружения ледяным покровом (рис. 3).

Результаты расчетов показали, что сооружение может подвергаться воздействиям много цикловой нагрузки от дрейфующего ледяного покрова. Суммарное количество циклов n по направлениям представлено в таблице.

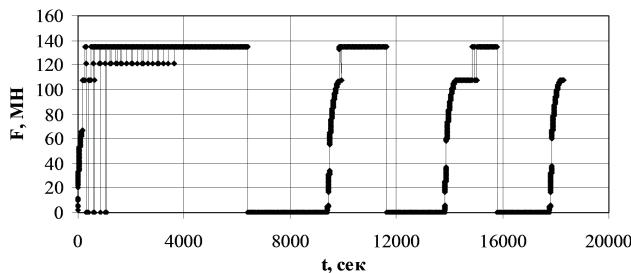


Рис. 1. Зависимость силы прорезания от времени

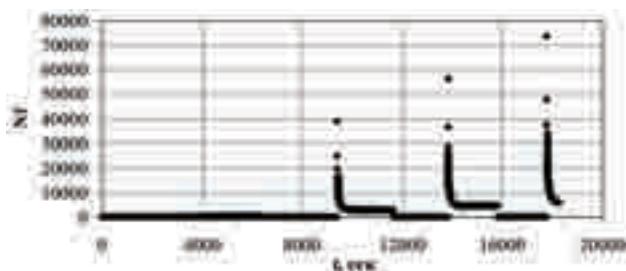


Рис. 2. Зависимость количества циклов нагружения от времени

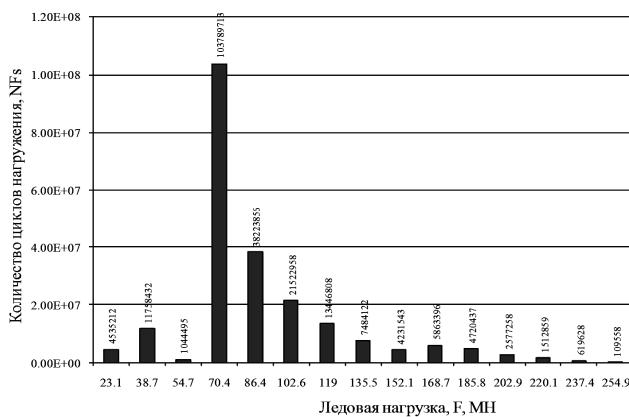


Рис. 3. Режим нагружения сооружения

Количество циклов нагружения по направлениям

Север $22,1 \cdot 10^7$	Северо-восток $7,8 \cdot 10^7$	Восток $6,3 \cdot 10^7$	Юго-восток $20,3 \cdot 10^7$
Юг $35,5 \cdot 10^7$	Юго-запад $9,3 \cdot 10^7$	Запад $6,0 \cdot 10^7$	Северо-запад $10,4 \cdot 10^7$

Заключение. Необходимость освоения морских нефтегазовых месторождений шельфа северных морей требует тщательного учета особенностей ледового режима акваторий. Параметры дрейфующего льда определяют конструктивные решения опорной части МЛП. Для получения информации о параметрах взаимодействия ледяного покрова с сооружением в статье предложена модель механического взаимодействия ледяных полей с МЛП, которая основана на численном формировании процесса взаимодействия ледяного покрова с сооружением. Предложенная модель направлена на определение параметров механического взаимодействия ледяного покрова с сооружением: количество циклов нагружения, времени прорезания, длины прорезания и режима нагружения сооружения.

Режим нагружения в дальнейшем используется в качестве исходных данных для определения эксплуатационной нагруженности сооружения при расчете его на усталостную прочность от действия много цикловой нагрузки. Особенностью данного расчета является возможность учета пространственной изменчивости ледяного покрова благодаря применению в расчетах гистограмм скорости дрейфа по различным направлениям. На основе анализа полученных результатов есть возможность выявить самое неблагоприятное направление действия нагрузки и дать рекомендации по проектированию (например, ледового пояса с местными усилениями конструкции).

Библиографический список

1. Беккер А.Т. Разработка методов расчета вероятностных характеристик ледовых нагрузок для оценки надежности сооружений континентального шельфа : автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. СПб, 1998. 38 с.
2. СНиП 2.06.04—82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М. : Стройиздат, 1995. 40 с.
3. Уварова Т.Э. Методика определения количества циклов и режима нагружения сооружения дрейфующим ледяным покровом : автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Владивосток, 1999. 22 с.

Поступила в редакцию в декабре 2011 г.

О б а т о р е: Уварова Татьяна Эриковна — кандидат технических наук, доцент кафедры гидротехники, теории зданий и сооружений, Инженерная школа, Дальневосточный федеральный университет, 690014, г. Владивосток, пр. Кр. Знамени, 66, каб. 407, тел/факс 8-(423)-245-16-18, searay@yandex.ru.

Д л я ц и т и р о в а н и я: Уварова Т.Э. Многоциклическое воздействие дрейфующего ледяного покрова на сооружения континентального шельфа // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 41—45.

T.E. Uvarova

MULTICYCLIC ACTION OF DRIFTING ICE FIELDS ON OFFSHORE STRUCTURES

The paper presents the model of mechanical interaction of ice fields with offshore structures. This model allows to calculate the amount of loading cycles, duration of penetration, interaction length and loading regime of structure.

Key words: offshore, structure, ice, force, loading cycle, loading regime, multicycle action.

References

1. Bekker A.T. Razrabotka metodov rascheta verojatnostnyh harakteristik ledovyh nagruzok dlya otsenki nadezhnosti sooruzhenij kontinental'nogo shel'fa [Development of Analysis Methods of Probabilistic Characteristics of Ice Loads for Evaluation Structure Reliability of Continental Shelf], St-Petersburg, 1998, 36 p.
2. SNiP 2.06.04-82* Nagruzki i vozdejstvija na gidrotehnicheskie sooruzhenija (volno-vye, ledovye i ot sudov) [Loads and Effects on Hydroengineering Structures (from Waves, Ice and Vessels)]. Moscow, 1995, 40 p.
3. Uvarova T.E. Metodika opredelenija kolichestva ciklov i rezhima nagruzhenija so-oruzhenija drejfujuwim ledjanym pokrovom [Method of determination of cycle amount and loading regime of structure by drifting ice cover], Vladivostok, 1999, 22 p.

А б о у т а у т о р е: Уварова Татьяна Ериковна — PhD., Associated Professor, Dept. Offshore and Structural Mechanics, School of Engineering, Far Eastern Federal University, of. 407, 66, Krasnogo Znameni av., Vladivostok, Russia, 690014, +7-(423)-245-16-18, searay@yandex.ru.

Ф о р с т а т и о н: Уварова Т.Е. Mnogociklovoe vozdejstvie drejfujuwego ledjanogo pokrova na sooruzhenija kontinental'nogo shel'fa [Multicyclic action of drifting ice fields on offshore structures]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering], 2012, no 1, Pp. 41—45.