УДК 629.563+629.5.028-027.45
EDN: VUAIHP

А.В. Александров, М.Г. Коваль, В.М. Шапошников
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЯКОРНЫХ И ШВАРТОВНЫХ СВЯЗЕЙ ПЛАВУЧИХ ШЕЛЬФОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Объект и цель научной работы. Объект исследования – компоненты якорно-швартовных линий плавучих шельфовых сооружений, подверженных переменным циклическим воздействиям. Цель – разработка методических рекомендаций по оценке усталостной долговечности якорных и швартовных связей.
Материалы и методы. Усталостная долговечность стальных канатов, цепей, соединительных звеньев и других элементов системы удержания определяется с использованием кривых усталости, основанных на результатах циклических испытаний, а также регрессионном анализе.
Основные результаты. Определены основные виды внешних воздействий и реакций плавучего сооружения. Установлены определяющие диапазоны частот. Представлен алгоритм суммирования накопленных усталостных повреждений. Сопоставлены значения коэффициентов безопасности по усталостному критерию.
Заключение. Разработаны методологические рекомендации по расчету усталостной долговечности якорных и швартовных связей плавучих шельфовых сооружений.
Ключевые слова: якорные цепи, стальные канаты, соединительные звенья, усталостная долговечность, коэффициент безопасности.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.563+629.5.028-027.45
EDN: VUAIHP

A.V. Aleksandrov, M.G. Koval, V.M. Shaposhnikov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

FATIGUE LIFE CALCULATION METHODOLOGY FOR MOORING COMPONENTS OF FLOATING OFFSHORE PLATFORMS

Object and purpose of research. This paper discusses mooring components of floating offshore platforms exposed to variable cyclic environmental actions. The purpose of this work was to develop methodical recommendations on how to estimate fatigue life of mooring components.
Materials and methods. Fatigue life of steel ropes, chains, shackles and other mooring components is determined by means of fatigue curves obtained from cyclic tests, as well as by means of regression analysis.
Main results. The study identifies main environmental actions and corresponding responses of the floating structure, establishes critical frequency bands and presents summation algorithm for accumulated fatigue damage, as well as compares safety margins in terms of fatigue strength.
Conclusion. The author managed to develop methodological recommendations on how to calculate fatigue life of mooring components at floating offshore platforms.
Keywords: anchor chains, steel ropes, shackles, fatigue life, safety margin.
The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Александров А.В., Коваль М.Г., Шапошников В.М. Методология расчета усталостной долговечности якорных и швартовных связей плавучих шельфовых сооружений. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 4(410): 78–85.
For citations: Aleksandrov A.V., Koval M.G., Shaposhnikov V.M. Fatigue life calculation methodology for mooring components of floating offshore platforms. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 4(410): 78–85 (in Russian).

Введение

Introduction

Якорные и швартовные связи входят в состав системы позиционирования плавучих шельфовых сооружений. В процессе эксплуатации они подвергаются переменным циклическим нагрузкам, которые вызывают необходимость выполнения расчетов их усталостной долговечности.

В Правилах Российского морского регистра судоходства[1] (далее – Правила РМРС) [1, 2] содержатся требования к якорно-швартовным связям в основном по критерию предельной прочности. В части усталостной долговечности объем требований Правил РМРС недостаточен. Это обосновывает необходимость разработки проекта методических рекомендаций по расчету усталостной долговечности якорных и швартовных связей.

Воздействия окружающей среды на плавучие сооружения обычно подразделяют на три категории в зависимости от их диапазона частот: установившиеся воздействия, низкочастотные воздействия и циклические воздействия с частотой волн. Перемещения плавучих сооружений являются основными воздействиями на систему позиционирования, включая якорные и швартовные линии.

Усталостная долговечность стальных канатов, цепей, соединительных звеньев, а также других элементов системы позиционирования определяется с использованием кривых усталости, которые основываются на данных усталостных испытаний для этих компонентов, а также регрессионном анализе. Для определения суммарного усталостного повреждения используется правило линейного суммирования накопленных повреждений.

В качестве швартовных связей (линий) в статье рассматриваются швартовы, соединяющие плавучее сооружение с одноточечным плавучим причалом, который, в свою очередь, через якорные линии соединяется на дне с якорями. Т.е. в расчетную модель одновременно включаются и швартовы, и якорные линии, циклические натяжения в которых рассматриваются при оценке усталостной долговечности.

[1] Настоящая статья составлена по результатам научно-исследовательской работы, выполненной по договору № 22-38047/102-31-22 от 05.03.2022 с ФАУ «Российский морской регистр судоходства».

1. Воздействия окружающей среды и реакции плавучего сооружения

1. Environmental actions and floating platform responses

Воздействия окружающей среды на плавучие сооружения можно разделить на три категории в зависимости от их диапазона частот:

- установившиеся воздействия ветра, течения и волнового дрейфа, которые являются постоянными по величине и направлению в рассматриваемом промежутке времени;
- низкочастотные циклические воздействия (медленный дрейф) с характерными периодами продолжительностью от 1 до 10 мин, которые обычно вызывают возбуждение динамических колебаний плавучих сооружений на частотах собственных колебаний при продольно-горизонтальной качке, поперечно-горизонтальной качке и рыскании. Для плавучих сооружений на натяжных связях с цилиндрическим корпусом типа SPAR указанные воздействия также могут вызывать возбуждение динамических колебаний на частоте собственных колебаний при килевой и бортовой качке;
- циклическое воздействие с частотой волн с характерными периодами от 3 до 30 с [3].

Колебания на частоте волн могут быть получены на основе данных испытаний с использованием модели регулярных волн, модели случайных волн или компьютерного анализа с использованием подходов во временной или частотной областях. Во многих случаях колебания на частоте волн считаются независимыми от жесткости системы позиционирования, за исключением плавучих систем с периодами собственных колебаний менее 30 с. Иногда жесткость системы позиционирования может существенно влиять на колебания с частотой волны. Одним из примеров может служить глубоководный буй типа CALM, где на колебания буя с частотой волны влияют жесткость, инерция и сопротивление якорных линий.

Низкочастотные колебания вызываются низкочастотным компонентом воздействия волн второго порядка, которые обычно довольно незначительны по сравнению с воздействием волн первого порядка. Из-за этого низкочастотное воздействие не играет существенной роли при перемещениях в вертикальной плоскости (т.е. бортовой качке, дифференте и вертикальной качке), когда присутствует сильное гидростатическое восстанавливающее воздействие.

Однако в горизонтальной плоскости перемещения, обусловленные низкочастотным воздействием, могут быть существенными. Это особенно проявляется при частотах, близких к собственной частоте колебаний удерживаемого плавучего сооружения. Поэтому в целом только низкочастотный продольный снос, боковой снос и рыскание включаются в анализ системы позиционирования.

Воздействие ветра может восприниматься как комбинация постоянного и меняющегося во времени компонентов. Последний компонент также может рассматриваться в качестве низкочастотного воздействия ветра. Аналогично низкочастотному воздействию волн второго порядка низкочастотное воздействие ветра вызывает резонансный продольный снос, боковой снос и рыскание.

Воздействия течений (установившееся или низкочастотное) на крупногабаритные плавучие сооружения определяются посредством модельных испытаний и (или) инструментария эмпирического анализа.

Для определения реакций плавучего сооружения применяют три основных подхода:

- подход в частотной области;
- подход во временной области;
- комбинированный подход в частотной и временной областях.

При анализе систем позиционирования в частотной области сначала определяют среднее положение сооружения на основе вычислений статического равновесия. Затем определяют реакции сооружения на волновые и низкочастотные колебания в виде продольно-горизонтальной качки, поперечно-горизонтальной качки и рыскания.

Если сооружение имеет относительно небольшую площадь ватерлинии, анализ системы позиционирования выполняется для перемещений в шести степенях свободы: продольно-горизонтальной качки, поперечно-горизонтальной качки, вертикальной качки, бортовой качки, килевой качки и рыскания.

Методы анализа во временной области могут быть использованы для одновременного моделирования средней реакции, низкочастотной реакции и реакции с частотой волнения объединенной системы, состоящей из плавучего сооружения и якорных линий.

2. Усталостный анализ

2. Fatigue analysis

В настоящей статье представлены стандартные процедуры усталостного анализа якорных и швартовных связей. Суммарное усталостное повреждение определяется на основе гипотезы линейного суммирования накопленных повреждений. В отношении основных компонентов якорных линий (цепей, стальных канатов и соединительных звеньев) вычисления могут основываться на размахах натяжения (*T-N* подходе) или на основе размахов напряжений (*S-N* подходе).

Динамический анализ во временной и (или) частотной областях используют для определения циклических размахов натяжений или напряжений. Квазистатический анализ применим только при условии полного подтверждения о достижении уровня надежности, сопоставимого с уровнем надежности динамического анализа во временной или частотной области. Данные модельных испытаний в бассейне также допустимо использовать вместо динамического анализа или в дополнение к нему, при условии, что эти данные полностью документально оформлены и пригодны для усталостного анализа.

3. Усталостная долговечность типа *T-N*

3. *T-N* type fatigue life

Усталостная долговечность стальных канатов, цепей, соединительных звеньев, а также других элементов системы позиционирования определяется с использованием кривых усталости *T-N*, где размах натяжения *T* (как правило, безразмерный) вычисляется путем деления на соответствующее эталонное разрывное усилие, а *N* соответствует допустимому количеству циклов. Кривые усталости *T-N* основываются на данных усталостных испытаний для компонентов системы позиционирования, а также регрессионном анализе. Кривые усталости в логарифмических координатах преобразуются в прямые линии.

Основные параметры кривых усталости *T-N* для некоторых стальных канатов, цепей, а также соединительных звеньев представлены в табл. 1. Эти данные используют для оценки усталостных условий нагружения типа «натяжение – натяжение» (*T-T*). Усталостные условия при наличии изгиба рассматриваются дополнительно в п. 4.

Типовая кривая усталости *T-N* выражается формулой (1):

$$NT^m = a_f. \quad (1)$$

где N – общее количество допустимых циклов натяжения T; T – отношение размаха натяжения (двойная амплитуда) к эталонному разрывному усилию элемента; m – обратный уклон кривой усталости *T-N*; a_f – параметр пересечения усталостной кривой оси абсцисс.

Таблица 1. Значения m и a_f для типовых кривых усталости *T-N* [3, 6, 7]
Table 1. Values of m and a_f for typical *T-N* fatigue curves [3, 6, 7]

Элемент	m	a_f
Общее звено с распоркой	3,00	1000
Общее звено без распорки	3,00	316
Соединительное звено Болдта и Кентера	3,00	178
Стальной канат шестипрядный/многопрядный (с защитным антикоррозионным покрытием)	4,09	$10^{(3,20–2,79Q^*)}$ = 231, если Q^* = 0,3
Стальной канат одинарной свивки (с защитным антикоррозионным покрытием)	5,05	$10^{(3,25–3,43Q^*)}$ = 166, если Q^* = 0,3

Q^* – отношение среднего натяжения к минимальному разрывному усилию стального каната.

Значения m и a_f приведены в табл. 1 для звеньев цепей, соединительных звеньев и компонентов стальных канатов.

Чтобы учесть допуск на коррозию и износ при определении эталонного разрывного усилия общих и соединительных звеньев якорных цепей, их калибр должен быть равен номинальному калибру минус половина допуска на коррозию и износ.

Как показано в табл. 1, усталостная долговечность стального каната зависит от величины среднего натяжения в канате, которая в системе позиционирования с провисающими якорными линиями обычно составляет 0,2–0,3 от минимального разрывного усилия.

На рис. 1 представлены усталостные кривые *T-N*, рассчитанные по формуле (1) при заданных параметрах m и a_f для цепи, соединительных звеньев, шестипрядных/многопрядных стальных канатов и канатов одинарной свивки. Две кривые для стальных канатов учитывают среднее натяжение, равное 0,3 от минимального разрывного усилия каната.

Усталостные данные по стальному канату основаны на испытаниях, в которых не учитывались эффекты коррозии. Поэтому кривые усталости *T-N* на рис. 1 соответствуют лишь стальным канатам с антикоррозионной защитой.

4. Усталость типа «изгиб – натяжение» (*B-T*)

4. Bending-tension (*B-T*) type fatigue

Комбинация «изгиб – натяжение» стальных канатов и цепей, как правило, происходит в таких местах, как направляющие блоки, отводные блоки, стопорные устройства, полуклюзы, ограничители изгиба, а также стабилизирующие грузы якорных линий и амортизирующие буи. Здесь усталостное нагружение типа «натяжение – натяжение» усиливается за счет наличия изгиба, а также возможных дополнительных эффектов, связанных с износом и коррозией.

При отсутствии необходимых данных для расчетной оценки усталостного повреждения вследствие изгиба – натяжения стальных канатов следует принимать, по крайней мере, конструктивное решение: отношение диаметра изгиба конструктивного элемента к диаметру стального каната должно быть

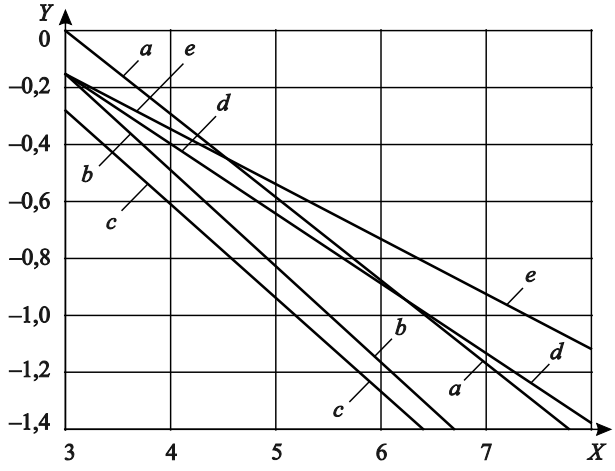

Рис. 1. Усталостные расчетные кривые для цепи, соединительного звена и стального каната: *X* – log10 (число циклов); *Y* – log10 (размах натяжения / эталонное разрывное усилие); *a* – цепь из общих звеньев с распорками; *b* – цепь из общих звеньев без распорок; *c* – соединительное звено Кентера; *d* – шестипрядный/многопрядный канат, средняя нагрузка, равная 0,3 минимального разрывного усилия каната; *e* – канат одинарной свивки, средняя нагрузка, равная 0,3 минимального разрывного усилия каната
Рис. 1. Calculated fatigue curves for chain, shackle and steel rope

достаточно большим, чтобы избежать чрезмерного изгиба каната.

Усталостный анализ стального каната и цепей должен адекватно учитывать дополнительную концентрацию напряжений в точках непосредственного контакта. Вероятность усталостного повреждения в таких местах может быть снижена за счет проведения регулярного осмотра и регулировки якорных и швартовных линий.

5. Применение *S-N* подхода

5. Implementation of *S-N* approach

S-N подход [5] может так же, как и *T-N* подход, применяться для оценки усталостной долговечности стальных канатов, цепей, соединительных звеньев и волоконных синтетических канатов. Размахи номинального напряжения *S* вычисляют путем деления соответствующего размаха натяжения на номинальную площадь поперечного сечения компонента.

Соотношение между размахом напряжения (двойной амплитудой) *S* и количеством допустимых циклов *N* соответствует формату аналогичного соотношения *T-N*, приведенному в формуле (1), т.е. формула для типовой кривой усталости *S-N* будет иметь аналогичный вид:

$$N \cdot S^m = a_f, \quad (2)$$

где N, m и a_f – параметры, аналогичные параметрам, приведенным в формуле (1).

Значения m и a_f для типовых кривых усталости *S-N* приведены в табл. 2 для звеньев цепей, соединительных звеньев и компонентов стальных канатов в морской воде.

В случае испытаний цепи в воздухе эффект морской воды должен учитываться за счет снижения усталостной долговечности с коэффициентом 2,0 для цепи с распоркой и с коэффициентом 5,0 для цепи без распорки.

6. Процедура вычисления усталостного повреждения

6. Fatigue damage calculation steps

Годовое усталостное повреждение компонентов якорных и швартовных связей определяется как сумма годового усталостного повреждения, возникающего в результате общего воздействия *n MDS* (mooring design state). Усталостное повреждение, накопленное за весь проектный срок эксплуатации, определяется как произведение годового усталостного повреждения на расчетное количество лет.

Каждое *MDS* включает:

- определенное состояние окружающей среды (волнение, ветер, течение), которое выбирается с целью привести к дискретной форме долговременные внешние воздействия окружающей среды, в которых находится система позиционирования;
- вероятность возникновения определенного состояния окружающей среды;
- среднее перемещение и изменение курса, отражающие влияние воздействий ветра, течения и волнения на плавучее сооружение;
- типовые условия загрузки плавучего сооружения.

Годовое усталостное повреждение рассчитывают по формуле:

$$D = \sum_{i=1}^{n} D_i, \quad (3)$$

где D – годовое усталостное повреждение компонента якорной или швартовной линии, год$^{-1}$; D_i – годовое усталостное повреждение, соответствующее расчетному состоянию MDS_i, год$^{-1}$.

Как правило, следует рассматривать от 8 до 12 направлений, представляющих распределение по направлениям долговременных внешних воздействий окружающей среды. Оценка чувствительности может использоваться для выявления количества состояний моря, необходимых для адекватного долговременного представления, обычно это

Таблица 2. Значения m и a_f для типовых кривых усталости *S-N*
Table. 2. Values of m and a_f for typical *S-N* fatigue curves

Элемент	m	a_f
Общее звено с распоркой	3,0	$1{,}2 \cdot 10^{11}$
Общее звено без распорки	3,0	$6{,}0 \cdot 10^{10}$
Стальной канат шестипрядный/многопрядный (с защитным антикоррозионным покрытием)	4,0	$3{,}4 \cdot 10^{14}$
Стальной канат одинарной свивки (с защитным антикоррозионным покрытием)	4,8	$1{,}7 \cdot 10^{17}$

от 10 до 50 состояний. Как правило, трех вариантов загрузки плавучего сооружения достаточно: полностью загруженное плавучее сооружение, полностью загруженное балластом плавучее сооружение и плавучее сооружение в долговременном среднем эксплуатационном состоянии. Годовое усталостное повреждение, накопленное в отдельном MDS_i, вычисляется по формуле

$$D_i = \left[\sum_k \frac{n_k}{N_k} \right]_i, \tag{4}$$

где k – числовой индекс, относящийся к определенному диапазону размахов натяжения и соответствующему количеству циклов; n_k – количество циклов безразмерного размаха натяжения T_k, возникающего в MDS_i, год$^{-1}$; N_k – общее количество допустимых циклов для безразмерного размаха натяжения T_k в соответствии с формулой (1).

Количество циклов размахов натяжения в год в каждом MDS_i может быть вычислено по формуле:

$$n_i = f_i X_i = F_i \cdot P_i \cdot C_1, \tag{5}$$

где f_i – средняя частота нулевого пересечения снизу вверх процесса натяжения в MDS_i, Гц; X_i – время, проведенное в MDS_i, в год, с; P_i – вероятность возникновения MDS_i; C_1 – среднее количество секунд в год = $3{,}15576 \times 10^7$ с.

При выполнении анализа в частотной области стандартное отклонение низкочастотного натяжения и стандартное отклонение натяжения с частотой волны вычисляют относительно среднего перемещения плавучего сооружения для каждого MDS_i. Применяется метод комбинированного спектра с поправочным коэффициентом, учитывающим данные двух полос частот, которые присутствуют в процессе натяжений.

Годовое усталостное повреждение для состояния MDS_i определяется по формуле:

$$D_i = \rho_i \frac{n_i}{a_f} (2\sqrt{2}\sigma_i)^m \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{2}\right), \tag{6}$$

где σ_i – отношение стандартного отклонения комбинированных вариаций низкочастотного натяжения и натяжения с частотой волны относительно среднего значения к эталонному разрывному усилию.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{W_i}^2 \sigma_{L_i}^2}, \tag{7}$$

где σ_{L_i} – отношение стандартного отклонения вариаций низкочастотного натяжения от среднего значения к эталонному разрывному усилию, σ_{W_i} – отношение стандартного отклонения вариаций натяжения с частотой волны от среднего значения к эталонному разрывному усилию; Г – гамма-функция; a_f и m определены для формулы (1); n_i – количество циклов натяжений в год в MDS_i, определяемое на основе формулы (5).

В (5) средняя частота нулевого пересечения снизу вверх определяется следующим уравнением:

$$f_{C_i} = \sqrt{\lambda_{W_i} f_{W_i}^2 + \lambda_{L_i} f_{L_i}^2}, \tag{8}$$

где f_{W_i} – средняя частота нулевого пересечения снизу вверх спектра натяжения с частотой волны в MDS_i, Гц, f_{L_i} – средняя частота нулевого пересечения снизу вверх низкочастотного спектра натяжения в MDS_i, Гц,

$$\lambda_{L_i} = \frac{\sigma_{L_i}^2}{\sigma_{L_i}^2 + \sigma_{W_i}^2},$$

$$\lambda_{W_i} = \frac{\sigma_{W_i}^2}{\sigma_{L_i}^2 + \sigma_{W_i}^2};$$

ρ_i – поправочный коэффициент, учитывающий данные двух полос частот, которые присутствуют в процессе натяжения.

При решении задачи во временной области усталостное повреждение вычисляют на основе временной зависимости натяжений с использованием метода расчета (например, «метода дождя» [3], применяемого для оценки величин натяжения и соответствующего количества циклов). Временную зависимость натяжения можно определить непосредственно путем анализа во временной области либо на основе комбинированного анализа в низкочастотном спектре и в спектре частоты волн. В целом этот метод считается наиболее достоверным для вычисления усталостного повреждения и должен использоваться в случаях, когда имеются временные зависимости комбинированного низкочастотного натяжения и натяжения с частотой волны в достаточном объеме.

7. Коэффициент безопасности усталостной долговечности

7. Fatigue life safety margin

Якорные и швартовные системы удержания плавучих шельфовых сооружений существенно отличаются от аналогичных систем, используемых для якорной стоянки судов [4].

Таблица 3. Сравнение значений коэффициента усталостной безопасности γ_F по различным источникам
Table 3. Comparison of fatigue life safety margin values γ_F given in different publications

Источник	Наименьшее значение[1]	Наибольшее значение[2]
ABS	3,0	10,0
DNV	3,0	8,0
ГОСТ(ISO)	3,0	–
Правила РМРС	3,0	10,0

Примечание: 1 – для инспектируемых районов; 2 – для неинспектируемых районов и критических зон.

Основными отличительными признаками являются:

- необходимость удержания плавучего сооружения над скважиной или подводным добычным комплексом при любых, даже самых суровых природных условиях, которые могут возникать в заданном районе эксплуатации;
- невозможность разгрузки наиболее напряженных якорных линий за счет работы гребных винтов;
- несравнимо большее время непрерывной работы якорных линий и сложность их замены в море;
- возможные аварийные последствия, связанные с гибелью людей и плавучего сооружения;
- загрязнение окружающей среды.

Отмеченное влияет на величины применяемых коэффициентов безопасности.

Общее накопленное усталостное повреждение должно соответствовать условию:

$$D_T \cdot \gamma_F \leq 1{,}0, \quad (9)$$

где D_T – общее накопленное повреждение от всех источников в течение срока службы системы позиционирования; $D_T = D \cdot T_d +$ любое усталостное повреждение от других источников; D – годовое усталостное повреждение, год$^{-1}$; T_d – расчетный срок службы, год; γ_F – коэффициент безопасности усталостной долговечности.

Минимальное значение γ_F должно быть не менее 3,0.

Коэффициент безопасности усталостной долговечности учитывает неопределенности в прогнозировании долговечности элементов якорных и швартовных линий, разброс данных по кривой *T-N*, аппроксимации теории линейного суммирования повреждений и эффект многочисленных компонентов системы позиционирования, которые подсоединены последовательно. Этот коэффициент согласуется с применением типовых кривых *T-N*, представленных в п. 4.

Рекомендуемые значения коэффициента усталостной безопасности:

- $\gamma_F = 3{,}0$ для инспектируемых районов;
- $\gamma_F = 10{,}0$ для неинспектируемых районов и критических зон.

Неинспектируемое означает, что изменения физического состояния компонента (нарушение геометрии, образование трещин и т.п.) не могут быть достоверно выявлены. Это может зависеть от места расположения компонента и возможностей инспекционного инструментария.

Критическая зона подразумевает, что разрушение компонента может незамедлительно привести к падению несущей способности системы удержания, например, в случае разрушения соединительного элемента якорной линии. Ниже приводится сопоставление значений коэффициента усталостной безопасности γ_F по различным нормативным источникам. Сопоставление значений коэффициента усталостной безопасности по различным нормативным источникам приведено в табл. 3.

Заключение
Conclusion

1. На основании проведенного анализа существующих требований Правил РМРС, иностранных классификационных обществ, а также применимых международных и национальных стандартов разработан проект «Методических рекомендаций по расчету усталостной долговечности якорных и швартовных связей плавучего шельфового сооружения».
2. Методические рекомендации включают такие вопросы, как виды внешних воздействий, выделение диапазонов на частоте волн и низкочастотных колебаний, использование усталостных кривых, алгоритм суммирования накопленного повреждения, определение коэффициентов усталостной безопасности.

3. Разработанные методические рекомендации применимы в программных комплексах, имеющих сертификат РМРС и позволяющих выполнять расчеты усталостной долговечности якорных и швартовных связей плавучих шельфовых сооружений.

Список использованной литературы

1. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ : НД № 2-020201-027. Ч. III : Устройства, оборудование и снабжение / Рос. морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023. 20 с.
2. Правила классификации и постройки морских плавучих нефтегазовых комплексов : НД № 2-020201-024. Ч. III : Устройства, оборудование и снабжение / Рос. морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2023. 35 с.
3. ГОСТ Р 58773-2019 (ИСО 19901-7:2013). Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Системы позиционирования плавучих сооружений. Москва : Стандартинформ, 2020. V, 151 с.
4. *Померанец Л.К., Шапошников В.М.* Нагрузки, определяющие циклическую прочность цепей якорных систем удержания ППБУ // Вопросы судостроения. Сер.: Проектирование судов. 1984. Вып. 40. С. 110–115.
5. DNV-OS-E301. Position Mooring. Høvik : Det Norske Veritas, 2021. 156 p. (DNV Offshore Standards).
6. Guide for position mooring systems / American Bureau of Shipping. Houston : ABS, 2020. IX, 82 p.
7. API RP 2SK. Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures / American Petroleum Institute. 3rd ed. Washington, 2015. IX, 241 p. (API Recommended practice 2SK).

References

1. RS Rules for the Classification and Construction of Fixed Offshore Platforms. Part III : Equipment, Arrangements and Outfit. Document Ref. No. 2-020201-027-E. Russian Maritime Register of Shipping, 2023, 20 p.
2. RS Rules for the Classification and Construction of Floating Oil-and-Gas Product Units. Part III: Equipment, Arrangements and Outfit. Document Ref. No. 2-020201-024-E. Russian Maritime Register of Shipping, 2023. 35 p.
3. Standard GOST R 58773-2019 (ISO 19901-7:2013). Petroleum and natural gas industries. Offshore Oil & Gas Production Platforms. Station-keeping systems for floating offshore structures. Moscow : Standartinform, 2020. V. 151 p. (*in Russian*).
4. *Pomeranets L.K., Shaposhnikov V.M.* Critical cyclic fatigue loads on mooring lines of semi-submersible drilling platforms // Shipbuilding Matters. Ship Design Series. 1984. Vol. 40. P. 110–115 (*in Russian*).
5. DNV-OS-E301. Position Mooring. Høvik : Det Norske Veritas, 2021. 156 p. (DNV Offshore Standards).
6. Guide for position mooring systems / American Bureau of Shipping. Houston : ABS, 2020. IX, 82 p.
7. API RP 2SK. Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures / American Petroleum Institute. 3rd ed. Washington, 2015. IX, 241 p. (API Recommended practice 2SK).

Сведения об авторах

Александров Анатолий Владимирович, к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-45-52. E-mail: a_aleksandrov@ksrc.ru.

Коваль Михаил Георгиевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-56. E-mail: 3otd@ksrc.ru.

Шапошников Валерий Михайлович, к.т.н., начальник отделения, ФГУП «Крыловский государственный научный центр. Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-10. E-mail: v_shaposhnikov@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0002-1159-8621.

About the authors

Anatoliy V. Aleksandrov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-45-52. E-mail: a_aleksandrov@ksrc.ru.

Коваль Михаил Георгиевич, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-56. E-mail: 3otd@ksrc.ru.

Valeriy M. Shaposhnikov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-10. E-mail: v_shaposhnikov@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0002-1159-8621.

Поступила / Received: 20.08.24
Принята в печать / Accepted: 15.11.24
© Александров А.В., Коваль М.Г., Шапошников В.М., 2024