



ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
СТАНДАРТ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ПНСТ
720—
2023

Нефтяная и газовая промышленность
СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ
Расчет усталостной прочности райзера.
Методические указания

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2023

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Газпром 335» (ООО «Газпром 335»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 023 «Нефтяная и газовая промышленность»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 сентября 2023 г. № 32-пнст

Правила применения настоящего стандарта и проведения его мониторинга установлены в ГОСТ Р 1.16—2011 (разделы 5 и 6).

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии собирает сведения о практическом применении настоящего стандарта. Данные сведения, а также замечания и предложения по содержанию стандарта можно направить не позднее чем за 4 мес до истечения срока его действия разработчику настоящего стандарта по адресу: inf@gazprom335.ru и/или в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии по адресу: 123112 Москва, Пресненская набережная, д. 10, стр. 2.

В случае отмены настоящего стандарта соответствующая информация будет опубликована в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты» и также будет размещена на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.rst.gov.ru)

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2023

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

II

Содержание

1 Область применения	1
2 Нормативные ссылки	1
3 Термины и определения	2
4 Обозначения и сокращения	3
5 Общие положения	6
5.1 Классы безопасности	6
5.2 Вероятность разрушения стальных райзеров	6
6 Расчет усталостной прочности райзера	6
6.1 Общая информация	6
6.2 Циклическое нагружение	7
6.3 Критические области райзерной системы	8
6.4 Глобальный расчет волны и перемещения платформы	8
6.5 Определение локальных напряжений	14
6.6 Усталостная прочность и кривые S—N	16
6.7 Оценка усталостного повреждения	20
7 Механика разрушения райзеров	20
8 Усталостное повреждение райзеров от вибраций, вызванных вихреобразованием	21
8.1 Расчет вибраций, вызванных вихреобразованием	21
8.2 Оценка усталостного повреждения от вибраций	22
8.3 Упрощенная оценка усталостного повреждения	23
8.4 Методы снижения вибраций	23
9 Комбинированное усталостное повреждение райзера	24
9.1 Общие сведения	24
9.2 Критерии соответствия	24
9.3 Комбинации повреждений с частотой волны и низкочастотных повреждений	24
9.4 Комбинации повреждений от вибраций	25
10 Коэффициенты запаса по усталости райзера	25
10.1 Общие сведения	25
10.2 Стандартные коэффициенты запаса	25
10.3 Коэффициенты запаса для временных райзеров	25
10.4 Стандартные коэффициенты запаса для гибких райзеров	25
10.5 Стандартные коэффициенты запаса для шлангокабелей	26
10.6 Повышенные коэффициенты запаса для стальных райзеров	26
10.7 Коэффициенты запаса на основе расчета надежности конструкции	32
10.8 Коэффициенты запаса вибраций, вызванных вихреобразованием	32
11 Увеличение усталостной долговечности стальных райзеров	33
11.1 Эксплуатационный контроль усталости стальных райзеров	33
11.2 Увеличенная усталостная долговечность	33
11.3 Повторная оценка остаточной усталостной долговечности	33
Приложение А (справочное) Оценка усталостного повреждения	35
Приложение Б (справочное) Определение расчетных кривых S—N	44
Приложение В (справочное) Упрощенный метод оценки повреждений	51
Библиография	54

Введение

Создание и развитие отечественных технологий и техники для освоения шельфовых нефтегазовых месторождений должно быть обеспечено современными стандартами, устанавливающими общие правила и положения для проектирования, строительства и эксплуатации систем подводной добычи. Для решения данной задачи Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии реализуется «Программа по обеспечению нормативной документацией создания отечественной системы подводной добычи для освоения морских нефтегазовых месторождений». В объеме работ программы предусмотрена разработка национальных стандартов и предварительных национальных стандартов, областью применения которых являются системы подводной добычи углеводородов.

Целью разработки настоящего стандарта является разработка методических указаний в части выполнения расчетов усталостной прочности райзера.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нефтяная и газовая промышленность

СИСТЕМЫ ПОДВОДНОЙ ДОБЫЧИ

Расчет усталостной прочности райзера.
Методические указания

Petroleum and natural gas industry. Subsea production systems. Riser fatigue calculation. Recommended practice

Срок действия — с 2023—09—30
по 2026—09—30

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает правила по расчету усталостной прочности райзеров, применяемых в системах подводной добычи углеводородов.

1.2 Настоящий стандарт распространяется на стальные райзеры, стальные элементы гибких райзеров и шлангокабелей.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 25.502 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость

ГОСТ 25.504 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости

ГОСТ 25.507 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования

ГОСТ 23207 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

ГОСТ Р 55311 Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Термины и определения

ГОСТ Р 57180 Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры

П р и м е ч а н и е — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

1

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 55311, ГОСТ 25.504, ГОСТ 25.502, ГОСТ 23207, ГОСТ Р 57180, ГОСТ 25.507, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 глобальный расчет: Расчет райзерной системы, при котором вычисляют распределения изгибающего момента и осевого усилия от действия функциональных нагрузок, движений плавучей установки и нагрузок от окружающей среды.

3.2 допуск на коррозию: Дополнительная толщина, добавляемая к толщине основного металла для компенсации его потери вследствие коррозии/эрозии/износа.

3.3 классы безопасности: Категории, принятые для классификации степени безопасности райзерных систем.

3.4 колебания плавучей установки с частотой волн: Колебания, вызванные прямым воздействием волн первого порядка на плавучую установку.

3.5 коэффициент запаса на основе анализа рисков: Коэффициент запаса по устойчивости, полученный на основе анализа определенного риска.

3.6 коэффициент запаса по усталости: Коэффициент запаса по усталостной долговечности, используемый в расчетах.

3.7 коэффициент концентрации напряжений: Отношение напряжения в критической области конструкции к локальному номинальному напряжению.

3.8 критическая область: Область в конструкции, где вследствие воздействия колебаний напряжений и геометрических особенностей (наличие сварного шва или надреза) может начинаться зарождение усталостной трещины.

3.9 механика разрушения: Раздел физики твердого тела, описывающий поведение и прочность компонентов (деталей) с трещинами.

3.10 нагрузки от воздействия окружающей среды: Нагрузки, обусловленные воздействием окружающей среды (волны, течение, ветер, лед и землетрясение и т. д.).

3.11 напряжение критической области: Величина напряжения конструкции на поверхности в критической области.

3.12 неразрушающий контроль: Испытания и контроль сварных соединений или основного материала неразрушающими методами (рентгенография, ультразвуковой контроль и пр.).

3.13 нормальная эксплуатация: Работа райзерной системы в условиях установившегося потока во всем диапазоне скоростей потока.

3.14 остаточный срок эксплуатации: Время, в течение которого компонент будет находиться в эксплуатации с настоящего момента.

3.15 отказ: Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

3.16 пакетный райзер: Райзерная система, состоящая из нескольких вертикальных райзеров (как правило, до 20 райзеров).

3.17 правило Пальмгрена—Майнера: Правило, при котором усталостное разрушение происходит тогда, когда линейное суммирование повреждений для различных циклов нагружения достигает единицы.

3.18 предшествующий срок эксплуатации: Время, в течение которого компонент находился в эксплуатации с момента его установки.

3.19 размах напряжений: Разница между максимальным напряжением и минимальным напряжением в цикле нагружения.

3.20 секция райзера: Участок трубы с коннекторами на каждом конце.

3.21 система натяжения райзера: Устройство, обеспечивающее натяжение райзерной колонны с целью компенсации относительного вертикального перемещения плавучей установки.

3.22 смещение плавучей установки: Общее смещение плавучей установки, учитывающее среднее значение смещения и колебания с частотой волн, а также низкочастотные колебания под действием ветра и волн.

3.23 среднее смещение плавучей установки: Смещение, вызванное постоянными силами от действия течения, ветра и волн.

3.24 срок эксплуатации: Промежуток времени, в течение которого предполагается эксплуатация компонента.

3.25 **сумма Майнера**: Суммирование индивидуальных степеней усталостной повреждаемости, вызываемых каждым циклом нагружения или блоком размаха напряжений, в соответствии с правилом Пальмгрена—Майнера.

3.26 **увеличенный срок эксплуатации**: Срок эксплуатации компонента, увеличенный относительно запланированного при проектировании первоначального срока эксплуатации.

3.27 **усталостная долговечность**: Количество циклов нагружения при конкретной амплитуде, требуемое для появления усталостного разрушения данного компонента.

3.28 **усталостная повреждаемость**: Отношение количества циклов приложения нагрузки и соответствующего количества циклов до разрушения при постоянной амплитуде напряжения.

3.29 **усталость**: Процесс накопления повреждений под действием переменных нагрузок.

3.30 **установка**: Операция, связанная с установкой райзерной системы (спуск, посадка и соединение).

3.31 **цикл нагружения**: Некоторая часть истории нагружения, содержащая максимальное и минимальное значения напряжений.

3.32 **кривая S—N**: Графическое представление зависимости количества циклов до разрушения от размаха напряжений.

4 Обозначения и сокращения

4.1 В настоящем стандарте использованы следующие сокращения:

КЭ — конечный элемент/конечно-элементный;
 МКЭ — метод конечных элементов;
 ПО — программное обеспечение;
 CF — поперечный поток;
 DFF — коэффициент запаса по усталости;
 IL — продольный поток;
 SCF — коэффициент концентрации напряжений;
 CFD — вычислительная гидродинамика.

4.2 В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

H_s — значительная высота волны, м;
 T_p — период пика спектра волнения, с;
 H — высота волны, м;
 T — период волны, с;
 P_i — вероятность наступления состояния моря;
 t — толщина стенки трубы, мм;
 t_{fat} — толщина стенки трубы, используемая в усталостных расчетах, мм;
 t_{nom} — номинальная толщина стенки трубы, мм;
 t_{corr} — допуск на коррозию, мм;
 t_{ref} — нормативное значение толщины стенки трубы, мм;
 $\left(\frac{t_{fat}}{t_{ref}}\right)^k$ — поправочный коэффициент на толщину стенки трубы;
 D — наружный диаметр стального райзера, мм/усталостное повреждение;
 T_e — эффективное натяжение, Н;
 M_y — изгибающий момент относительно локальной оси координат y , Н · мм;
 M_z — изгибающий момент относительно локальной оси координат z , Н · мм;
 I — момент инерции сечения, мм⁴;
 $N(S)$ — количество циклов нагружения до отказа с постоянным размахом напряжений S ;

$\bar{a}, \bar{a}_1, \bar{a}_2$	— параметры, характеризующие пересечение кривой S—N с осью $\log N$;
m, m_1, m_2	— параметры, характеризующие угол наклона кривой S—N;
S	— размах напряжений в критической области, МПа;
S_0	— номинальный размах напряжений, МПа;
k	— показатель толщины;
S_{sw}	— значение напряжений в точке пересечения участков билинейной кривой S—N, МПа;
N_{sw}	— количество циклов, при котором изменяется наклон кривой S—N;
D_{fat}	— накопленное усталостное повреждение;
L_{fat}	— усталостная долговечность, год;
L_{serv}	— время работы компонента/узла (срок службы), год;
D_{an}	— накопленное усталостное повреждение за один год (долговременное);
D_i	— кратковременное усталостное повреждение в критической области/внутренний диаметр, мм;
$n(S)$	— количество циклов нагружения с размахом напряжений S в критической области;
N_s	— количество дискретных состояний моря/волн, описываемых диаграммой рассеивания;
D_{VIV}	— накопленное усталостное повреждение вследствие вибраций, вызванных вихреобразованием;
DDF_{VIV}	— коэффициент запаса по усталости для вибраций, вызванных вихреобразованием;
D_{VIV-ST}	— накопленное усталостное повреждение вследствие вибраций за время экстремального кратковременного события;
DDF_{VIV-ST}	— коэффициент запаса по усталости для вибраций экстремального кратковременного события;
f_v	— средняя частота циклов напряжений, Гц;
$f_s(S)$	— плотность распределения вероятности циклов напряжений;
X_D	— нормализованный усталостный коэффициент использования;
$D_S(X)$	— случайное усталостное повреждение;
$D(\mu_X)$	— основное усталостное повреждение с заданными параметрами, используемыми при усталостном расчете конструкции;
X_{mod}	— неопределенность модели;
X_i	— случайные переменные, которые вносят неопределенность при оценке усталостного повреждения;
I_{fact}	— фактор относительной значимости для случайной переменной;
T_{des}	— расчетный срок эксплуатации, год;
T_{ext}	— увеличенный срок эксплуатации, год;
T_{pr}	— предшествующий срок эксплуатации, год;
T_{res}	— остаточный срок эксплуатации, год;
D_{pr}	— вычисленное усталостное повреждение за год в течение предшествующего периода эксплуатации;
D_{res}	— вычисленное усталостное повреждение за год в течение остаточного периода эксплуатации;
S_a	— максимальные локальные напряжения, МПа;
f_0	— частота пересечения нулевого значения отклика напряжений, Гц;
S_1	— характерный размах напряжений для высокочастотного отклика, МПа;

S_2	— характерный размах напряжений для низкочастотного отклика, МПа;
n_1	— количество циклов для высокочастотного отклика;
n_2	— количество циклов для низкочастотного отклика;
D_1	— расчетное усталостное повреждение для высокочастотного отклика;
D_2	— расчетное усталостное повреждение для низкочастотного отклика;
U_{eff}	— эффективная скорость потока, м/с;
L_{exc}	— длина возбуждения, м;
f_s	— частота вихревого потока, Гц;
D_h	— гидродинамический наружный диаметр, м;
$S_{t,eff}$	— эффективное число Струхала для осциллирующих цилиндров;
f^{CF}	— частота поперечного вихревого потока, Гц;
f^{IL}	— частота продольного вихревого потока, Гц;
$\left(\frac{A}{D_h}\right)_{rms}^{CF}$	— среднеквадратическое значение амплитуды отклика поперечного потока, отнесенное к гидродинамическому диаметру;
$\left(\frac{A}{D_h}\right)_{rms}^{IL}$	— среднеквадратическое значение амплитуды отклика продольного потока, отнесенное к гидродинамическому диаметру;
$a_{i,rms}^{CF}$	— среднеквадратическая амплитуда i -й моды поперечного потока, м;
$a_{i,rms}^{IL}$	— среднеквадратическая амплитуда i -й моды продольного потока, м;
E	— модуль упругости, МПа;
D_s	— наружный диаметр трубы, мм;
y, z	— оси локальной системы координат сечения трубы;
m_n	— спектральный момент порядка n ;
σ	— номинальные напряжения, МПа/среднеквадратическое отклонение;
σ_a	— осевые напряжения, МПа;
$\sigma_M(\theta)$	— осевые напряжения, вызванные действием изгибающего момента и зависящие от угловой координаты, МПа;
θ	— угловая координата в полярной системе координат сечения трубы, °;
k_y	— кривизна относительно локальной оси координат y , 1/мм;
k_z	— кривизна относительно локальной оси координат z , 1/мм;
k_{eff}	— эффективная кривизна, 1/мм;
k_i	— кривизна i -й формы, 1/мм;
α	— поправочный коэффициент отклонения;
γ	— коэффициент запаса по усталости;
γ_{SC}	— коэффициент класса безопасности;
σ_{X_D}	— неопределенность в усталостном повреждении;
σ_{X_a}	— неопределенность в нормализованной усталостной постоянной (в логарифмических координатах);
Δ	— параметр полосы частот;
σ_S	— среднеквадратическое отклонение напряжений, МПа.

5 Общие положения

5.1 Классы безопасности

5.1.1 В конструкции райзера следует учитывать последствия возможных разрушений, которые характеризуются классами безопасности.

5.1.2 Описание классов безопасности стальных райзеров (см. [1]) приведено в таблице 1.

Т а б л и ц а 1 — Классы безопасности стальных райзеров

Класс безопасности	Определение
Низкий	Разрушение влечет незначительный риск получения травмы человека и незначительные экологические и экономические последствия
Средний	Разрушение влечет низкий риск получения травмы человека, незначительное загрязнение окружающей среды или высокие экономические последствия
Высокий	Разрушение влечет риск получения травмы человека, значительное загрязнение окружающей среды или предельно высокие экономические последствия

5.1.3 Приведенные классы безопасности не распространяются на гибкие райзеры и шлангокабели.

5.2 Вероятность разрушения стальных райзеров

5.2.1 Допустимые значения вероятностей разрушения стальных райзеров (за год) в зависимости от классов безопасности приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2 — Вероятность разрушения стальных райзеров

Класс безопасности	Допустимая вероятность разрушения
Низкий	10^{-3}
Средний	10^{-4}
Высокий	10^{-5}

5.2.2 Вероятность разрушения, полученная в результате расчетов, является номинальной величиной.

5.2.3 Проектная вероятность разрушения (за год) — вероятность разрушения в течение года при постоянных условиях и для фактического периода эксплуатации.

6 Расчет усталостной прочности райзера

6.1 Общая информация

6.1.1 Усталостное разрушение условно включает в себя две фазы: зарождение усталостной трещины и ее распространение.

6.1.2 Для тех компонентов, в которых отсутствуют сварные швы (бесшовные трубы, например), фаза зарождения усталостной трещины является основной. Данный период зарождения трещины может составлять до 95 % от усталостной долговечности компонента.

6.1.3 Для сварных соединений, в которых присутствует неоднородность материала, основной является фаза распространения трещины.

6.1.4 Общая усталостная характеристика компонента зависит от преобладающей фазы. В общем случае усталостная прочность для тех компонентов, в которых отсутствуют сварные швы, возрастает при увеличении предела прочности материала на разрыв. Усталостная прочность для сварных соединений практически не зависит от предела прочности материала на разрыв.

6.1.5 Методические указания настоящего стандарта основаны на оценке усталости с использованием кривых S—N материалов. В случае необходимости учета дефектов и распространения трещин при оценке усталости допускается использовать методы механики разрушения.

6.1.6 Типовая последовательность оценки усталости райзера с использованием кривых S—N приведена в таблице 3.

Т а б л и ц а 3 — Последовательность оценки усталости райзеров

Этап	Комментарий
1 Определение циклической нагрузки	Необходимо учитывать все эффекты, вызывающие циклические нагрузки с учетом эксплуатационных ограничений: низкочастотные колебания усилий, нагрузки от колебаний с частотой волны и эффекты, вызванные вибрациями от вихреобразований
2 Определение областей для оценки усталости	Определение критических областей и компонентов в райзерной системе: геометрические неоднородности, соединения (сварные, болтовые), отремонтированные зоны и пр.
3 Глобальный расчет усталости райзера	Расчет воздействия циклических нагрузок для определения временных откликов райзерной системы (эффективного осевого усилия, изгибающего момента и кривизны), в том числе в критических областях
4 Определение локальных напряжений	Расчет величины напряжений в различных компонентах на основании глобального отклика. Определение коэффициентов концентрации напряжений на основании параметрических уравнений или выполнение детального КЭ расчета
5 Определение усталостной прочности	Построение кривой S—N, которая зависит от окружающей среды, детали компонента, процесса изготовления и толщины
6 Определение усталостного повреждения	Расчет кратковременного усталостного повреждения на основе полученных напряжений (пункт 4) и усталостной кривой (пункт 5). Определение долговременного усталостного повреждения приведено в 6.7 и 8.2. Коэффициенты запаса по усталости приведены в разделе 6
7 Случай недостаточной усталостной долговечности	Требуется усовершенствовать подход к оценке усталостной долговечности: - уточнить расчет напряжений; - применить методы механики разрушения; - изменить геометрию деталей; - обосновать выбор менее консервативной кривой S—N; - выполнить шлифовку сварных соединений; - повысить качество контроля; - предусмотреть устройства для подавления вибраций, вызванных вихреобразованием

6.2 Циклическое нагружение

6.2.1 При расчете усталости райзера следует учитывать все циклические нагрузки:

- волновые эффекты первого порядка (прямые волновые нагрузки и соответствующие перемещения плавучей установки);
- перемещения плавучей установки от действия волновых нагрузок второго порядка;
- вибрации, вызванные вихреобразованием;
- циклы напряжений, вызванные температурой и давлением;
- движения корпуса плавучей установки, вызванные вихреобразованием, для платформ с подводным основанием цилиндрического типа (spar) и других глубоководных плавучих установок;
- влияние пробкового режима течения многофазного флюида внутри райзера;
- производственные и монтажные нагрузки.

6.2.2 Следует проводить оценку как многоциклового, так и малоциклового усталости. Многоцикловая усталость имеет место при количестве циклов нагружения более 10 000 в течение срока эксплуатации райзера и возникает преимущественно от действия волновых нагрузок и течений. Малоцикловая усталость учитывает отклики с высокими значениями напряжений. Пример малоциклового нагружения для стального райзера — его намотка.

6.2.3 При оценке усталости требуется рассматривать следующие режимы работы райзера:

- установка;
- все режимы работы, включая соединение, спуск и подвешивание.

6.3 Критические области райзерной системы

6.3.1 Усталостная долговечность должна быть определена для всех частей райзерной системы.

6.3.2 Примеры критических областей райзерной системы:

- участки, близкие к верхнему/нижнему окончанию верхнего натяжного райзера, которые испытывают значительные изменения изгибных напряжений. Для данных участков необходимо корректно учитывать граничные условия и жесткостные характеристики;

- зона заплеска волн, являющаяся критической областью для верхнего натяжного райзера вследствие циклов изгибных напряжений, вызванных частотным воздействием волн. Корректное описание волновой нагрузки — это значимый критерий при оценке усталостного повреждения. Дополнительно следует учитывать отклонения кинематики волн, вызванные наличием плавучей установки. Рекомендуется проводить расчеты во временной области, а также выполнять оценку чувствительности модели к сетке и кинематике волн;

- зона касания морского дна, являющаяся критической областью для стальных провисающих райзеров. Корректное описание модели грунтов, правильный выбор размеров конечных элементов и средняя позиция плавучей установки — существенные аспекты при оценке усталостного повреждения. Рекомендуется проводить расчеты во временной области, а также выполнять оценку чувствительности модели к сетке и свойствам грунта;

- области вблизи вспомогательных компонентов, которые следует рассматривать для стыкуемых конфигураций райзеров;

- критические области для платформ с подводным основанием цилиндрического типа, которые, как правило, близки к опорам райзера в области корпуса;

- конструкции, которые защищают гибкие райзеры и шлангокабели от перегиба, а также являются критическими при оценке усталостного повреждения.

6.3.3 Дополнительно необходимо оценивать все области с геометрическими неоднородностями:

- резьбовые муфты, которые служат для соединения секций райзера. Критические области расположены на переходе между трубой и муфтой;

- резьбовые соединения;

- фланцевые соединения на болтах. Критические области расположены в сварном шве фланца и трубы;

- для стальных провисающих райзеров, изготавливаемых посредством сварки секций, критическими областями являются сварные швы.

6.3.4 Для гибких райзеров критической областью является армирующая проволока.

6.3.5 Для шлангокабелей критическими областями являются армирующая проволока, гидравлические стальные трубки, медные жилы электрических кабелей.

6.4 Глобальный расчет волны и перемещения платформы

6.4.1 Общие сведения

6.4.1.1 Основные рекомендации к выбору метода глобального расчета и используемым моделям приведены в [1]; методы определения нагрузок от внешней окружающей среды — в [2].

6.4.1.2 Райзеры и шлангокабели имеют нелинейный отклик на динамическое нагружение, вызванное волнами и перемещениями платформы. Для стальных райзеров при выполнении расчетов необходимо корректно учитывать следующие особенности:

- гидродинамические нагрузки, описываемые уравнением Морисона;
- геометрическую жесткость, определяемую эффективным натяжением;
- контакт с морским дном.

6.4.1.3 Для шлангокабелей необходимо дополнительно учитывать нелинейные свойства в поперечном направлении, характеризующиеся возможным заклиниванием или проскальзыванием спиральных элементов при их изгибе.

6.4.1.4 Методические указания настоящего стандарта распространены на все типы райзеров — постоянные и временные. Постоянные райзеры используют для непрерывной эксплуатации (например,

для добычи); временные райзеры — для коротких операций (например, бурение, заканчивание или капитальный ремонт).

6.4.1.5 Отклик райзера на циклические нагрузки может быть вызван:

- прямыми волновыми нагрузками на райзер;
- колебаниями плавучей установки с частотой волны;
- низкочастотными колебаниями плавучей установки.

6.4.1.6 Усталостную повреждаемость в общем случае определяют по количеству циклов напряжений с высокой частотой волны и по количеству циклов напряжений с низкой частотой волны. Наибольший вклад в усталостную повреждаемость, как правило, вносят циклы напряжений с высокой частотой волны, однако для некоторых райзерных систем ключевыми могут быть циклы напряжений с низкой частотой.

6.4.1.7 Для каждого кратковременного состояния моря или волны должны быть указаны параметры ветра, течения или смещения платформы/судна. В качестве результатов глобального расчета выступают или эффективное осевое усилие и изгибающие моменты (относительно двух локальных осей), или эффективное осевое усилие и кривизна (относительно двух локальных осей). Данные величины используют в последующих усталостных расчетах.

6.4.2 Методы расчета

6.4.2.1 Список широко используемых методов глобального расчета кратковременных усталостных повреждений приведен в таблице 4.

Т а б л и ц а 4 — Обзор глобальных динамических КЭ методов расчета

Метод	Нелинейности		
	в нагрузках от окружающей среды	в дополнительных нагрузках	в конструкциях
Нелинейная временная область	Нагрузки, описываемые уравнением Морисона. Учет фактической высоты поверхности	Пробковый режим течения флюида. Взаимодействие с другими гибкими структурами	Геометрическая жесткость. Нелинейный материал. Контакт с морским дном
Линеаризованная временная область	—	—	Линеаризуют в положении статического равновесия
Частотная область	Линеаризуют в положении статического равновесия (в случае нерегулярных возбуждений проводится стохастическая линеаризация)	—	Линеаризуют в положении статического равновесия

6.4.2.2 Использование линеаризованных методов расчета (во временной или частотной областях) должно быть проверено нелинейным расчетом во временной области в случае критических нагрузок.

6.4.2.3 Расчет усталости, как правило, выполняют для вычисления номинальных параметров поперечного сечения труб.

6.4.2.4 Отдельно следует выполнять расчет чувствительности модели к входным параметрам: плотность флюида, появление на поверхности морских организмов, смещение судна, осадка судна, свойства грунта, эффективность модулей плавучести, гидродинамические коэффициенты, наличие/отсутствие течения.

6.4.3 Долговременные волновые нагрузки

6.4.3.1 Долговременные волновые нагрузки описывают, как правило, вероятностным распределением кратковременных стационарных состояний моря с заданной продолжительностью, которая составляет 3 ч, если не указано иное. Каждое состояние моря представляют моделью спектра волн, которая характеризуется значительной высотой волны H_s и периодом пика спектра волнения T_p . Таким образом, долговременный волновой режим может быть представлен совместным вероятностным распределением H_s и T_p .

6.4.3.2 Долговременные волновые нагрузки, как правило, приводят в виде диаграмм рассеивания, которые представляют собой таблицы вероятностного распределения H_s и T_p :

- нерегулярные диаграммы рассеивания с совместной вероятностью возникновения H_s и T_p ;
- регулярные диаграммы рассеивания с совместной вероятностью возникновения индивидуального значения высоты волны H и периода волны T .

6.4.3.3 Направления волн и сезонные колебания волн также могут быть приведены в виде диаграмм рассеивания:

- регулярные/нерегулярные диаграммы рассеивания направлений волн;
- регулярные/нерегулярные диаграммы рассеивания волновых данных по сезонам.

6.4.4 Блоки диаграммы рассеивания

6.4.4.1 Оценка усталостной прочности райзера основана на глобальном расчете воздействия нагрузок, которые возникают в различных комбинациях H_s и T_p (или H и T). Для определения долговременных усталостных повреждений в общем случае потребуется проведение большого количества динамических расчетов во временной области.

6.4.4.2 Для удобства выполнения расчетов принято разделять диаграмму рассеивания волновых данных на блоки, охватывающие несколько состояний моря. Усталостные повреждения для всех состояний моря, охваченных одним блоком, основаны на одном динамическом расчете во временной области.

6.4.4.3 Достоверность полученных долговременных усталостных повреждений зависит от длительности моделирования в каждом блоке и от непосредственного разделения диаграммы рассеивания на блоки. Рекомендуется придерживаться следующего алгоритма:

- длительности моделирования в каждом блоке, равной 1 ч, достаточно для указанных райзерных систем и окружающей среды. Более длительное моделирование может потребоваться в случае бимодального состояния моря (с первичным и вторичным волнением, например);
- вклад в долговременное усталостное повреждение от одного блока не должен превышать от 5 % до 10 % для критических областей;
- генерируемые временные волновые зависимости для различных блоков должны быть статистически независимыми.

6.4.4.4 Вышеуказанный алгоритм учитывает вклад от 10 до 20 блоков при оценке усталостного повреждения.

6.4.4.5 Для более точного учета вкладов от разных блоков рекомендуется провести следующую процедуру:

- а) выполнить расчет усталостной прочности для начального разделения на блоки, покрывающие всю диаграмму рассеивания. Начальное разделение на блоки может быть приблизительным;
- б) определить относительные вклады каждого блока в критических областях;
- в) в случае превышения относительного вклада блока на 5 %—10 % требуется разделить данный блок.

6.4.4.6 Шаги по перечислениям б) и в) допускается повторять до тех пор, пока не будет достигнуто равномерное распределение усталостных повреждений для рассматриваемых блоков. Пример разделения на блоки приведен на рисунках 1 и 2.

6.4.4.7 В случае необходимости использования и разделения на блоки диаграммы H — T допускается использовать аналогичный алгоритм.

6.4.4.8 При определении характерных состояний моря для каждого блока необходимо учитывать следующее:

- вероятность появления блока является суммой вероятностей возникновения всех состояний моря в данном блоке;
- H_s следует принимать наибольшей в пределах блока;
- T_p следует определять как взвешенное среднее значение состояний моря внутри блока. В случае блоков с высокой чувствительностью к периоду T_p следует принимать наибольшим (например, период резонанса райзерной системы). Однако наличие чувствительности к периоду является подтверждением того, что блок достаточно большой и рекомендуется его уменьшать.

Значительная высота волны H_s , м	Период пика спектра волнения T_p , с																			
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	> 20	
0-1	1		2			3			4			5			6					
1-2																				
2-3																				
3-4	7		8			9			10			11								
4-5																				
5-6																				
6-7	12		13			14			15											
7-8																				
8-9																				
9-10	16		17			18														
10-11																				
11-12																				
12-13	19		20																	
13-14																				
14-15																				
15-16	21																			

Рисунок 1 — Пример начального разделения на блоки

Значительная высота волны H_s , м	Период пика спектра волнения T_D , с																			
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	> 20	
0-1	1			40	41	42	49	50	51	4			5			6				
1-2				43	44	45	52	53	54											
2-3				46	47	48	55	56	57											
3-4	1			7			22	23	24	31	32	33	10			11				
4-5							25	26	27	34	35	36								
5-6							28	29	30	37	38	39								
6-7	1			7			12			58	59	60	14			15				
7-8										61	62	63								
8-9										64	65	66								
9-10	1			7			12			16			17			18				
10-11																				
11-12																				
12-13	1			7			12			16			19			20				
13-14																				
14-15																				
15-16	1			7			12			16			19			21				

Рисунок 2 — Пример конечного разделения на блоки

6.4.4.9 Взвешенное среднее значение T_p может быть определено по формуле

$$T_p = \frac{\left[\sum_k \left(T_{p,k} \cdot \sum_j P_{j,k} \right) \right]}{\left[\sum_j \sum_k P_{j,k} \right]}, \tag{1}$$

где T_p — взвешенное среднее значение периода для блока, охватывающее k диапазонов периода T_p и j диапазонов значительной высоты волны H_s , с;
 $T_{p,k}$ — значение периода T_p для диапазона k , с;
 $P_{j,k}$ — вероятность возникновения комбинации $T_{p,k}$ и $H_{s,j}$.

6.4.4.10 Пример диапазонов периода и значительной высоты волны для одного блока приведен на рисунке 3.

6.4.4.11 Для временных райзеров операции, как правило, длятся ограниченное время. В связи с этим допускается консервативно выбирать диаграммы рассеивания. Например, работы в Северном море проводят в летние месяцы, а диаграмму рассеивания допускается выбрать годовую.

Значительная высота волны H_S , м	Период пика спектра волнения T_p , с																			
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	> 20	
0-1																				
1-2																				
2-3																				
3-4																				
4-5																				
5-6																				
6-7																				
7-8																				
8-9																				
9-10																				
10-11																				
11-12																				
12-13																				
13-14																				
14-15																				
15-16																				

Рисунок 3 — Пример диапазонов периода и значительной высоты волны для одного блока

6.4.4.12 Если работы проводят в другие сезоны, то целесообразно использовать сезонные диаграммы рассеивания, т. к. применение годовой диаграммы в данном случае может быть неконсервативным.

6.4.4.13 Для временных райзеров существуют эксплуатационные критерии, которые могут накладывать дополнительные ограничения на допустимую высоту волны и волновой период. Данные ограничения необходимо учитывать.

6.4.5 Перемещения плавучей установки при усталостном расчете райзера

6.4.5.1 Для учета перемещений плавучей установки в глобальном анализе применяют следующие методы:

- перемещения, заданные посредством оператора амплитуды отклика, которые являются результатом гидродинамического расчета плавучей установки;
- вынужденные перемещения, которые являются результатом анализа позиционирования плавучей установки во временной области.

6.4.5.2 Учет перемещений первым методом позволяет оценивать усталостные повреждения на высокой частоте волн (см. также [3]).

6.4.5.3 Если в расчете райзерной системы используют вынужденные перемещения плавучей установки, то прямая волновая нагрузка в данном расчете должна соответствовать нагрузке, используемой в анализе позиционирования плавучей установки.

6.4.5.4 Функцию преобразования перемещений плавучей установки (оператор амплитуды отклика) определяют в терминах амплитуды и фазового угла как функцию некоторого количества дискретных частот и направлений волны. С целью корректного описания перемещений плавучей установки дискретные частоты и направления волн должны быть выбраны корректно:

- частоты определяют исходя из условий перекрытия резонансных пиков в функциях преобразования перемещений плавучей установки;
- возможные частоты гашения должны быть определены и представлены в дискретном виде;
- частотный диапазон должен охватывать соответствующие частоты при волновом возбуждении;
- дискретизация направления волны с интервалом в диапазоне от 15° до 30° достаточно точно описывает перемещение плавучей установки.

6.4.6 Время моделирования и число волновых компонентов

6.4.6.1 Входные данные для глобального расчета представляют собой спектр волн, описываемый параметрами H_s и T_p . Случайный волновой сигнал представляет собой сумму регулярных волн (компонентов волны) с высотой H , периодом T и фазовым углом.

6.4.6.2 Для описания случайных волновых сигналов при большом количестве компонентов волны может быть использовано преобразование Фурье. В этом случае количество частотных компонентов определяют количеством шагов по времени.

6.4.6.3 Различное ПО, используемое для глобальных расчетов райзерных систем, позволяет проводить дискретизацию спектра волн в выбранное количество волновых компонентов. Если не указано иное, обычно рассматривают от 100 до 200 частот.

6.4.6.4 Для заданных значений H_s и T_p волновой сигнал будет изменяться, поскольку фазовый угол для каждой компоненты выбирают случайно. Начальное значение генератора случайных чисел, используемого в ПО для глобальных расчетов райзерных систем, должно быть задано пользователем. Начальное значение принято обозначать ячейкой. Рекомендуется проводить одно моделирование для одного состояния моря (одной ячейки). Для уменьшения неопределенностей в расчете усталостных повреждений рекомендуется выбирать различные ячейки для различных состояний моря.

6.4.6.5 Для примера на рисунке 4 приведены вариации усталостного повреждения в зависимости от времени моделирования для 30 различных ячеек и одного состояния моря. На рисунке 5 приведен соответствующий график коэффициента вариации (неопределенности) в оценке усталостного повреждения из 30 ячеек в зависимости от времени моделирования.

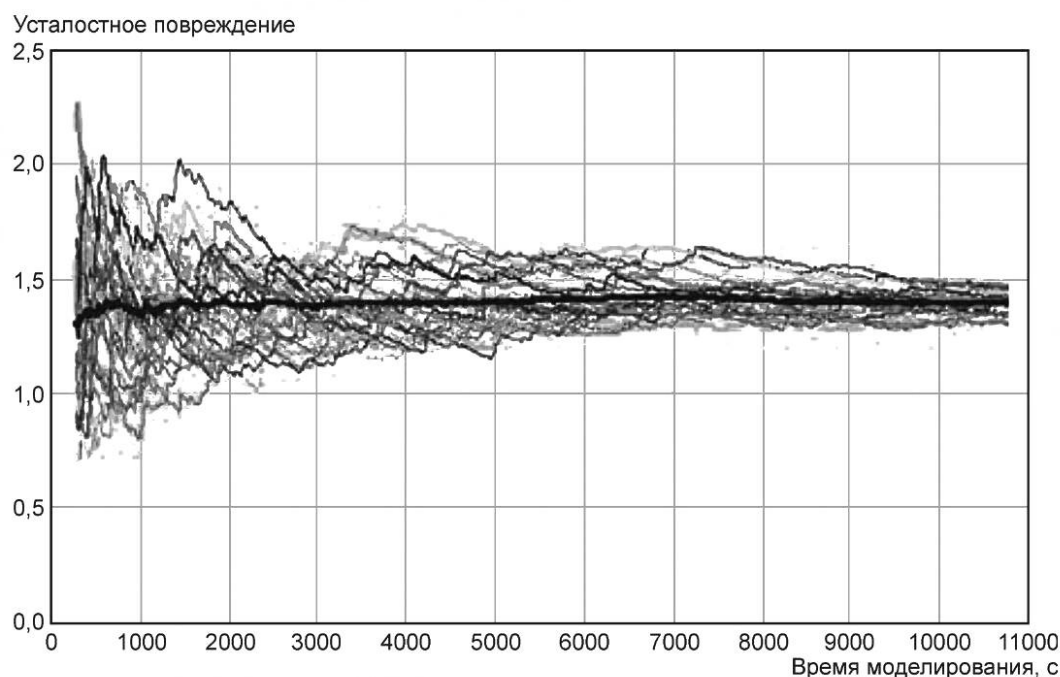


Рисунок 4 — Пример вариаций усталостных повреждений

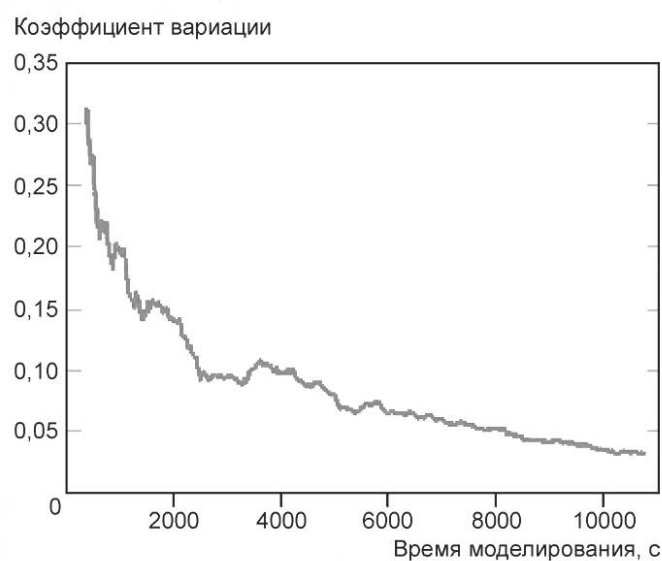


Рисунок 5 — Коэффициент вариации

6.4.6.6 Из рисунков 4 и 5 видно, что вариация оценки усталостного повреждения при длительности моделирования менее 3000 с является недопустимо высокой для различных случаев моделирова-

ния. Для обеспечения статистической неопределенности менее 10 % каждый расчетный случай должен иметь длительность не менее 1 ч (3600 с).

6.4.6.7 Как правило, диаграммы рассеивания волновых данных основаны на трехчасовых состояниях моря. В связи с этим оценку усталостной прочности следует проводить на основании трехчасового расчета. Однако для полностью определенных райзерных систем и условий окружающей среды допускается выполнять моделирование в течение 1 ч.

6.4.6.8 Отдельно рекомендуется проводить сходимость относительно времени моделирования.

6.4.7 Верификация моделей глобального расчета и методы анализа

6.4.7.1 Основные рекомендации по верификации численных моделей глобального расчета приведены в [1].

6.4.7.2 В общем случае должны быть проверены следующие особенности:

- использование упрощенных методов расчета должно быть верифицировано путем сравнения результатов, полученных на более точных и углубленных методах;
- для проверки моделирования и входных параметров рекомендуется проведение аналитических оценок;
- рекомендуется проводить:
 - верификацию входных данных функции преобразования перемещений плавучей установки в различном ПО,
 - оценку чувствительности моделей к влиянию неопределенных и изменяющихся параметров системы,
 - оценку сходимости решения путем уточнения пространственной дискретизации (сеточная сходимость),
 - оценку сходимости решения путем уточнения частотной дискретизации в частотной области,
 - оценку сходимости решения путем уточнения временной дискретизации во временной области (сходимость по шагу расчета),
 - проверку количества гармонических компонентов, описывающих перемещения плавучей установки и кинематику волн, а также оценку периода повторений генерируемых временных зависимостей.

6.5 Определение локальных напряжений

6.5.1 Напряжения в стальной трубе

6.5.1.1 При расчете усталостных повреждений в райзере следует учитывать циклические напряжения. Для основного материала используют размахи напряжений, которые определяют, как правило, на основании эквивалентных напряжений по Мизесу (см. также [4]).

6.5.1.2 Изменение толщины стенки трубы в течение срока эксплуатации райзерной системы следует учитывать в расчетах долговременных усталостных повреждений. Среднее характерное значение толщины стенки трубы t_{fat} может быть использовано при определении номинального напряжения. Характерное значение толщины стенки трубы t_{fat} , мм, при постоянном значении коррозионного допуска можно определять по формуле

$$t_{fat} = t_{nom} - 0,5 \cdot t_{corr} \quad (2)$$

где t_{nom} — номинальная толщина стенки трубы, мм;

t_{corr} — допуск на коррозию (либо износ материала), мм.

6.5.1.3 В общем случае износ не является однородным в райзерной системе на протяжении срока эксплуатации. В связи с этим для корректного учета толщины стенки при определении напряжений должны быть изучены причины износа.

6.5.1.4 Для расчета усталостных повреждений при выполнении постоянных операций толщину стенки t_{fat} , мм, определяют по формуле

$$t_{fat} = t_{nom}. \quad (3)$$

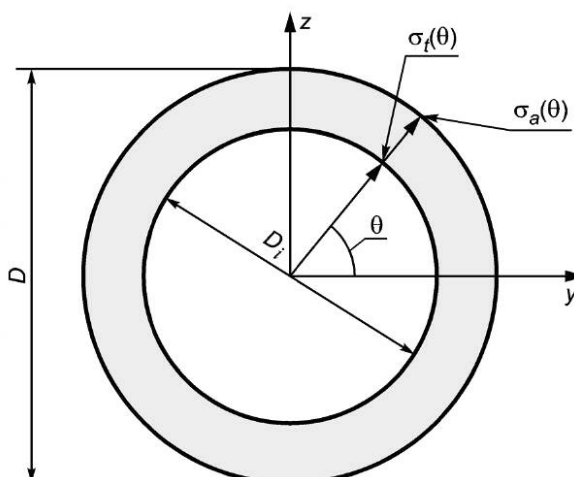
6.5.1.5 Номинальные напряжения σ , МПа, для труб представляют собой сумму осевых напряжений, вызванных осевым растягивающим усилием и изгибающим моментом, определяют по формуле

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_M(\theta), \quad (4)$$

где σ_a — осевые напряжения, вызванные действием осевого растягивающего усилия, МПа;

$\sigma_M(\theta)$ — осевые напряжения, вызванные действием изгибающего момента и зависящие от угловой координаты, МПа;

θ — угловая координата в полярной системе координат сечения трубы, приведенная на рисунке 6, с помощью которой определяют положение критической области по окружности, °.



D — наружный диаметр; D_i — внутренний диаметр

Рисунок 6 — Пример сечения трубы

6.5.1.6 Осевые напряжения σ_a , МПа, определяют по формуле

$$\sigma_a = \frac{T_e}{\pi \cdot (D - t_{fat}) \cdot t_{fat}}, \quad (5)$$

где D — наружный диаметр стального райзера, мм;

T_e — эффективное натяжение, Н.

6.5.1.7 Напряжения, вызванные действием изгибающего момента, рассчитывают на внешней и внутренней стенках трубы. Напряжения, полученные на основании изгибающих моментов, определяют по формуле (6); напряжения, полученные на основании кривизны, — по формуле (7)

$$\sigma_M(\theta) = [M_y \cdot \sin(\theta) + M_z \cdot \cos(\theta)] \cdot \left[\frac{D - 2t}{2I} \right], \quad (6)$$

$$\sigma_M(\theta) = E \cdot [k_y \cdot \sin(\theta) + k_z \cdot \cos(\theta)] \cdot \left[\frac{D - 2t}{2} \right], \quad (7)$$

где M_y и M_z — изгибающие моменты относительно локальных осей координат y и z соответственно, приведенных на рисунке 6, Н · мм;

k_y и k_z — кривизна относительно локальных осей координат y и z соответственно, 1/мм;

I — момент инерции сечения, мм⁴;

t — толщина стенки трубы ($t = t_{fat}$), мм.

6.5.1.8 Напряжения могут изменяться в окружном направлении трубы. Ввиду этого рекомендуется определять напряжения не менее чем в восьми точках, расположенных по окружности.

6.5.2 Напряжения в составном поперечном сечении

6.5.2.1 При выполнении оценки усталостной прочности комплексных конструкций (гибкие райзеры, шлангокабели и кабели) необходимо применять специализированные инструменты для расчета составных сечений или использовать МКЭ.

6.5.2.2 В расчетах необходимо учитывать компоненты напряжений в армирующих слоях и других спиральных элементах шлангокабелей и кабелей:

- осевые напряжения, вызванные эффективным растяжением и внутренним/внешним давлением;
- напряжения при локальном изгибе спирального элемента;
- напряжения при заклинивании или проскальзывании спиральных элементов при их изгибе.

6.5.2.3 Методика расчета должна быть подтверждена испытаниями. Коэффициенты трения, используемые в расчетах, также должны быть установлены по результатам испытаний.

6.5.2.4 В качестве консервативного и упрощенного подхода в расчетах допускается использовать предположение о том, что элементы составного поперечного сечения находятся в идеальном контакте, а конструкция ведет себя как балка.

6.5.2.5 Как правило, при расчете армирующих слоев рекомендуется использовать МКЭ с учетом контактных взаимодействий.

6.5.3 Размахи напряжений и количество циклов

6.5.3.1 При выполнении расчетов в частотной области для определения усталостных повреждений допускается использовать метод узкополосного приближения, описание которого приведено в приложении А.

6.5.3.2 При выполнении расчетов во временной области следует вычислять размахи напряжений и количество циклов, которые являются входными данными для расчета усталостных повреждений. Подсчет циклов, как правило, выполняют методом «дождя».

6.5.3.3 Алгоритм подсчета циклов методом «дождя» определяет для каждого размаха напряжений соответствующее количество циклов, которые являются входными данными для расчета кратковременных усталостных повреждений.

6.5.3.4 Размахи напряжений и соответствующее количество циклов могут быть представлены в виде гистограммы (как кратковременной, так и долговременной), пример которой приведен на рисунке 7.

Количество циклов за год

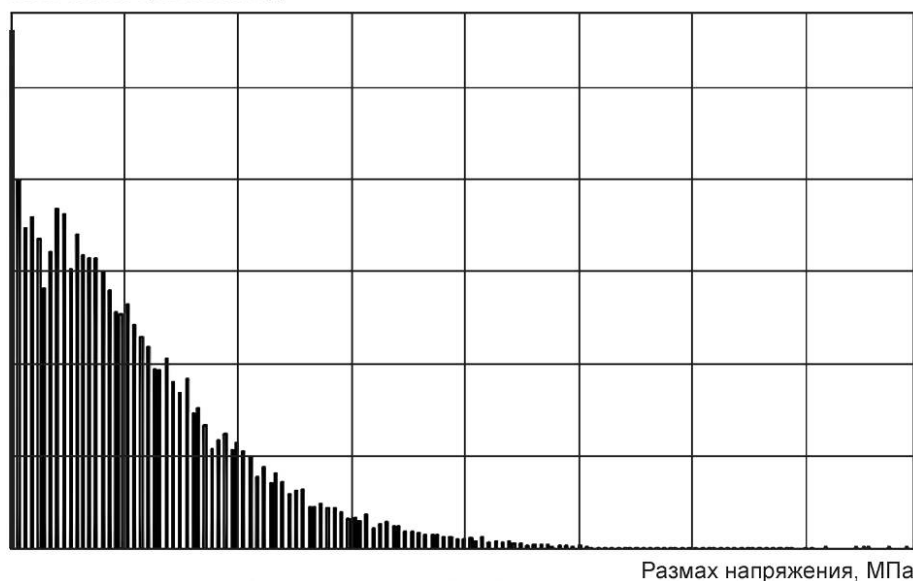


Рисунок 7 — Пример гистограммы

6.6 Усталостная прочность и кривые S—N

6.6.1 Общие сведения

6.6.1.1 При расчете усталостной прочности, как правило, используют метод, основанный на кривых S—N тех материалов, которые получают при испытаниях. В качестве альтернативных методов расчета могут быть применены методы механики разрушения.

6.6.1.2 В случае отсутствия усталостных характеристик материала, деталей и параметров окружающей среды необходимые кривые S—N должны быть получены на основании испытаний, либо допускается использовать консервативные кривые S—N.

6.6.1.3 Не допускается использовать кривые S—N, полученные методами механики разрушения, если данные методы не верифицированы относительно результатов испытаний.

6.6.1.4 Расчетную кривую S—N следует строить на основании экспериментальных данных как среднее значение минус два стандартных отклонения. Методические указания по определению расчетных кривых S—N для армирующей проволоки в гибких трубах на основании испытаний приведены в приложении Б.

6.6.2 Основные понятия

6.6.2.1 Несущая способность по усталости выражается в количестве циклов нагружения до отказа для заданного постоянного размаха напряжений $N(S)$:

$$N(S) = \bar{a} \cdot S^{-m}, \quad (8)$$

где $\bar{a}$ — параметр, характеризующий пересечение кривой S—N с осью $\log N$;

S — размах напряжений в критической области, МПа;

m — параметр, характеризующий угол наклона кривой S—N.

6.6.2.2 Формула (8) эквивалентна формуле (9):

$$\log N = \log \bar{a} - m \cdot \log S. \quad (9)$$

6.6.2.3 Размах напряжений S определяют с учетом коэффициента концентрации напряжений, а также в случае необходимости с учетом поправки на толщину по формуле

$$S = S_0 \cdot SCF \cdot \left(\frac{t_{fat}}{t_{ref}} \right)^k, \quad (10)$$

где S_0 — номинальный размах напряжений, МПа;

SCF — коэффициент концентрации напряжений;

$\left(\frac{t_{fat}}{t_{ref}} \right)^k$ — поправочный коэффициент на толщину стенки трубы.

6.6.2.4 Поправочный коэффициент на толщину стенки трубы используется в случае, если толщина стенки трубы, используемая в усталостных расчетах t_{fat} , превышает нормативное значение толщины $t_{ref} = 25$ мм. Показатель степени k определяется типом кривой $S-N$.

6.6.2.5 Билинейные кривые определяют по формуле

$$N = \begin{cases} \bar{a}_1 \cdot S^{-m_1} & \text{при } S > S_{sw} \\ \bar{a}_2 \cdot S^{-m_2} & \text{при } S \leq S_{sw}, \end{cases} \quad (11)$$

где m_1 и m_2 — параметры, характеризующие угол наклона соответствующих участков билинейной кривой $S-N$;

$\bar{a}_1$ и $\bar{a}_2$ — параметры, характеризующие пересечение соответствующих участков билинейной кривой $S-N$ с осью $\log N$;

S_{sw} — значение напряжений в точке пересечения участков билинейной кривой $S-N$, МПа.

6.6.2.6 Значение S_{sw} определяют по формуле

$$S_{sw} = 10^{\left[\frac{(\log \bar{a}_1 - \log N_{sw})}{(m_1)} \right]}, \quad (12)$$

где N_{sw} — количество циклов, при котором изменяется наклон кривой $S-N$.

6.6.2.7 Как правило, значение $\log N_{sw}$ составляет 6—7. Пример билинейной кривой $S-N$ приведен на рисунке 8.

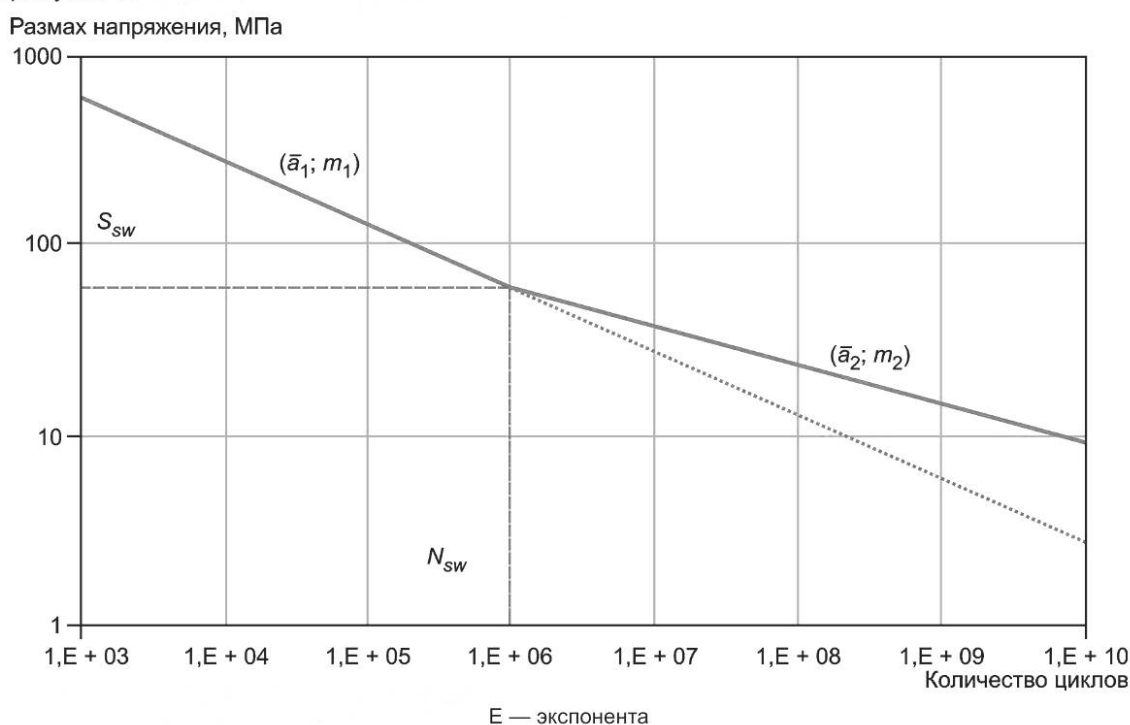


Рисунок 8 — Пример билинейной кривой $S-N$

6.6.3 Билинейные кривые S—N

6.6.3.1 В случае отсутствия усталостных характеристик материала, деталей и параметров окружающей среды, необходимые билинейные кривые S—N должны быть получены на основании испытаний, либо допускается использовать консервативные кривые S—N.

6.6.3.2 Не допускается использовать билинейные кривые S—N, полученные методами механики разрушения, если данные методы не верифицированы относительно результатов испытаний.

6.6.4 Линейные кривые S—N

Допускается использование линейных кривых S—N (без изменения наклона), основанных на международных стандартах.

6.6.5 Условие невыполнения усталостного расчета

6.6.5.1 Расчет усталостной прочности допускается не выполнять при условии, что наибольшее значение напряжений в элементах райзера для всех состояний моря на протяжении срока эксплуатации райзера не превышает предела выносливости его материала.

6.6.5.2 Для билинейных кривых S—N предел выносливости определяют, как правило, для количества циклов 10^7 (см. также [4]).

6.6.5.3 В расчетах следует учитывать коэффициент запаса по усталости DFF , уменьшая допустимый размах напряжений на коэффициент $\frac{1}{\sqrt[m]{DFF}} (DFF^{-0,33})$ — для $m = 3$.

6.6.6 Коэффициент концентрации напряжений

6.6.6.1 Коэффициенты концентрации напряжений используют для учета возможного увеличения напряжений, вызванных геометрическими дефектами.

6.6.6.2 Коэффициенты концентрации напряжений могут быть определены посредством расчета с помощью МКЭ или по аналитическим формулам.

6.6.6.3 Определение характерного значения эксцентриситета должно быть основано на производственных допусках и процедурах сварки.

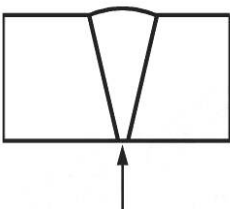
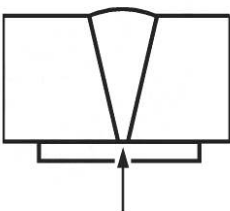
6.6.7 Выбор кривых S—N

6.6.7.1 Для деталей из однородных материалов зарождение усталостной трещины, как правило, происходит на поверхности детали. Поверхностные повреждения могут приводить к концентрации напряжений, что снижает срок службы при многоциклового усталости. Если поверхностные повреждения остаются сравнительно небольшими, то для сварных швов кривые S—N определяют по аналогичному уровню нагрузок.

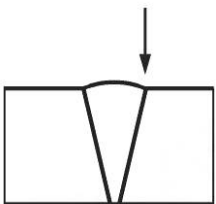
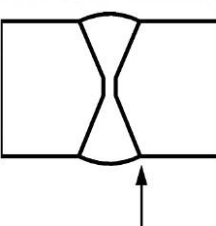
6.6.7.2 Если неоднородность материалов и поверхностные повреждения вызывают концентрацию напряжений, превышающую отношение размахов напряжений в сварных швах и основном металле, то предел выносливости основного материала следует определять отдельно. В этом случае выбирают отдельную кривую S—N для основного материала с учетом поверхностных дефектов.

6.6.7.3 Примеры типовых кольцевых сварных швов райзера и соответствующие критические области приведены в таблице 5.

Таблица 5 — Примеры сварных швов

Сварка	Эскиз сварного шва и критическая область	Комментарий
Односторонняя		Критическая область на внутренней стороне райзера
Односторонняя с подкладкой		Критическая область на внутренней стороне райзера

Окончание таблицы 5

Сварка	Эскиз сварного шва и критическая область	Комментарий
Односторонняя		Критическая область на внешней стороне райзера
Двусторонняя		Критическая область на внутренней стороне райзера

6.6.7.4 Рекомендуется выбирать кривые S—N с учетом:

- особенностей деталей конструкции;
- процесса изготовления (сварка, наплавка, ковка, механическая обработка и пр.);
- выбора основного материала или материала сварного шва;
- особенностей деталей сварных швов и их допусков, типов сварных швов;
- коэффициентов концентрации напряжений от концентричности (разности диаметров соединяемых труб), изменения толщины, овальности и эксцентриситета;
- окружающей среды (воздушная среда, морская среда с/без катодной защиты).

6.6.7.5 Для сварных соединений необходимо оценивать усталостные повреждения в критических областях как на внутренней поверхности, так и на внешней с учетом соответствующих коэффициентов концентрации напряжений.

6.6.7.6 В случае столкновения райзеров в зоне контакта может возникать локальная деформация. В этом случае рекомендуется построить отдельную кривую S—N на основании испытаний данного участка.

6.6.8 Аттестация кривых S—N

6.6.8.1 Аттестация кривых S—N должна быть проведена в следующих случаях:

- при использовании кривых S—N, отличающихся от рекомендованных в международных стандартах;
- при использовании кривых S—N с усовершенствованными усталостными свойствами.

6.6.8.2 При построении менее консервативной кривой S—N необходимо придерживаться следующей процедуры:

- оценить максимальные комбинации допусков на основании технических условий производства райзера;
- выполнить усталостные испытания образцов;
- построить нормативную кривую S—N на основании результатов испытаний (среднее значение минус два стандартных отклонения);
- оценить распределение дефектов, которые могут возникнуть после проведения неразрушающего контроля сварных соединений;
- выполнить независимую оценку полученной кривой S—N в компетентном органе проверки.

6.6.9 Кривые S—N для армирующей проволоки

6.6.9.1 Кривые S—N для армирующей проволоки, используемой в гибких трубах, являются специфическими и отсутствуют в открытом доступе. Изготовитель гибких труб обязан устанавливать свои кривые S—N.

6.6.9.2 Некоторые методические указания по определению кривых S—N для армирующей проволоки на основании отдельных испытаний приведены в приложении Б.

6.6.10 Кривые S—N для компонентов шлангокабеля

6.6.10.1 Кривые S—N для армирующей проволоки, стальных трубок и медных проводников шлангокабелей также являются специфическими.

6.6.10.2 Если отсутствует иная информация, в качестве кривой S—N для армирующей проволоки шлангокабеля (вдали от сварных швов) может быть принята кривая S—N «В» (см. также [4]).

6.7 Оценка усталостного повреждения

6.7.1 Критерии соответствия

6.7.1.1 Критерий усталости определяют по формуле

$$D_{fat} \cdot DFF \leq 1, \quad (13)$$

где D_{fat} — накопленное усталостное повреждение;

DFF — коэффициент запаса по усталости.

6.7.1.2 Усталостную долговечность L_{fat} , год, определяют по формуле

$$L_{fat} = \frac{1}{D_{fat}} \geq DFF \cdot L_{serv}, \quad (14)$$

где D_{fat} — накопленное усталостное повреждение за один год (долговременное);

L_{serv} — время работы компонента/узла (срок службы), год.

6.7.2 Кратковременное усталостное повреждение

Кратковременное усталостное повреждение в критической области D_i , мм, вследствие циклического отклика райзера определяют по формуле

$$D_i = \sum_i \frac{n(S_i)}{N(S_i)}, \quad (15)$$

где $n(S_i)$ — количество циклов нагружения с размахом напряжений S_i в критической области райзера вследствие кратковременного состояния моря или действия волны;

$N(S_i)$ — количество циклов нагружения с размахом напряжений S_i до отказа, полученное на основании кривой S—N.

6.7.3 Накопленное усталостное повреждение

Накопленное ежегодное усталостное повреждение D_{fat} определяют как взвешенную сумму кратковременных повреждений по формуле

$$D_{fat} = \sum_{i=1}^{N_s} D_i \cdot P_i, \quad (16)$$

где N_s — количество дискретных состояний моря/волн, описываемых диаграммой рассеивания в переменных H_s и T_p или H и T ;

P_i — вероятность наступления состояния моря/волны, которая в общем случае зависит от значительной высоты волны, периода пика спектра волнения и направления волны (H_s , T_p и θ);

D_i — кратковременное усталостное повреждение, мм.

7 Механика разрушения райзеров

7.1 При проектировании райзеров рекомендуется использовать подход допустимых повреждений. Данный подход заключается в том, что максимальный ожидаемый размер первоначального дефекта не увеличится до критического размера (или окажется в пределах заданного интервала) на протяжении срока эксплуатации райзера. Заданный интервал определен продолжительностью роста трещины от первоначального размера, выявленного с помощью неразрушающего контроля, до сквозной трещины с учетом коэффициента запаса по усталости DFF .

7.2 Расчеты распространения трещин включают в себя следующие этапы:

- определение долговременного распределения номинального значения напряжений;
- определение параметров роста трещины;
- оценка начального размера трещины и/или время зарождения трещины;

- определение циклических напряжений в предполагаемой плоскости роста трещины; для несварных компонентов требуется определение средних напряжений;
- определение конечного/критического размера трещины;
- интегрирование отношения распространения трещины относительно долговременного распределения размаха напряжений с целью определения долговечности детали при трещинообразовании.

8 Усталостное повреждение райзеров от вибраций, вызванных вихреобразованием

8.1 Расчет вибраций, вызванных вихреобразованием

8.1.1 Общая информация

8.1.1.1 Вибрации, вызванные вихреобразованием, представляют собой колебания, возникающие вследствие вихревого движения.

8.1.1.2 Райзер может испытывать вибрации, вызванные вихреобразованием, которые можно разделить:

- на поперечные вибрации с амплитудой, соизмеримой с диаметром трубы;
- продольные вибрации, вызванные поперечным потоком с амплитудами, составляющими 30 %—50 % от амплитуд поперечных вибраций;
- продольные вибрации с амплитудой, составляющей 10 %—15 % от диаметра трубы.

8.1.1.3 Продольные вибрации с амплитудой, составляющей 10 %—15 % от диаметра трубы, для райзеров, как правило, не рассматривают.

8.1.1.4 Основные эффекты от вибраций райзера, вызванные вихреобразованием:

- вибрации могут вызывать значительные усталостные повреждения конструкции райзера;
- поперечные вибрации могут увеличивать коэффициент сопротивления, учитываемый в глобальном расчете райзера;
- вибрации могут влиять на вынужденные колебания группы райзеров;
- вибрации могут вносить вклад в относительную скорость столкновения соседних райзеров.

8.1.2 Нагрузки от течения

8.1.2.1 В силу ряда измерительных ограничений информация о долговременном распределении течений может отсутствовать при разработке месторождения. В связи с этим допускаются некоторые предположения и упрощения: в качестве долговременного описания могут быть использованы экстремальные профили течения (за 1 год, за 10 лет, за 100 лет), а скорость течения описывают распределением Вейбулла.

8.1.2.2 Если долговременное распределение скоростей течения выполняют на различных глубинах, то для определения профилей требуется корреляция между скоростями на разных глубинах. В данном случае допускается придерживаться следующей методологии:

- выбрать величину вероятности поверхностного течения;
- вычислить поверхностную скорость на основании долговременного распределения скоростей на поверхности;
- определить скорости на других глубинах с использованием величины вероятности поверхностной скорости и с учетом долговременного распределения скоростей на глубине.

8.1.2.3 Изменение направления с увеличением глубины, как правило, не рассматривают.

8.1.2.4 Оценка вибраций должна быть выполнена как для течений в продольном направлении относительно райзера, так и в поперечном. В расчетах рассматривают нормальные компоненты скорости течения, действующего на райзер, как показано на рисунке 9.

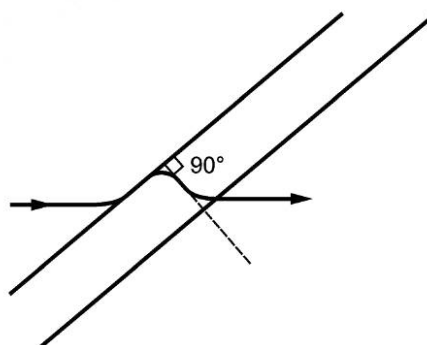


Рисунок 9 — Пример течения, действующего на наклонную трубу

8.1.3 Методология расчета вибраций, вызванных вихреобразованием. Общая информация

8.1.3.1 Как правило, проведение упрощенного расчета вибраций, вызванных вихреобразованием, является достаточным, если усталостные повреждения от данных вибраций находятся в допустимых пределах.

8.1.3.2 Если упрощенный расчет показывает недостаточную усталостную несущую способность, необходимо пользоваться более сложными методами, которые следует выбирать в соответствии с исследуемым случаем.

8.1.3.3 Для прогнозирования вибраций, вызванных вихреобразованием, допускается использовать несколько вычислительных моделей:

- модели отклика — эмпирические модели, в которых установившаяся амплитуда вибраций является функцией гидродинамических и структурных параметров;
- модели сил — возбуждение, инерцию и демпфирующие силы определяют на основании силовых коэффициентов, получаемых из эмпирических данных;
- модели потока — силы, действующие на конструкцию, и соответствующий динамический отклик определяют на основании параметров потока жидкости (*CFD*).

8.1.3.4 Модель отклика является наиболее простой из указанных. Модель потока требует высоких вычислительных затрат, поэтому редко используется для расчетов усталости райзеров.

8.1.3.5 Наиболее часто применяемая модель для системы райзера — модель сил. При этом модели потока могут быть использованы для верификации силовых коэффициентов в модели сил.

8.1.3.6 Численные методы могут быть проверены и откалиброваны по результатам экспериментов в лабораторных условиях или условиях эксплуатации.

8.1.4 Методология расчета вибраций от вихреобразований. Модель сил

8.1.4.1 Расчеты вибраций, вызванных вихреобразованием, могут быть выполнены с использованием специализированного ПО со следующими особенностями:

- полуэмпирические нагрузки от вибраций поперечного потока/отклик основаны на результатах модельных испытаний;
- применена линейная модель конструкции;
- прямое решение в частотной области основано на линеаризованных уравнениях динамического равновесия при статическом положении равновесия;
- модальное решение основано на собственных частотах и формах, вычисленных при КЭ расчете;
- усталостное повреждение определяют в частотной области.

8.1.4.2 Ограничения данного метода:

- не учитывают продольные вибрации, вызванные вихреобразованием;
- линейная модель конструкции (например, постоянное осевое усилие) может давать неточные результаты (в частности, в зоне касания морского дна);
- не учитывают осевое напряжение вследствие вибраций, вызванных поперечным потоком.

8.1.5 Методология расчета вибраций от вихреобразований. Модель потока

Во избежание ограничений модели сил допускается использовать численное моделирование обтекания одной или нескольких труб турбулентным потоком жидкости. Применение вычислительной гидродинамики для оценки вибраций, вызванных вихреобразованием, требует значительных вычислительных ресурсов:

- объемная постановка (3D) — модель *CFD* связана с моделью конструкции в линеаризованной временной области или в нелинейной временной области. Как правило, не используют из-за значительных вычислительных затрат;
- плоская постановка (2D) — подход *CFD* (метод Навье—Стокса, например), применяемый при обтекании сечения трубы в линеаризованной временной области или в нелинейной временной области. Моделирование *CFD* следует выполнять с использованием полномасштабных чисел Рейнольдса и с соответствующими моделями турбулентности;
- 2D/3D — модели *CFD* могут быть применены для одной или нескольких труб с гибкими опорами.

8.2 Оценка усталостного повреждения от вибраций

8.2.1 Критерии соответствия

8.2.1.1 Критерий соответствия для усталостного повреждения вследствие вибраций, вызванных вихреобразованием, определяют по формуле

$$D_{VIV} \cdot DFF_{VIV} \leq 1, \quad (17)$$

где D_{VIV} — накопленное усталостное повреждение вследствие вибраций;

DFF_{VIV} — коэффициент запаса по усталости для вибраций.

8.2.1.2 D_{VIV} — накопленное усталостное повреждение в течение срока эксплуатации райзера, вычисленное на основе долговременного распределения течения.

8.2.1.3 Дополнительно к накопленному усталостному повреждению от вибраций необходимо учитывать влияние кратковременных экстремальных вибраций (например, вихревое течение за 100 лет).

8.2.1.4 Расчет усталости для экстремальных событий может быть выполнен отдельно. Критерий соответствия для экстремальных событий определяют по формуле

$$D_{VIV-ST} \cdot DFF_{VIV-ST} \leq 1, \quad (18)$$

где D_{VIV-ST} — накопленное усталостное повреждение вследствие вибраций за время экстремального кратковременного события;

DFF_{VIV-ST} — коэффициент запаса по усталости для вибраций экстремального кратковременного события.

8.2.1.5 Как правило, DFF_{VIV-ST} принято выбирать 10.

8.2.2 Кратковременное усталостное повреждение

Кратковременное усталостное повреждение в критической области D_i , мм, вследствие циклического отклика райзера определяют по формуле

$$D_i = \sum_i \frac{n(S_i)}{N(S_i)}, \quad (19)$$

где $n(S_i)$ — количество циклов нагружения с размахом напряжений S_i в критической области райзера вследствие нагружения от вибраций для одного профиля течения;

$N(S_i)$ — количество циклов нагружения с размахом напряжений S_i до отказа, полученное на основании кривой S—N.

8.2.3 Накопленное усталостное повреждение

8.2.3.1 Накопленное ежегодное усталостное повреждение D_{fat} определяют как взвешенную сумму кратковременных повреждений по формуле

$$D_{fat} = \sum_{i=1}^{N_s} D_i \cdot P_i, \quad (20)$$

где N_s — количество дискретных состояний моря/волн, описывающих накопленное состояние моря;

P_i — вероятность наступления состояния моря, которая в общем случае зависит от скорости поверхностного течения и направления, т. е. $P = P(U_c, \theta)$;

D_i — кратковременное усталостное повреждение, мм.

8.2.3.2 Если отсутствует иная информация, за вероятность профиля течения принимают вероятность появления скорости поверхностного течения.

8.3 Упрощенная оценка усталостного повреждения

8.3.1 Описание упрощенного метода оценки усталостных повреждений, вызванных вибрациями, как для поперечного потока, так и продольного потока приведено в приложении В. Данный метод применяют для верхних натяжных райзеров с равномерным сечением и в условиях преобладания однонаправленного течения.

8.3.2 Также данный метод допускается использовать для других типов райзеров (например, стальных провисающих райзеров).

8.4 Методы снижения вибраций

8.4.1 Общие методические указания

Основные методы снижения вибраций, вызванных вихреобразованием, заключаются:

- в изменении свойств райзера (натяжения, диаметра, конструкционного демпфирования);
- использовании устройств подавления вихреобразований;
- верификации расчетных моделей с помощью испытаний.

8.4.2 Устройства подавления вихреобразований

8.4.2.1 Устройства подавления вихреобразований классифицируют по трем категориям:

- поверхностные выступы (провода, интерцепторы и пр.);
- перфорированные кожухи и осевые планки;
- стабилизаторы, предотвращающие образование вихревой дорожки.

8.4.2.2 Устройства подавления вихреобразований значительно увеличивают стоимость райзера, а также усложняют его обслуживание во время установки.

8.4.2.3 Наиболее часто применяются интерцепторы, позволяющие разделять поток.

8.4.3 Аттестация устройств подавления вихреобразований

Основными параметрами интерцепторов являются высота ребра и шаг навивки. Различные скорости течений также будут влиять на общие эксплуатационные характеристики рассматриваемой конструкции.

9 Комбинированное усталостное повреждение райзера

9.1 Общие сведения

9.1.1 Рекомендуемые процедуры расчета кратковременных усталостных повреждений в рамках глобального расчета приведены в [1].

9.1.2 В настоящем разделе представлены методы вычисления комбинированного усталостного повреждения от различных факторов.

9.2 Критерии соответствия

9.2.1 Усталостная долговечность должна быть определена на основании кривых S—N в предположении линейного суммирования повреждений по правилу Пальмгрена—Майнера.

9.2.2 Критерий соответствия комбинированного усталостного повреждения определяют по формуле

$$D_{fat} \cdot DFF \leq 1, \quad (21)$$

где D_{fat} — накопленное усталостное повреждение от всех внешних источников;

DFF — коэффициент запаса по усталости.

9.2.3 На ранних этапах проектирования, как правило, неизвестны все источники, вызывающие усталостные повреждения. В связи с этим DFF выбирают на основании опыта проектирования аналогичных конструкций.

9.3 Комбинации повреждений с частотой волны и низкочастотных повреждений

Для вычисления комбинированных усталостных повреждений, вызываемых вибрациями с частотой волны, и низкочастотных повреждений могут быть применены нижеприведенные методы.

9.3.1 Подсчет циклов методом «дождя» во временной области

Объединяют перемещения с частотой волны и низкочастотные перемещения, на основании которых определена история изменения напряжений. Проводят подсчет количества циклов методом «дождя» в соответствии с историей изменения напряжений.

9.3.2 Метод единичного момента

Метод единичного момента является аналогом метода Рэлея с учетом предположения о том, что пики имеют распределение по Рэлею, однако он более простой для вычислений и с более точными результатами по сравнению с методом Рэлея.

9.3.3 Бимодальный метод

Для четко разделенных бимодальных спектров напряжений могут быть получены аналитические решения при оценке усталостных повреждений.

9.3.4 Упрощенный метод

Метод основан на информации о средней частоте пересечения нулевого значения для каждого процесса, дает консервативные результаты и приведен в приложении\А.

9.3.5 Прямое суммирование

Полученные независимо усталостные повреждения от нагрузок с частотой волны и низкочастотных нагрузок суммируют.

9.4 Комбинации повреждений от вибраций

9.4.1 Как правило, усталостные повреждения принято определять суммированием повреждений от нагрузок с частотой волны и низкочастотных с повреждениями от вибраций, вызванных вихреобразованием. Данный подход допускается использовать, если критические зоны при расчете на нагрузки с частотой волны и низкочастотные нагрузки не совпадают с критическими зонами при расчете на вибрации, вызванные вихреобразованием.

9.4.2 Также допускается использовать упрощенный метод, описание которого приведено в приложении А.

10 Коэффициенты запаса по усталости райзера

10.1 Общие сведения

10.1.1 Коэффициенты запаса по усталости DFF применяют с целью достижения целевой вероятности усталостного разрушения. Расчетная усталостная выносливость компонента должна быть выше его срока эксплуатации с учетом коэффициента запаса DFF .

10.1.2 В настоящем разделе приведены методические указания по определению коэффициентов запаса для стальных райзеров, гибких райзеров, шлангокабелей.

10.2 Стандартные коэффициенты запаса

10.2.1 Стандартные значения коэффициентов запаса, которые могут быть использованы для стальных райзеров, приведены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6 — Коэффициенты запаса по усталости для стальных райзеров

Класс безопасности		
Низкий	Средний	Высокий
3	6	10

10.2.2 Усталостные повреждения накапливаются на всех этапах эксплуатации райзера. При определении накопленного усталостного повреждения необходимо учитывать наибольший класс безопасности для различных этапов эксплуатации.

10.3 Коэффициенты запаса для временных райзеров

10.3.1 Временные райзеры, как правило, эксплуатируют в течение ограниченного количества времени (обычно от 1 до 2 мес).

10.3.2 Усталостную долговечность для каждого режима работы следует рассчитывать для фактического состояния (компоновка райзера, глубина воды, метеорологические условия и пр.).

10.3.3 Если расчетная усталостная долговечность ниже срока эксплуатации в 10 раз, требуется проводить контроль усталостных трещин. Интервал контроля определяют следующими способами:

- интервал контроля составляет не более 20 % от наработки изделия до отказа, если расчет роста трещины проводят до разрушения;

- интервал контроля составляет не более 10 % от рассчитанной усталостной долговечности.

10.3.4 Если расчетный интервал контроля превышает время выполнения операции, то проведение контроля после каждой операции является достаточным.

10.3.5 Если расчетный интервал контроля не превышает время выполнения операции, то рекомендуется либо выполнять мониторинг отклика в критических областях во время работы, либо предусматривать программу проверки/замены.

10.3.6 Райзеры, инспектирование которых невозможно после проведения операций, должны иметь коэффициент запаса, превышающий значение 10.

10.4 Стандартные коэффициенты запаса для гибких райзеров

При расчетах гибких райзеров должны быть рассмотрены сценарии как незатопленного кольцевого пространства, так и затопленного (в случае повреждения оболочки райзера). Прогнозируемую усталостную долговечность для гибких райзеров следует определять с коэффициентом запаса не ниже 10.

10.5 Стандартные коэффициенты запаса для шлангокабелей

Прогнозируемая усталостная долговечность для шлангокабелей должна быть определена с коэффициентом запаса не ниже 10 (см. также [5]).

10.6 Повышенные коэффициенты запаса для стальных райзеров

10.6.1 Общие положения о коэффициентах запаса, полученных по результатам анализа рисков

Оптимальные значения коэффициентов запаса по усталости могут быть рассчитаны с учетом неопределенностей в оценке усталостной прочности. Метод расчета основан на допустимых вероятностях отказа с применением методов расчета надежности конструкций.

10.6.2 Принятые допущения

10.6.2.1 Уравнение для коэффициентов запаса основано на вариативности величины усталостной долговечности вследствие вариативности неопределенностей концепции райзера.

10.6.2.2 В настоящем стандарте использованы следующие допущения:

- калибровка коэффициентов запаса должна быть выполнена по умолчанию, используя расчет надежности конструкции, в котором неявно учтены суммарное повреждение по правилу Пальмгрена—Майнера, кривые S—N и вариативность оценки усталости;
- основные переменные являются независимыми;
- отсутствует явная формулировка кривых S—N. Неопределенность в кривых S—N является входным параметром;
- неявная неопределенность характеризуется коэффициентом запаса γ , а неявное систематическое отклонение — поправочным коэффициентом α ;
- коэффициенты запаса следует выбирать из ограниченного набора стандартных исследований усталостных параметров при наиболее консервативных состояниях моря.

10.6.3 Расчетные формулы

10.6.3.1 Расширенный критерий усталости $D_{fat}(T)$ с учетом использования билинейной кривой S—N определяют по формуле

$$D_{fat}(T) = \left(\frac{T_{des} f_v}{a_1} \right) \left[\int_{S_{sw}}^{\infty} s^{m_1} f_s(S) ds + \left(\frac{\bar{a}_1}{a_2} \right) \int_0^{S_{sw}} s^{m_2} f_s(S) ds \right] \leq \frac{\alpha}{\gamma}, \quad (22)$$

где T_{des} — расчетный срок эксплуатации, год;

f_v — средняя частота циклов напряжений, Гц;

$\bar{a}_1$ и $\bar{a}_2$ — параметры, характеризующие пересечение соответствующих участков билинейной кривой S—N с осью $\log N$;

S_{sw} — значение напряжений в точке пересечения участков билинейной кривой S—N, МПа;

S — размах напряжений в критической области, МПа;

m_1 и m_2 — параметры, характеризующие угол наклона соответствующих участков билинейной кривой S—N;

$f_s(S)$ — плотность распределения вероятности циклов напряжений;

α — поправочный коэффициент отклонения;

γ — коэффициент запаса по усталости.

10.6.3.2 Поправочный коэффициент отклонения α , учитывающий ожидаемое систематическое отклонение от истинного усталостного повреждения, определяют по формуле

$$\alpha = \frac{D_{fat}(\text{используемый метод})}{D_{fat}(\text{наиболее совершенный метод})}. \quad (23)$$

10.6.3.3 Например, в качестве используемого метода может быть расчет в частотной области, а в качестве наиболее современного — расчет во временной области с применением процедуры подсчета количества циклов методом «дождя».

10.6.3.4 Коэффициент запаса по усталости γ , полученный на основе предварительной калибровки с использованием расчета надежности конструкции, определяют по формуле

$$\log_{10} \gamma = \left[30 + \gamma_{SC} \right] \cdot T_{des}^{a(30 + \gamma_{SC}) + b} \cdot \left[c\sigma_{X_D} + d \right] \cdot \left(\sigma_{X_a} \right)^{e\sigma_{X_D} + f}, \quad (24)$$

где γ_{SC} — коэффициент класса безопасности;

T_{des} — расчетный срок эксплуатации, год;

σ_{X_D} — неопределенность в усталостном повреждении;

σ_{X_a} — неопределенность в нормализованной усталостной постоянной (в логарифмических координатах);

a, b, c, d, e, f — коэффициенты.

10.6.3.5 Значения коэффициентов γ_{SC} для различных классов безопасности приведены в таблице 7.

Таблица 7 — Значения коэффициентов γ_{SC}

Класс безопасности		
Низкий	Средний	Высокий
2	7	10

10.6.3.6 Параметр $T_{des}^{a(30 + \gamma_{SC}) + b}$ в формуле (24) является поправочным коэффициентом для расчетного срока эксплуатации.

10.6.3.7 Значения коэффициентов a, b, c, d, e, f для различных диапазонов σ_{X_D} приведены в таблице 8.

Таблица 8 — Значения коэффициентов a, b, c, d, e, f

Коэффициент	$0,1 < \sigma_{X_D} < 0,3$	$0,3 \leq \sigma_{X_D} < 0,5$
a	0,0205	0,0181
b	−0,9000	−0,8000
c	0,0218	0,0730
d	0,0242	0,0084
e	−1,2800	−0,1700
f	0,2894	−0,0400

10.6.3.8 Неопределенность в усталостном повреждении следует определять на основании нескольких усталостных расчетов.

10.6.3.9 Нормализованный усталостный коэффициент использования X_D определяют по формуле

$$X_D = \log \left(\frac{D_S(X)}{D(\mu_X)} \right), \quad (25)$$

где $D_S(X)$ — случайное усталостное повреждение со случайными параметрами в распределении размаха напряжений из-за неопределенности случайных величин X ;

$D(\mu_X)$ — основное усталостное повреждение с заданными параметрами, используемыми при усталостном расчете конструкции.

10.6.3.10 Первое приближение к среднеквадратическому отклонению нормализованного усталостного коэффициента использования X_D может быть выражено по формуле

$$\text{Var}[X_D] = \nabla^T C \nabla, \quad (26)$$

где C — матрица ковариаций x , т. е. $C_{ij} = \text{cov}(X_i, X_j)$;

∇^T — градиент вектора X_D относительно x (оценивают по среднему значению μ_X).

10.6.3.11 Для некоррелированных случайных величин выражение упрощается следующим образом

$$\sigma_{X_D} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial X_D}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \sigma_{X_i}^2 + \sigma_{X_{mod}}^2}, \quad (27)$$

где σ_{X_D} — неопределенность в усталостном повреждении;

X_i — случайные переменные, которые вносят неопределенность при оценке усталостного повреждения;

X_{mod} — неопределенность модели, учитывающая источники неопределенностей, не рассматриваемых при оценке X_D .

10.6.3.12 Предполагается, что X_{mod} является несмещенной величиной со среднеквадратическим отклонением $\sigma_{X_{mod}}$. Рекомендуется σ_{X_D} не принимать ниже значения 0,05.

10.6.3.13 Параметр $(\sigma_{X_a})^{e\sigma_{X_D} + f}$ в формуле (24) учитывает естественную вариативность кривой S—N (σ_{X_a}). X_a — нормализованная усталостная постоянная (в логарифмических координатах).

10.6.3.14 Для линейных кривых S—N (без изменения наклона) значения σ_{X_a} находятся в диапазоне от 0,18 до 0,25. Для сварных швов значение σ_{X_a} может быть принято 0,15.

10.6.4 Процедура расчета

10.6.4.1 Для расчета усталостных повреждений на основе анализа рисков необходимы вероятностные модели основных переменных и поверхности откликов, полученных по результатам нескольких параметрических исследований.

10.6.4.2 Процедура расчета приведена в виде блок-схемы на рисунке 10.

10.6.4.3 Описание и дополнительные комментарии к шагам процедуры расчета:

а) стандартный усталостный расчет райзера выполняют с использованием наиболее точных расчетных параметров конструкции, указанных в проектной документации. Данный расчет принято классифицировать как базовый, а полученное усталостное повреждение обозначают $D(\mu_X)$;

б) в полученное усталостное повреждение $D(\mu_X)$ вносят вклад различные кратковременные состояния моря. Определяют те состояния моря, которые вносят значительный вклад в усталостное повреждение $D(\mu_X)$. Например, выбирают три наиболее опасных кратковременных состояния моря для изучения чувствительности;

в) определяют случайные переменные X_i , которые вносят неопределенность при оценке усталостного повреждения. Случайные переменные, как правило, следует рассматривать как некоррелированные. Примеры случайных переменных приведены в 10.6.5;

г) формулируют вероятностные модели для всех случайных переменных, определяя средние значения μ_{X_i} и среднеквадратические отклонения σ_{X_i} . Как правило, средние значения случайных переменных могут быть приняты на основании базовых параметров конструкции, указанных в проектной документации. Если отсутствует иная информация, стандартное отклонение может быть определено на основании рекомендаций 10.6.5;

д) выполняют исследования чувствительности случайных переменных для выбранных наиболее опасных состояний моря, определенных на шаге 2. Изучение чувствительности следует проводить при изменении переменных в диапазоне двух среднеквадратических отклонений ($\mu_{X_i} \pm 2\sigma_{X_i}$). Полученное усталостное повреждение обозначают $D_S(X)$;

е) генерируют поверхности отклика на основании результатов, полученных по перечислению д). Поверхности отклика генерируют по формуле (25), по оси ординат отмечают значения X_D , по оси абсцисс — X_i ;

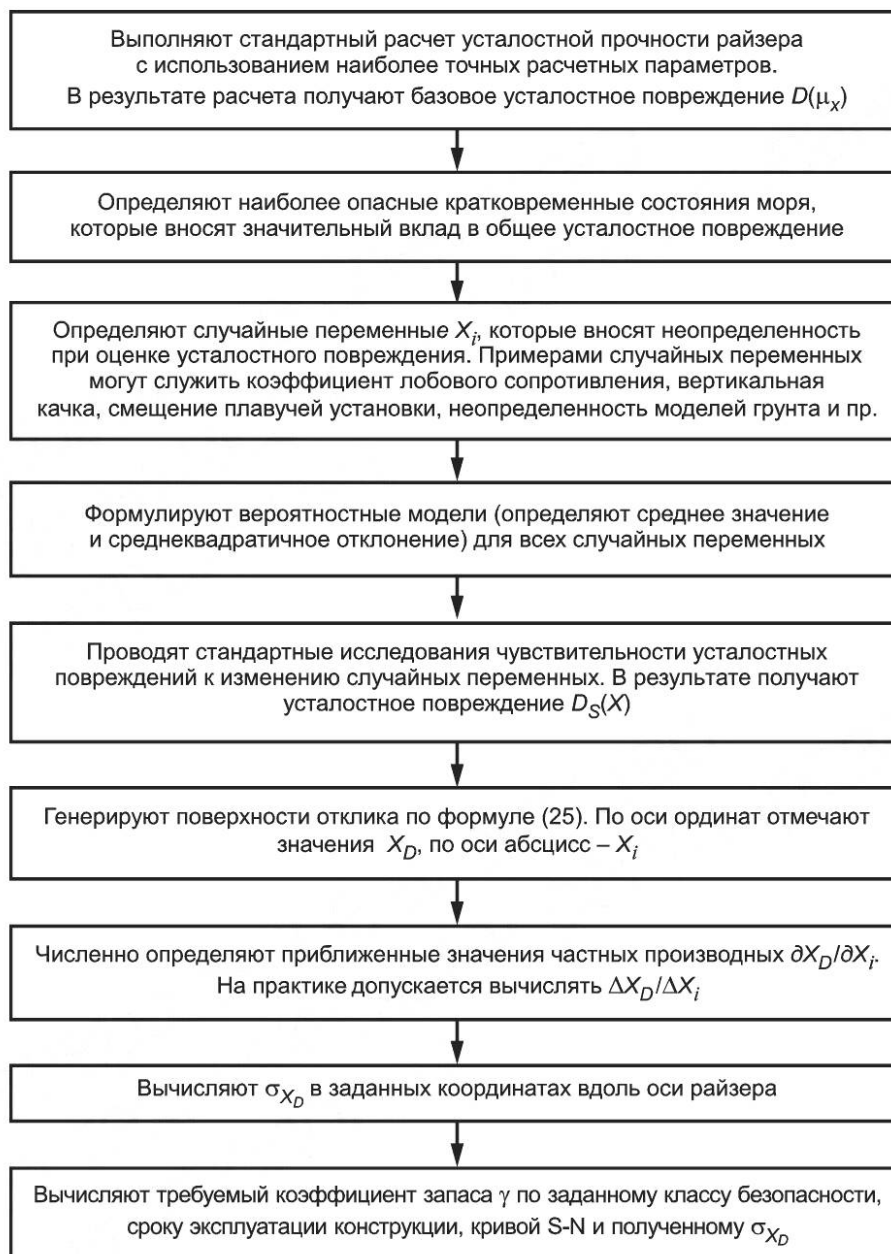


Рисунок 10 — Процедура расчета

ж) численно определяют приближенные значения частных производных $\frac{\partial X_D}{\partial X_i}$. На практике допускается вычислять $\frac{\Delta X_D}{\Delta X_i}$, где ΔX_D — изменение X_D вследствие приращения ΔX_i случайной переменной X_i . Пример поверхности отклика и величины $\frac{\partial X_D}{\partial X_i}$ приведен на рисунке 11. Данный подход допускается использовать, если изменение величины усталостной долговечности при изменении переменных близко к линейному в логарифмических координатах. В случае нелинейного характера необходимо применять альтернативные методы;

и) значение σ_{X_D} вычисляют по формуле (27) в заданных координатах вдоль оси райзера. Например, в качестве осевого положения принимают координату вдоль оси райзера s , в качестве окружного — θ ;

к) требуемый коэффициент запаса по усталости γ вычисляют по формуле (24) с учетом заданного класса безопасности, срока эксплуатации конструкции, кривой S—N и σ_{X_D} .

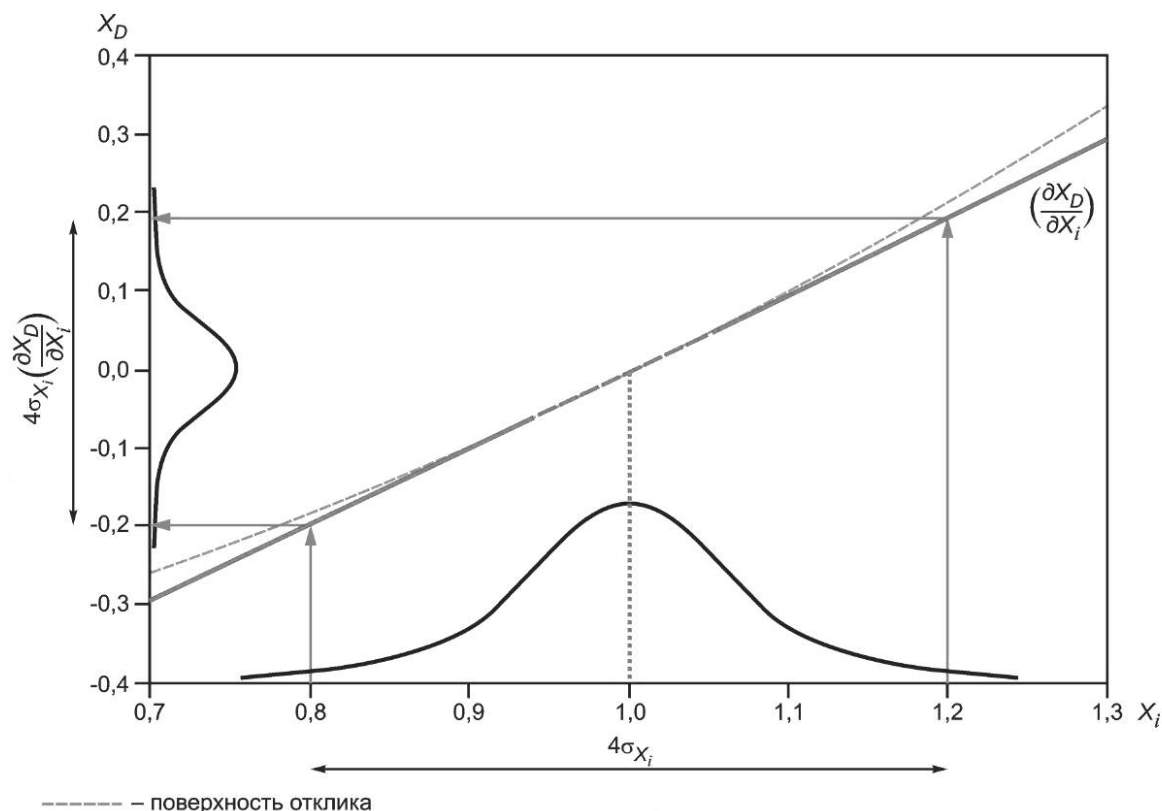


Рисунок 11 — Пример поверхности отклика

10.6.4.4 Полученный коэффициент запаса по усталости γ изменяется вдоль оси райзера. Не допускается использование единого постоянного коэффициента запаса для всех критических областей райзера.

10.6.5 Случайные переменные

10.6.5.1 Минимальный перечень случайных переменных, которые необходимо рассматривать в расчетах, приведен в таблице 9.

10.6.5.2 Определение средних значений и среднеквадратических отклонений всех случайных переменных должно быть основано на рекомендациях специализированной литературы, опыте и дополнительных расчетах.

10.6.5.3 Как правило, средние значения случайных переменных могут быть приняты на основании базовых параметров конструкции, указанных в проектной документации. Если отсутствует иная информация, стандартное отклонение может быть определено на основании коэффициента вариации, приведенного в таблице 9.

Таблица 9 — Случайные переменные

Переменная	Тип вероятностного распределения	Коэффициент вариации $COV = \frac{\sigma_{X_i}}{\mu_{X_i}}$
Коэффициент лобового сопротивления	Логарифмическое	0,15—0,20
Амплитуда колебаний плавучей установки	Логарифмическое	0,05—0,10
Статическое смещение плавучей установки	Нормальное	1 % от глубины воды
Жесткость грунта	Логарифмическое	0,20—0,50
Неопределенность в контактном взаимодействии райзера с грунтом (наличие траншеи, всасывающие эффекты)	Логарифмическое	0,10—0,30

Окончание таблицы 9

Переменная	Тип вероятностного распределения	Коэффициент вариации $COV = \frac{\sigma_{X_i}}{\mu_{X_i}}$
Вес райзера	Нормальное	0,05—0,10
Моделирование нагрузок от окружающей среды	Логарифмическое	0,05—0,10

10.6.5.4 В случае необходимости в перечень случайных переменных могут быть добавлены следующие:

- коррозия;
- направление плавучей установки;
- состав внутреннего флюида;
- температурное расширение;
- появления морских организмов на поверхности конструкции, находящейся под водой;
- коэффициент инерции.

10.6.6 Факторы относительной значимости

10.6.6.1 При вычислении коэффициента запаса по усталости необходимо проводить оценку относительной значимости случайных переменных, которые вносят различный вклад в неопределенность.

10.6.6.2 При определении относительной значимости случайных переменных необходимо учитывать следующие методические указания:

- идентификация ключевой случайной переменной с высоким уровнем относительной значимости и коррекция расчета с целью минимизации влияния данной переменной;
- выбор ключевой случайной переменной и по возможности снижение уровня неопределенности, связанного с данной переменной. Пересчет коэффициента запаса по усталости;
- контроль изменения выбранной случайной переменной с целью проверки превышения уровней неопределенности, связанных с данной переменной;
- проверка коэффициента запаса, так как любой большой вклад или значительный фактор относительной значимости может быть вызван ошибками в исходных данных, вероятностных моделях или вычислениях.

10.6.6.3 Факторы относительной значимости для случайных переменных I_{fact} могут быть определены по формуле

$$I_{fact} = \frac{\left(\frac{\partial X_D}{\partial X_i}\right)^2 \cdot \sigma_{X_i}^2}{\sigma_{X_D}^2}. \quad (28)$$

10.6.6.4 Фактор относительной значимости для переменной неопределенности I_{fact} модели может быть определен по формуле

$$I_{fact} = \frac{\sigma_{X_{mod}}^2}{\sigma_{X_D}^2}. \quad (29)$$

10.6.6.5 Факторы относительной значимости должны быть определены для всех случайных переменных и для переменной неопределенности модели. Факторы относительной значимости, как правило, изменяются вдоль оси райзера и должны быть вычислены для всех критических областей.

10.6.6.6 Примеры факторов относительной значимости:

- а) жесткость грунта является ключевой случайной переменной, вносящей существенный вклад в σ_{X_D} . Неопределенности, связанные с жесткостью грунта, могут быть снижены путем проведения дополнительных геотехнических исследований. Полученные уточненные данные о грунте и связанные с ними неопределенности могут быть использованы для повторной оценки требуемых коэффициентов запаса по усталости;

б) кривая S—N является ключевой случайной переменной, вносящей существенный вклад в σ_{χ_D} . Уточнения могут быть достигнуты за счет повышения качества сварных соединений, шлифовки, катодной защиты и пр.

10.6.7 Оценка соответствия коэффициентов запаса

10.6.7.1 Во избежание двойственности восприятия методических указаний настоящего стандарта в части определения коэффициентов запаса на основе анализа рисков требуется проведение независимой проверки вычисленных коэффициентов запаса независимым компетентным органом.

10.6.7.2 Независимую проверку проводят с целью минимизации ошибок при вычислении коэффициентов запаса.

10.6.7.3 Для независимой проверки в проверяющий орган передают:

- базовый усталостный расчет;
- перечень выбранных случайных переменных;
- вероятностные распределения случайных переменных;
- поверхности откликов;
- вычисленные коэффициенты запаса.

10.6.7.4 Для информации также могут быть переданы в независимый компетентный проверяющий орган проектная документация, процедура расчета усталостной прочности и отчеты по усталостным расчетам.

10.7 Коэффициенты запаса на основе расчета надежности конструкции

10.7.1 Надежность конструкции определяют вероятностью того, что сбой не произойдет в течение определенного периода времени.

10.7.2 Расчеты надежности должны быть основаны на методах 3-го уровня, в которых использована вероятность сбоя в качестве критерия и необходимы распределения всех основных переменных (см. также [1]).

10.8 Коэффициенты запаса вибраций, вызванных вихреобразованием

10.8.1 При оценке усталостных повреждений от вибраций следует учитывать неявные неопределенности, связанные с моделями расчета вибраций, вызванных вихреобразованием.

10.8.2 Критерий соответствия для усталостного повреждения вследствие вибраций, вызванных вихреобразованием, D_{VIV} может быть скорректирован по формуле

$$D_{VIV}(T_{des}) \leq \frac{\alpha}{\gamma}, \quad (30)$$

где T_{des} — расчетный срок эксплуатации, год;

α — поправочный коэффициент отклонения;

γ — коэффициент запаса по усталости.

10.8.3 Поправочный коэффициент отклонения α , учитывающий ожидаемое систематическое отклонение от истинного усталостного повреждения, определенного по применяемой методологии расчета, определяют по формуле

$$\alpha = \frac{D_{VIV}(\text{используемый метод})}{D_{VIV}(\text{натурные измерения вибраций})}. \quad (31)$$

10.8.4 Коэффициент отклонения α используемой модели вибраций, вызванных вихреобразованием, является существенным параметром, который следует оценивать для всех случаев.

10.8.5 Коэффициент запаса по усталости от вибраций, вызванных вихреобразованием, γ может быть определен на основе метода анализа рисков.

10.8.6 В дополнение списку случайных переменных, приведенных в таблице 9, могут быть добавлены следующие случайные переменные, определяющие вибрации, вызванных вихреобразованием:

- число Струхаля;
- параметры частотного диапазона;
- демпфирование;
- коэффициенты подъема;
- модели отклика (отношение диаметра к амплитуде).

11 Увеличение усталостной долговечности стальных райзеров

11.1 Эксплуатационный контроль усталости стальных райзеров

11.1.1 Усталостные расчеты с использованием кривых S—N позволяют определять наиболее вероятные области, в которых могут возникать усталостные трещины в процессе эксплуатации. Время первого технического контроля определяют, как правило, по результатам расчета роста трещины. Следующий технический контроль назначают на основании результатов первого.

11.1.2 Все данные технических проверок следует фиксировать в журнале на протяжении всего срока эксплуатации райзера. Журнал также должен включать информацию о конфигурации райзера, эксплуатационные характеристики, параметры плавучей установки, время и состояние моря для каждого режима работы.

11.1.3 Допускается проведение неразрушающего контроля райзера на месте либо на суше после демонтажа отдельных секций. Проверку рекомендуется начинать с критических областей райзера.

11.1.4 Алюминиевое покрытие райзера (при его наличии) должно быть удалено перед проведением неразрушающего контроля.

11.1.5 Не рекомендуется использовать магнитопорошковый метод, УЗК, рентгенографический контроль и метод проникающего красителя. Предпочтительным является метод вихревых токов.

11.1.6 В случае необходимости увеличения срока эксплуатации после проведения неразрушающего контроля и при отсутствии дефектов рекомендуется выполнить дополнительную шлифовку в критических областях с целью удаления каких-либо подрезов.

11.1.7 При выявлении трещин требуется провести их ремонт и выполнить повторный контроль. Срок эксплуатации должен быть скорректирован с учетом данного ремонта.

11.2 Увеличенная усталостная долговечность

11.2.1 Увеличенный срок эксплуатации T_{ext} , год, определяют по формуле

$$T_{ext} = T_{pr} + T_{res}, \quad (32)$$

где T_{pr} — предшествующий срок эксплуатации, год;

T_{res} — остаточный срок эксплуатации, год.

11.2.2 Увеличение срока эксплуатации следует рассматривать в соответствии с нормальными проектными условиями, которые использовались на начальном этапе проектирования райзера, так как:

- рабочие условия эксплуатации райзера (давление, температура, плотность флюида, перемещения плавучей установки и пр.) в течение предшествующего периода эксплуатации не превышали условий, установленных на начальном этапе проектирования;
- фактические условия окружающей среды в течение предшествующего периода эксплуатации были идентичными или менее консервативными, чем проектные условия;
- во время проверки отсутствуют дефекты (трещины) либо обнаруженные дефекты не превышают допустимых размеров;
- наличие морских организмов на поверхности конструкции, находящейся под водой, и коррозия находятся в пределах проектных условий.

11.2.3 В остальных случаях требуется проведение повторной оценки усталостной долговечности.

11.3 Повторная оценка остаточной усталостной долговечности

11.3.1 Случаи проведения повторной оценки

Повторную оценку усталостной долговечности проводят в следующих случаях:

- существуют значительные отклонения эксплуатационных условий и условий окружающей среды в течение определенного срока эксплуатации от проектных условий;
- наличие обнаруженных при проверках дефектов;
- изменения в конструкции райзера в течение определенного срока эксплуатации;
- продление срока эксплуатации.

11.3.2 Повторная оценка

При выполнении повторной оценки усталостной долговечности необходимо учитывать следующие факторы и особенности:

- незначительные отклонения/изменения конструкции;

- моделирование райзера, которое должно быть основано на проектной и конструкторской документации;
- модификации плавучей установки;
- износ и коррозия;
- обновленные эксплуатационные характеристики райзера;
- актуальные данные об окружающей среде;
- актуальные кривые S—N;
- уточненные коэффициенты запаса;
- при отсутствии коррозии допускается применять менее консервативную кривую S—N;
- результаты проверок в течение предшествующего периода эксплуатации;
- результаты оценки роста трещин в зависимости от количества циклов, размаха напряжений, типа нагрузок и возможных перераспределений напряжений.

11.3.3 Критерии соответствия

11.3.3.1 Повторная оценка усталостной долговечности может быть разделена на две фазы:

- предварительная фаза: усталостное повреждение, накопленное с момента установки до настоящего времени;
- остаточная фаза: накопление усталостного повреждения с настоящего момента.

11.3.3.2 Данные вычисления следует выполнять с учетом 11.3.2.

11.3.3.3 Критерий соответствия для повторной оценки усталостной долговечности может быть определен по формуле

$$(D_{pr} \cdot T_{pr} + D_{res} \cdot T_{res}) \cdot DFF \leq 1, \quad (33)$$

где D_{pr} — вычисленное усталостное повреждение за год в течение предшествующего периода эксплуатации;

D_{res} — вычисленное усталостное повреждение за год в течение остаточного периода эксплуатации.

Приложение А (справочное)

Оценка усталостного повреждения

А.1 Узкополосная оценка усталостного повреждения

А.1.1 Общие методические указания

Основным допущением при узкополосной оценке усталостного повреждения является то, что S могут определять на основании максимальных локальных напряжений S_a . Предполагается, что S превышает максимальное значение напряжений в два раза:

$$S = 2 \cdot S_a. \quad (\text{A.1})$$

Количество циклов за единицу времени определяют частотой пересечения нулевого значения отклика напряжений f_0 .

А.1.2 Узкополосное гауссово усталостное повреждение

Если процесс отклика напряжений является узкополосным и имеет Гауссово распределение, то распределение максимальных локальных напряжений S_a определяют с помощью плотности вероятности Рэлея по формуле

$$f_s(S_a) = \left(\frac{S_a}{\sigma^2}\right) \cdot e^{\left(\frac{-S_a^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (\text{A.2})$$

где S_a — максимальные локальные напряжения, МПа,

σ — среднеквадратическое отклонение отклика напряжений, МПа.

Для линейных кривых $S-N$ (без изменения наклона) усталостное повреждение D за единицу времени определяют по формуле

$$D = \frac{f_0}{a} \cdot (2\sqrt{2}\sigma)^m \cdot \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right), \quad (\text{A.3})$$

где Γ — гамма-функция, определяемая по формуле

$$\Gamma(\varphi) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\varphi-1} dt. \quad (\text{A.4})$$

Для билинейных кривых $S-N$ усталостное повреждение D определяют по формуле

$$D = \frac{f_0}{a_1} \cdot (2\sqrt{2}\sigma)^{m_1} \cdot G_1\left\{\left(\frac{m_1}{2} + 1\right); \left(\frac{S_{sw}}{2\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right\} + \frac{f_0}{a_2} \cdot (2\sqrt{2}\sigma)^{m_2} \cdot G_2\left\{\left(\frac{m_2}{2} + 1\right); \left(\frac{S_{sw}}{2\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right\}, \quad (\text{A.5})$$

где G_1 и G_2 — дополнительная неполная гамма-функция и неполная гамма-функция соответственно, определяемые по формулам

$$G_1(x, \varphi) = \int_x^{\infty} e^{-t} t^{\varphi-1} dt, \quad (\text{A.6})$$

$$G_2(x, \varphi) = \int_0^x e^{-t} t^{\varphi-1} dt. \quad (\text{A.7})$$

Применение данного подхода целесообразно для расчетов в частотной области, где результаты глобального расчета могут быть приведены в терминах спектральной плотности отклика напряжений $S(\omega)$.

Среднеквадратическое отклонение σ определяют по формуле

$$\sigma = \sqrt{m_0}. \quad (\text{A.8})$$

Частоту пересечения нулевого значения отклика напряжений f_0 определяют по формуле

$$f_0 = \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad (\text{A.9})$$

Спектральный момент m_n порядка n определяют по формуле

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega. \quad (\text{A.10})$$

А.1.3 Узкополосное негауссово усталостное повреждение

Для расчетов во временной области может быть использовано двухпараметрическое распределение Вейбулла — обобщенное распределение Рэлея для локальных максимумов напряжений (для негауссовых откликов напряжений). Функцию плотности вероятности Вейбулла $f_s(S_a)$ определяют по формуле

$$f_s(S_a) = \alpha^{-\beta} \cdot \beta \cdot S_a^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{S_a}{\alpha}\right)^{\beta}}. \quad (\text{A.11})$$

Параметры в распределении Вейбулла (α — параметр масштаба, β — параметр формы) связаны со статистическими параметрами $\hat{\mu}$ и $\hat{\sigma}$ по формулам:

$$\hat{\mu} = \alpha \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right), \quad (\text{A.12})$$

$$\hat{\sigma} = \alpha \cdot \sqrt{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)^2}. \quad (\text{A.13})$$

Для билинейных кривых S—N усталостное повреждение D может быть выражено по формуле

$$D = \frac{f_0}{a_1} \cdot (2\alpha)^{m_1} \cdot G_1\left\{\left(\frac{m_1}{\beta} + 1\right); \left(\frac{S_{sw}}{2\alpha}\right)^{\beta}\right\} + \frac{f_0}{a_2} \cdot (2\alpha)^{m_2} \cdot G_2\left\{\left(\frac{m_2}{\beta} + 1\right); \left(\frac{S_{sw}}{2\alpha}\right)^{\beta}\right\}. \quad (\text{A.14})$$

А.2 Широкополосная оценка усталостного повреждения

А.2.1 Общие положения

Отклик напряжений морских райзеров, как правило, не является ни узкополосным, ни полностью широкополосным. Для широкополосного отклика не существует строгой зависимости между циклами напряжений и максимальными или минимальными значениями напряжений. В связи с этим для получения усталостного повреждения на основании широкополосного процесса существуют следующие процедуры:

- алгоритмы подсчета циклов;
- полуэмпирические решения;
- упрощенные аналитические решения.

Широкополосную оценку усталости, как правило, применяют при оценке усталости от комбинированного отклика на напряжения с частотой волны или от низкочастотных напряжений.

А.2.2 Подсчеты циклов

Рекомендуемым методом подсчета количества циклов напряжений является метод «дождя». Данный метод дает оценку плотности вероятности напряжений [т. е. оценку $f_s(S)$ и среднее количество циклов за единицу времени].

Методы подсчета циклов позволяют получить оценку усталостных повреждений во временной области. В связи с этим при оценке существуют статистические неопределенности, для минимизации которых рекомендуется проводить исследования чувствительности результатов. Непременно должна быть выполнена оценка чувствительности для случаев с комбинированными колебаниями с частотой волны и низкочастотных колебаний или при использовании кривых S—N с большим наклоном. Также с целью минимизации статистических неопределенностей для случаев значительных периодов низкочастотных колебаний плавучей установки рекомендуется применять более длительное моделирование.

А.2.3 Полуэмпирические решения

Полуэмпирическое решение основано на предположении о том, что истинное повреждение D_{RCF} , полученное с помощью подсчета количества циклов методом «дождя», может быть вычислено по результатам узкополосной оценки по формуле

$$D_{RCF} = D_{NB} \cdot k_{RFC}, \quad (\text{A.15})$$

где D_{NB} — узкополосное гауссово усталостное повреждение;

k_{RFC} — поправочный коэффициент.

Поправочный коэффициент k_{RFC} может быть определен по формуле

$$k_{RFC}(m) = a + (1 - a) \cdot (1 - \varepsilon)^b, \quad (\text{A.16})$$

где $a = 0,926 - 0,033, m$;

$b = 1,587 - 2,323, m$;

ε — параметр ширины полосы ($\varepsilon = 1$ для широкополосного процесса, $\varepsilon = 0$ для узкополосного процесса), определяемый по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}. \quad (\text{A.17})$$

Усталостное повреждение $\bar{D}$ может быть определено по формуле

$$\bar{D} = \frac{T}{2\pi\bar{a}} \cdot (2\sqrt{2})^m \cdot \Gamma\left(\frac{m}{2} + 1\right) \cdot \left(\frac{\lambda_2}{m}\right)^{\frac{m}{2}}, \quad (\text{A.18})$$

где T — продолжительность, год;

$\bar{a}$ — параметр, характеризующий пересечение расчетной кривой S—N с осью $\log N$;

m — параметр, характеризующий обратный наклон расчетной кривой S—N.

Количество циклов до отказа N определяют по формуле

$$N = \bar{a} \cdot S^{-m}, \quad (\text{A.19})$$

где S — размах напряжений, МПа.

Единичный момент спектральной плотности напряжений $\frac{\lambda_2}{m}$ определяют по формуле

$$\frac{\lambda_2}{m} = \int_0^{\infty} \omega^m G(\omega) d\omega, \quad (\text{A.20})$$

где ω — частота, Гц;

$G(\omega)$ — спектральная плотность размаха напряжений.

А.3 Упрощенный метод расчета усталостных повреждений

А.3.1 Общие положения

В общем случае усталостное повреждение обусловлено различными динамическими процессами. В качестве примера выступают усталостные повреждения от нагрузок с частотой волны и низкочастотных нагрузок.

В некоторых случаях допускается проводить отдельные расчеты для данных процессов. В частности, усталостные повреждения от вибраций, вызванных вихреобразованием, рассчитывают отдельно.

Простое суммирование повреждений по правилу Пальмгрена—Майнера может быть неконсервативным. Консервативная методология расчета в настоящем разделе основана на информации о частоте пересечения нулевого значения отклика напряжений каждого из рассматриваемых процессов.

А.3.2 Результирующее усталостное повреждение на основании линейной кривой S—N

Несущая способность по усталости при использовании линейных кривых S—N (без изменения наклона) может быть выражена двумя эквивалентными формулами:

$$\log N = \log \bar{a} - m \cdot \log S, \quad (\text{A.21})$$

$$N = \bar{a} \cdot S^{-m}, \quad (\text{A.22})$$

где $\bar{a}$ — параметр, характеризующий пересечение кривой S—N с осью $\log N$;

m — параметр, характеризующий обратный наклон кривой S—N;

S — размах напряжений, МПа.

Усталостное повреждение D_i рассчитывают по правилу Пальмгрена—Майнера по формуле

$$D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i}. \quad (\text{A.23})$$

Количество циклов, связанных с частотой пересечения нулевого значения v_i , определяют по формуле

$$n_i = v_i T_d, \quad (\text{A.24})$$

где T_d — расчетный срок эксплуатации, с.

Формула (A.23) с учетом формул (A.21), (A.22) и (A.24) принимает следующий вид:

$$D_i = \frac{v_i T_d (S_i)^m}{\bar{a}}. \quad (\text{A.25})$$

Размах напряжений S_i определяют по формуле

$$S_i = \left(\frac{D_i \bar{a}}{v_i T_d} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (\text{A.26})$$

Пример высокочастотного отклика, низкочастотного отклика и их комбинации приведен на рисунке А.1.

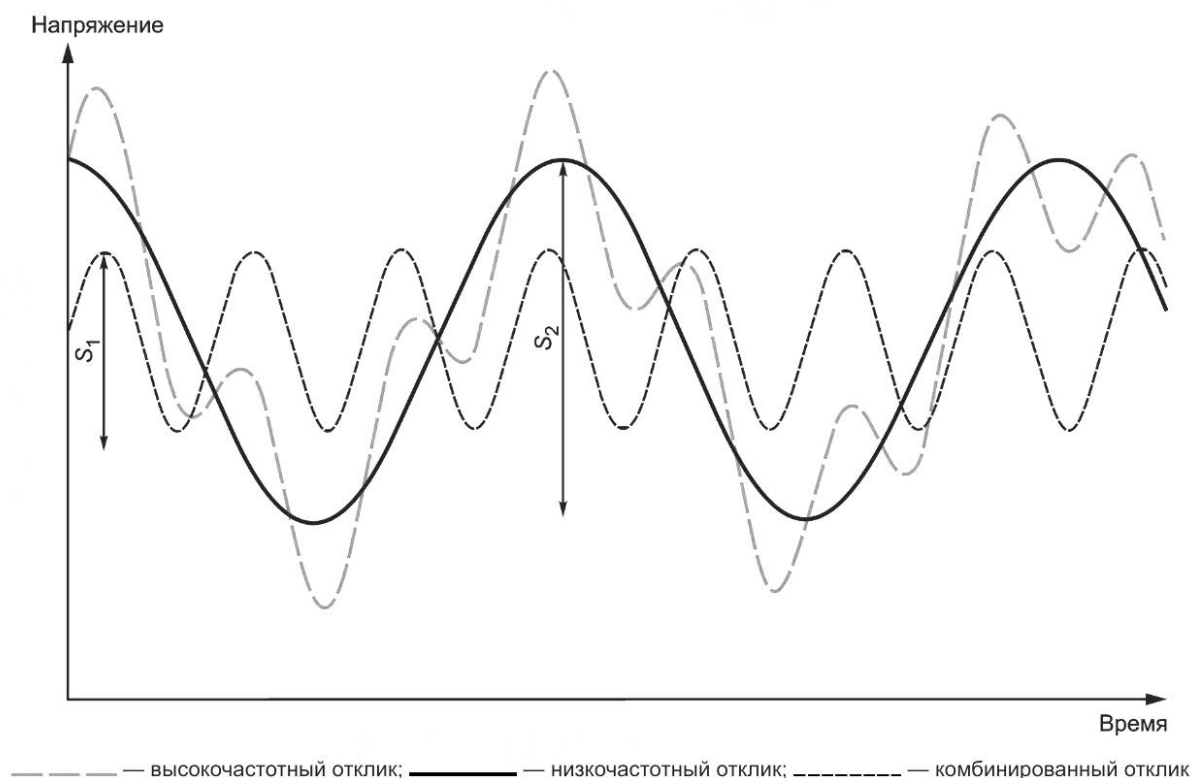


Рисунок А.1 — Пример откликов

Усталостное повреждение D для данного примера может быть определено по формуле

$$D = D_1 + D_2 \left(\frac{S_1 + S_2}{S_2} \right)^m - D_1 \frac{n_2}{n_1}, \quad (\text{A.27})$$

- где D_1 — расчетное усталостное повреждение для высокочастотного отклика;
 D_2 — расчетное усталостное повреждение для низкочастотного отклика;
 S_1 — характерный размах напряжений для высокочастотного отклика, МПа;
 S_2 — характерный размах напряжений для низкочастотного отклика, МПа;
 n_1 — количество циклов для высокочастотного отклика;
 n_2 — количество циклов для низкочастотного отклика.

Увеличенное значение усталостных повреждений для низкочастотного отклика в формуле (А.27) (второе слагаемое) получено из предположения, что высокочастотный отклик накладывается на низкочастотный для получения цикла с размахом напряжений $S_1 + S_2$. При этом количество циклов, равное n_2 , с размахом напряжений S_1 уже учтено во втором слагаемом формулы (А.27), поэтому необходимо его исключить путем добавления третьего слагаемого.

Характерные напряжения в формуле (А.27) могут быть получены по формуле (А.26). В этом случае усталостное повреждение D для данного примера может быть определено по формуле

$$D = D_1 \left(1 - \frac{v_2}{v_1} \right) + v_2 \left\{ \left(\frac{D_1}{v_1} \right)^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{D_2}{v_2} \right)^{\frac{1}{m}} \right\}^m, \quad (\text{A.28})$$

- где v_1 — средняя частота пересечения нулевого значения напряжениями высокочастотного отклика, Гц;
 v_2 — средняя частота пересечения нулевого значения напряжениями низкочастотного отклика, Гц.

Предложенный подход и формула (А.28) могут быть применены в расчетах с использованием билинейных кривых S—N.

А.4 Особенности усталостной долговечности

А.4.1 Способы повышения усталостной долговечности

В общем случае повышение усталостной долговечности может быть достигнуто за счет изменения конструкции, усовершенствования процессов изготовления и в некоторых случаях посредством использования усовершенствованных методов расчета.

Проектирование:

- для сварных швов типа «а», приведенных на рисунке А.2, допускается использовать менее консервативные кривые S—N и низкие коэффициенты концентрации, так как данные швы выполняются на суше, имеют высокое качество и обработку. Для сварных швов типа «б», приведенных на рисунке А.2, допустимы низкие коэффициенты концентрации за счет увеличенной толщины несмотря на то, что сварка соседних секций райзера проведена на шельфе (на борту баржи);

- использование оптимальной толщины стенки;
- учет дополнительной плавучести;
- оптимизация угла подвешивания;
- внесение изменений в верхнее натяжение.

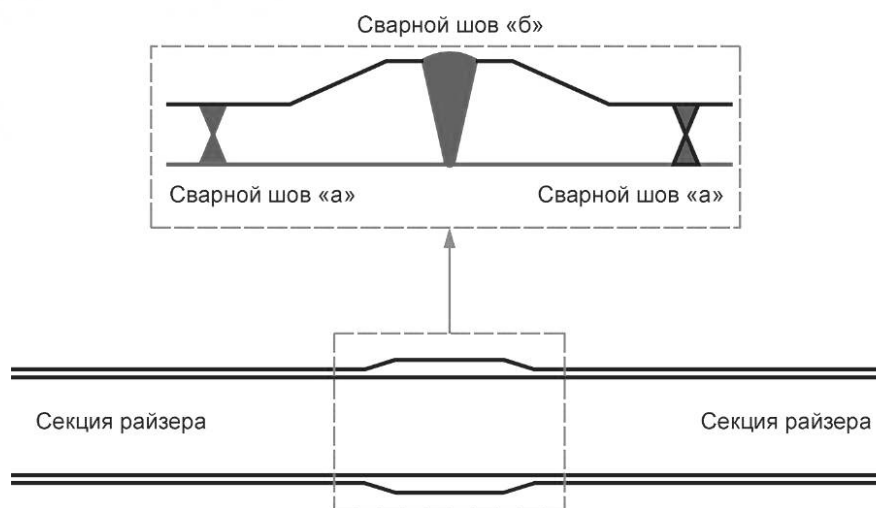


Рисунок А.2 — Примеры сварных швов райзера

Изготовление:

- покрытие внутренней поверхности трубы коррозионно-стойким металлом с целью увеличения долговечности корня сварного шва основного металла;
- защита от коррозии наружной поверхности трубы, например с помощью катодной защиты;
- шлифование сварных швов с целью повышения усталостной долговечности.

Уточненный расчет:

- уточненные расчеты дают более точную оценку прогнозируемой долговечности. Полученная долговечность может быть неповышенной;
- усталостная долговечность может быть получена с использованием расчета во временной области для комбинации нагрузок с частотой волны и низкочастотных нагрузок. Подсчет количества циклов выполняют методом «дождя»;
- связанный расчет, учитывающий плавучую установку, райзеры и швартовые линии, позволяет получить более точные результаты усталостной долговечности;
- учет эффектов распространения волн и точное описание течений обеспечивают более реалистичную оценку усталостной долговечности;
- применение запасов, полученных на основе анализа рисков.

А.4.2 Усталостные повреждения в зоне касания морского дна

Расчет усталостного повреждения для зоны касания райзером морского дна может быть уточнен, если учесть отклонения точки касания в глобальном расчете. Корректный учет отклонения точки касания в процессе эксплуатации райзера может снизить усталостные повреждения от действия нагрузок с частотой волны, низкочастотных нагрузок и вибраций, вызванных вихреобразованием.

Факторы, влияющие на изменение точки касания:

- ветровые нагрузки, волновые нагрузки 2-го порядка и нагрузки от течений, действующие на плавучую установку;

- изменения осадки плавучей установки;
- прямые нагрузки от течений, действующие на райзер;
- изменение расположения плавучей установки во время эксплуатации;
- долговременное изменение плотности внутреннего флюида;
- изменения массы райзера;
- взаимодействие райзера и грунта морского дна.

А.5 Графики коэффициентов запаса на основе анализа рисков

Зависимости коэффициентов запаса, полученных для билинейных кривых S—N из различных классов безопасности, и $\sigma_{X_a} = 0,2$ приведены на рисунках А.3—А.6.

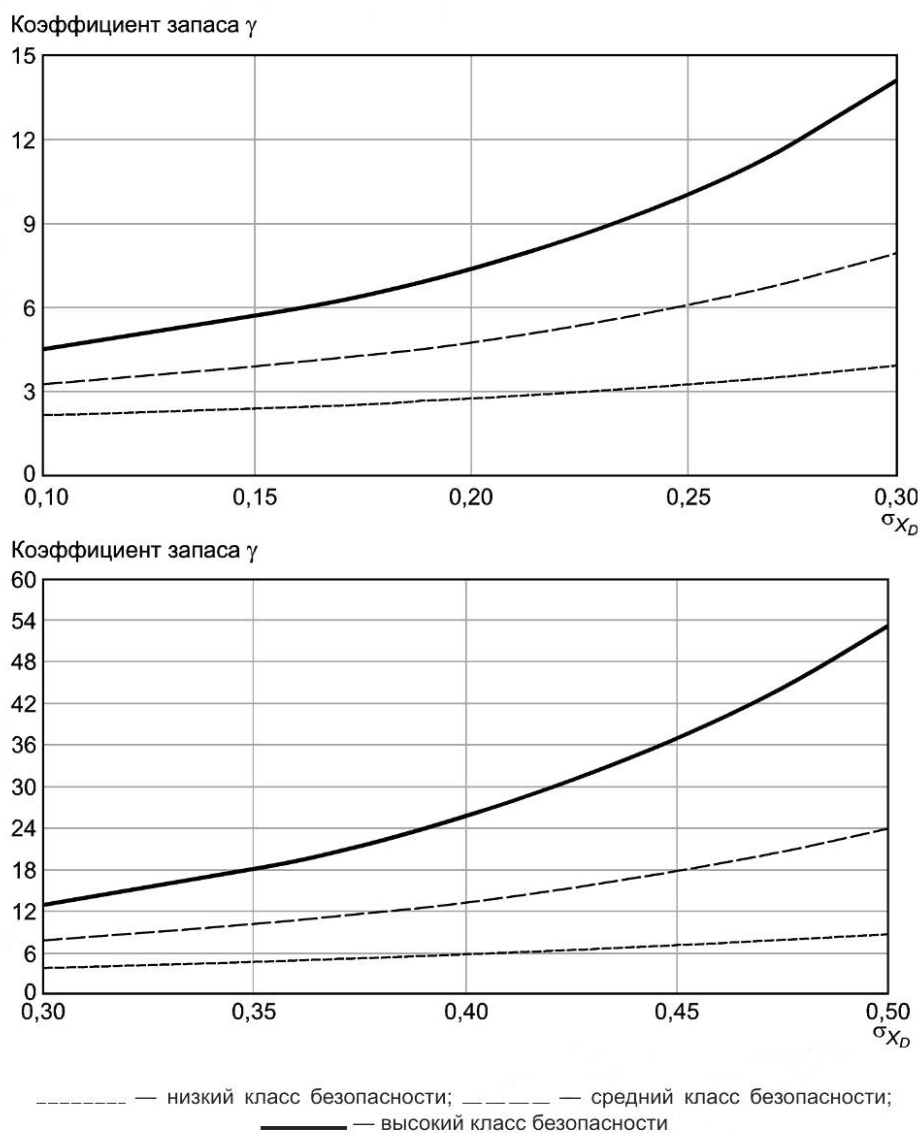


Рисунок А.3 — Расчетный срок эксплуатации 15 лет

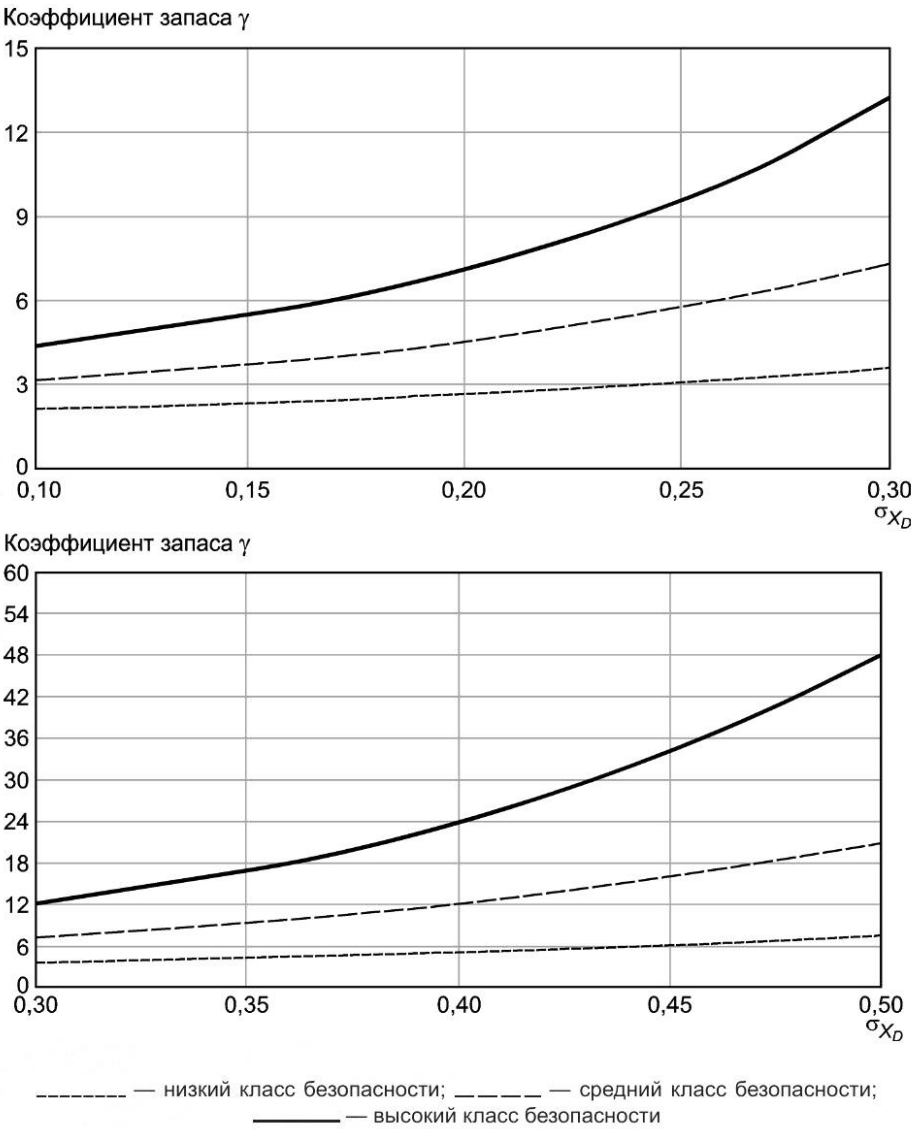


Рисунок А.4 — Расчетный срок эксплуатации 20 лет

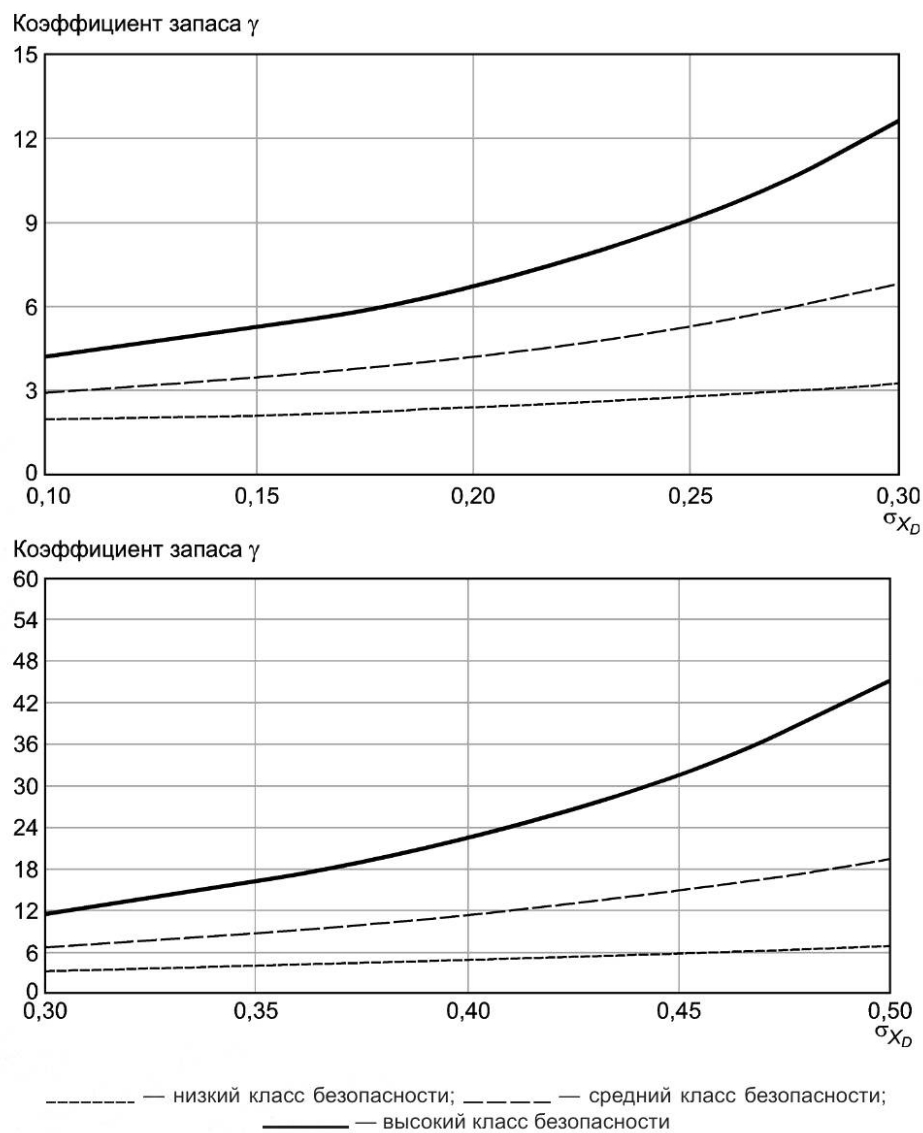


Рисунок А.5 — Расчетный срок эксплуатации 25 лет

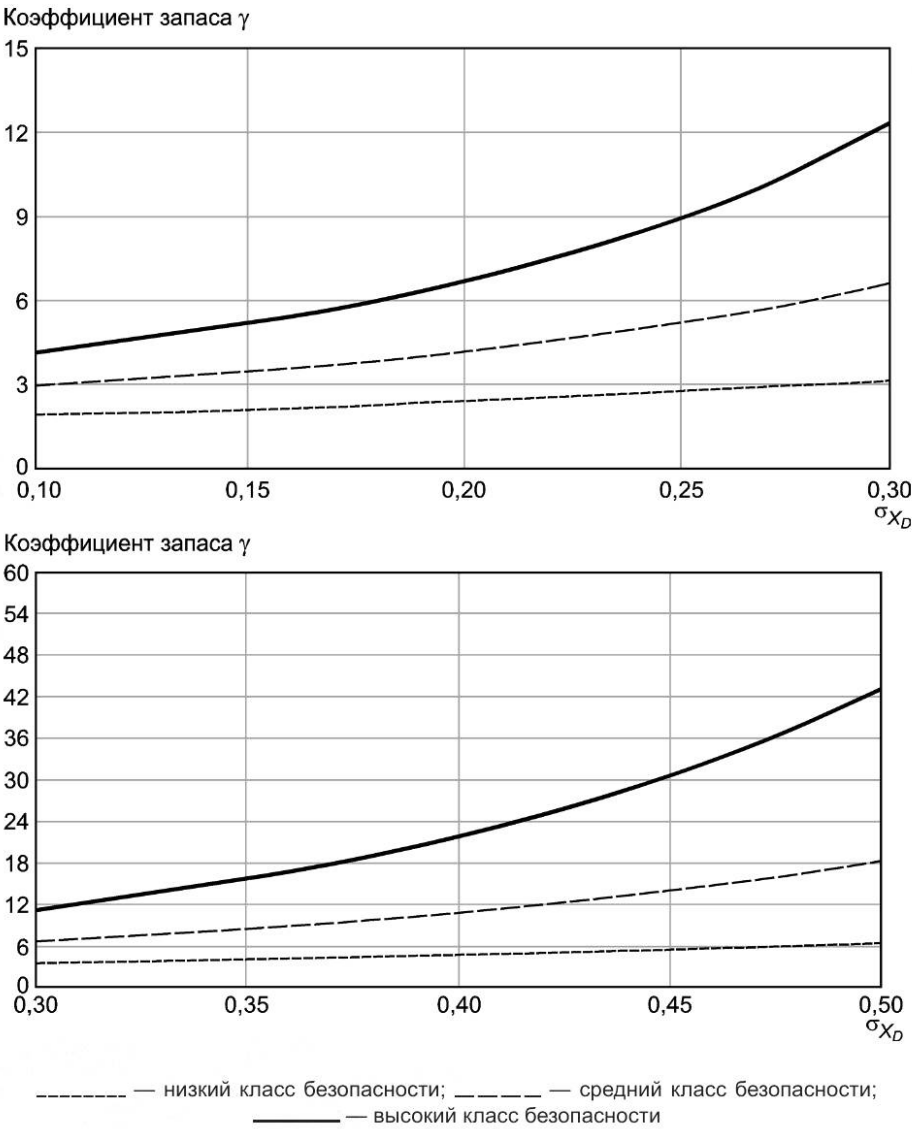


Рисунок А.6 — Расчетный срок эксплуатации 30 лет

**Приложение Б
(справочное)****Определение расчетных кривых S—N****Б.1 Область применения**

В настоящем приложении приведены методические указания по определению расчетных кривых S—N и средних напряжений для армирующей проволоки гибких труб, находящихся под действием растягивающих нагрузок и внутреннего давления.

Расчетные кривые S—N определяют как кривые с вероятностью 97,7 % от долговечности и с доверительным интервалом не менее 75 % на основании результатов испытаний в предположении нормального распределения количества циклов до отказа.

Вероятность 97,7 % от долговечности эквивалентна среднему значению минус два стандартных среднеквадратических отклонения.

Б.2 Подготовка образцов**Б.2.1 Проверка происхождения материала**

При выборе образца проволоки для испытаний должны быть учтены история деформирования и наличие остаточных напряжений.

Также необходимо учитывать влияние процесса изготовления, которое также может оказать влияние на усталостные характеристики материала.

Информация о проволоке, которая должна быть записана, включает в себя:

- характеристики материала;
- производственную партию;
- термическую обработку;
- механическую обработку (намотка, выпрямление, предварительное растяжение) как образца, так и самой проволоки;
- механические свойства;
- уровень остаточных напряжений;
- тип образца;
- режим нагружения;
- тип разрушения (полное, частичное, образование трещины, снижение жесткости);
- среду испытания (воздух, коррозионная среда, температура, влажность, частота испытаний);
- температуру образца;
- место хранения.

Б.2.2 Выпрямление и удлинение

При изготовлении образцов намотанную на катушку проволоку требуется предварительно вытянуть.

Допустимый уровень остаточных напряжений допускается принимать менее 10 % от предела текучести материала. Практически подтверждено, что для достижения данных остаточных напряжений достаточно предварительного удлинения порядка 1 %.

Выпрямление должно выполняться таким образом, чтобы обеспечить однородный уровень деформаций по длине.

Б.2.3 Форма и механическая обработка образцов

Образец должен иметь форму, обеспечивающую отказ в испытательной рабочей области образца, а не в зоне захвата.

Обработка поверхности образца оказывает существенное влияние на усталостные характеристики. Рекомендуется подготавливать поверхность образца для максимального соответствия реальной проволоке.

Б.3 Нагружение**Б.3.1 Общие положения**

При разработке кривых S—N растягивающую нагрузку, как правило, считают более консервативной, чем изгибающая для образцов с поверхностью, соответствующей реальной проволоке.

Однако если поверхность образца не соответствует реальной, то изгибающая нагрузка может быть более консервативной, чем растягивающая. В общем случае рекомендуется проводить испытания на изгибающие нагрузки.

Б.3.2 Изгибающее нагружение

Рекомендуется применять четырехточечную схему нагружения образца для получения постоянного изгибающего момента между внутренними точками.

Нагружение рекомендуется проводить с контролем нагрузки, а не перемещений или деформаций.

Б.3.3 Растягивающее нагружение

Данные испытания рекомендуется проводить с контролем растягивающей нагрузки.

При испытании образцов, имеющих кривизну после первоначального выравнивания, требуется оценивать вторичный изгиб, вызванный растяжением. Если вторичный изгиб составляет более 5 %, необходимо выполнять корректировку захватов и/или кривизны образца.

Б.3.4 Соотношение напряжений и средние напряжения

Усталостные испытания могут быть выполнены при постоянном отношении напряжений цикла $R = \sigma_{\min} - \sigma_{\max}$ или при постоянном среднем значении напряжений цикла.

Для получения кривых S—N, как правило, используют испытания при постоянном отношении напряжений цикла R .

Если уровень остаточных напряжений в образце неизвестен, то рекомендуется проводить испытания с высоким значением R /средних напряжений цикла.

Б.4 Среда испытаний

Испытания в воздушной среде проводят, как правило, при температуре окружающей среды от 15 °С до 35 °С.

Температура и влажность окружающей среды должны быть записаны.

Принято считать, что усталостные характеристики образца при испытании в воздушной среде не зависят от частоты нагружения. В случае нагрева образца выше температуры 35 °С при высокочастотных испытаниях необходимо либо снизить частоту нагружения, либо предусмотреть меры по охлаждению образца.

Если необходимо проводить испытания при определенной температуре, требуется предусмотреть меры по измерению температуры образца.

Б.4.1 Испытания в коррозионной среде

Наличие различных видов окружающей среды в затрубном пространстве гибких труб может оказывать существенное влияние на усталостные характеристики армирующей проволоки.

Если определены ожидаемые условия окружающей среды в затрубном пространстве, то усталостные испытания необходимо проводить в данной среде.

Также в затрубное пространство может поступать вода как через внутреннюю оболочку (конденсироваться на стенках), так и через внешнюю оболочку (при повреждении). Наличие воды также необходимо учитывать при усталостных испытаниях.

Б.4.2 Наличие кислорода

Кислород, как правило, отсутствует в окружающей среде затрубного пространства. В связи с этим в рамках лабораторных испытаний требуется предусмотреть ряд мер для корректного учета данного аспекта:

- все растворы для испытаний должны быть деаэрированы;
- уровень кислорода следует контролировать в процессе испытания.

Б.4.3 Защитная стальная оболочка

Образец стальной проволоки должен находиться в испытательном стенде (стальной оболочке), в который(ую) подается окружающая среда затрубного пространства. Для наибольшего соответствия реальным условиям рекомендуется выбирать отношение объема раствора к площади поверхности оболочки, равное 1 мл/см².

Б.4.4 Частота нагружения

Частота нагружения может оказывать существенное влияние на усталостную долговечность, поскольку механизм коррозионной усталости может включать ряд зависящих от времени процессов (анодное растворение, поглощение, диффузия и пр.). В связи с этим частоту нагружения рекомендуется выбирать максимально соответствующей ожидаемым условиям нагружения (например, 0,1—1 Гц для волновых нагрузок или нагрузок от вибраций, вызванных вихреобразованием).

Б.5 Запись результатов

Б.5.1 Общая информация

Все особенности образца и условия испытаний должны быть записаны. Результаты испытаний принято записывать в таблицу, а также отражать на диаграмме в осях « $\log(\Delta\sigma) - \log(N)$ ». Тип нагружения и тип разрушения также должны быть зафиксированы.

Б.5.2 Критерии разрушения

Критерии разрушения должны быть сформулированы и записаны в таблице результатов. В зависимости от режима нагружения критерии разрушения могут быть различными:

- в случае контролируемой нагрузки в качестве критерия принимают полное разрушение образца. При этом образование первой трещины также должно быть записано;
- при контролируемом перемещении/деформации в качестве критерия принимают образование первой трещины или снижение жесткости.

Место образования трещины рекомендуется регистрировать фотографией высокого разрешения.

Должна быть записана следующая информация:

- место образования трещины (на захвате или на свободной длине образца);
- обработка поверхности, на которой образовалась трещина (первоначальная или обработанная);
- наличие механического повреждения, на котором образовалась трещина;
- образование трещины внутри материала или на поверхности;
- образование трещины в углу заготовки или в области другого геометрического перехода.

Б.5.3 Среда испытания

Должны быть записаны следующие данные, касающиеся среды испытания:

- химический состав;
- отношение объема раствора к площади поверхности стальной оболочки;
- содержание растворенного кислорода;
- испытательные температура и давление;
- измерения кислотности раствора;
- частота циклического нагружения для длительных испытаний.

Б.6 Определение расчетной кривой S—N**Б.6.1 Диапазон циклов**

Для гибких труб, как правило, испытания проводят в диапазоне многоциклового усталости (10^4 — 10^7 циклов). Рекомендуется провести испытания как минимум для четырех уровней напряжений для получения распределения усталостных характеристик. Количество испытательных образцов принять не менее 30.

При необходимости рекомендуется проводить испытания образцов различных размеров и/или изготовленных различными производителями.

Б.6.2 Первоначальная оценка данных испытаний

При построении графика кривой S—N на основании данных испытаний, как правило, получают линейную зависимость с некоторой степенью разброса. Однако в редких случаях могут быть результаты, значительно отличающиеся от остальных. Данные результаты принято называть выбросами. Выбросы, выделяющиеся из общей выборки данных, могут существенно повлиять на наклон кривой S—N.

Основные источники возникновения выбросов:

- качество образца (наличие дефектов и примесей);
- ошибки в измерении/определении размахов напряжений и количества циклов до отказа.

Выбросы следует исключать из рассмотрения при построении кривой S—N. Перед исключением необходимо убедиться в том, что полученный результат является выбросом, проверив следующее:

- условия испытания корректны; отсутствие ошибок измерения, калибровки, эксперимента; исправность оборудования;
- отсутствие деформации образца, поверхностных царапин и пр.

Для определения выброса можно провести статистическое испытание Стефанского. Рассматривают результаты испытаний с одним уровнем напряжения, как и предполагаемый выброс. Например, для n различных переменных $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ среднее значение определяют по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad (\text{Б.1})$$

Максимальную нормированную невязку MNR определяют по формуле

$$MNR = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (\text{Б.2})$$

Если величина MNR для x_1 , например, превышает пороговое значение MNR_T , полученное при уровне значимости $\alpha = 1\%$, то x_1 является выбросом:

$$MNR > MNR_T. \quad (\text{Б.3})$$

Пороговые значения MNR_T приведены в таблице Б.1.

Т а б л и ц а Б.1 — Пороговые значения MNR_T

n	MNR_T при $\alpha = 1\%$	n	MNR_T при $\alpha = 1\%$	n	MNR_T при $\alpha = 1\%$
3	0,817	11	0,786	19	0,673
4	0,861	12	0,769	20	0,662
5	0,875	13	0,753	22	0,641
6	0,869	14	0,737	24	0,623
7	0,856	15	0,723	26	0,606
8	0,839	16	0,709	28	0,590
9	0,821	17	0,696	30	0,576
10	0,803	18	0,684	—	—

При необходимости определения выброса для некоторого набора точек при заданном уровне напряжений может быть использовано испытание Стьюдента. Испытание проводят как для среднеквадратических отклонений, так и для средних.

Проверка однородности среднеквадратических отклонений F позволяет сравнить набор точек и кривую S—N и выполняется по формуле

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}, \quad (\text{Б.4})$$

где σ_1 — оценка остаточного среднеквадратического отклонения кривой S—N, полученное для $f_1 = n_1 - 2$ количества точек, МПа;

n_1 — количество точек для построения кривой S—N;

σ_2 — оценка остаточного среднеквадратического отклонения набора точек, полученное для $f_2 = n_2 - 2$, МПа.

В числителе формулы (Б.4) принимают наибольшее из двух среднеквадратических отклонений.

Оценку остаточного среднеквадратического отклонения кривой S—N выполняют по формуле

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} (\log(N_i) - \overline{\log(N_i)})^2}{f_1}}, \quad (\text{Б.5})$$

где $\log(N_i)$ — логарифм усталостной долговечности;

$\overline{\log(N_i)}$ — среднее значение усталостной долговечности.

Критерий сравнения при некотором заданном уровне значимости α , %, определяют по формуле

$$F \leq F_{f_1}^{f_2}, \quad (\text{Б.6})$$

где $F_{f_1}^{f_2}$ — табличное значение распределения F .

Общее среднеквадратическое отклонение σ определяют по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{f_1 \sigma_1^2 + f_2 \sigma_2^2}{f_1 + f_2}}. \quad (\text{Б.7})$$

Проверка однородности средних позволяет сравнить набор точек и кривую S—N и выполняется с использованием статистического параметра T , определяемого по формуле

$$T = \frac{|m_1 - m_2|}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (\text{Б.8})$$

где m_1 — логарифм срока эксплуатации из кривой S—N;

m_2 — логарифм срока эксплуатации из набора точек при заданном уровне напряжений.

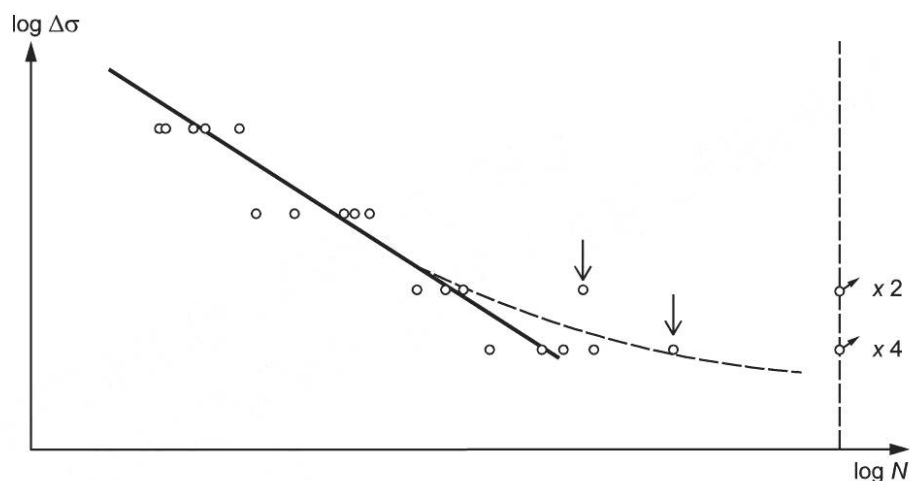
Критерий сравнения при некотором заданном уровне значимости α , %, определяют по формуле

$$T \leq T_{f_1+f_2}, \quad (\text{Б.9})$$

где $T_{f_1+f_2}$ — табличное значение распределения Стьюдента.

Пример результатов испытаний на усталость приведен на рисунке Б.1.

Испытания выполнены для четырех различных уровней напряжений (см. рисунок Б.1). Выбросы, отмеченные стрелками, наблюдаются на двух уровнях напряжений с наименьшей величиной.



x 2 — выброс при испытаниях на втором уровне напряжений; x 4 — выброс при испытаниях на четвертом уровне напряжений

Рисунок Б.1 — Пример результатов испытаний

Б.6.3 Построение кривых S—N для нагружения с постоянной амплитудой

Расчетные кривые S—N определяют как кривые с вероятностью 97,7 % от долговечности. Расчетные кривые S—N следует оценивать с доверительным интервалом не менее 75 % на основании результатов испытаний. При определении расчетных кривых S—N выбросы не учитывают.

Средняя кривая S—N может быть определена уравнением

$$\log N = \log a - m \cdot \log \Delta \sigma, \quad (\text{Б.10})$$

где N — расчетное количество циклов до отказа;

$\Delta \sigma$ — размах напряжений, МПа;

a — параметр, характеризующий пересечение средней кривой S—N с осью $\log N$;

m — параметр, характеризующий обратный наклон средней кривой S—N.

Величины m и a получают с помощью регрессионного анализа данных испытаний на усталость.

Параметр расчетной кривой $\log \bar{a}$ может быть определен по формуле

$$\log \bar{a} = \log a - c \cdot S_{\log N}, \quad (\text{Б.11})$$

где $\bar{a}$ — параметр, характеризующий пересечение расчетной кривой S—N с осью $\log N$;

$S_{\log N}$ — среднеквадратическое отклонение данных испытания, получаемое при проведении регрессионного анализа, МПа;

c — коэффициент, зависящий от количества испытаний и уровня достоверности.

Значения коэффициента c при уровне достоверности 75 % приведены в таблице Б.2.

Т а б л и ц а Б.2 — Значения коэффициента c

Количество испытаний	c	Количество испытаний	c
4	3,96	18	2,48
6	3,12	20	2,44
8	2,86	25	2,39
10	2,71	30	2,35
12	2,63	40	2,29
14	2,56	50	2,26
16	2,51	—	—

Б.6.4 Построение кривых S—N для нагружения с переменной амплитудой

Примеры построения расчетных кривых S—N при переменных амплитудах в воздушной среде и в коррозионной среде приведены на рисунках Б.2 и Б.3 соответственно.

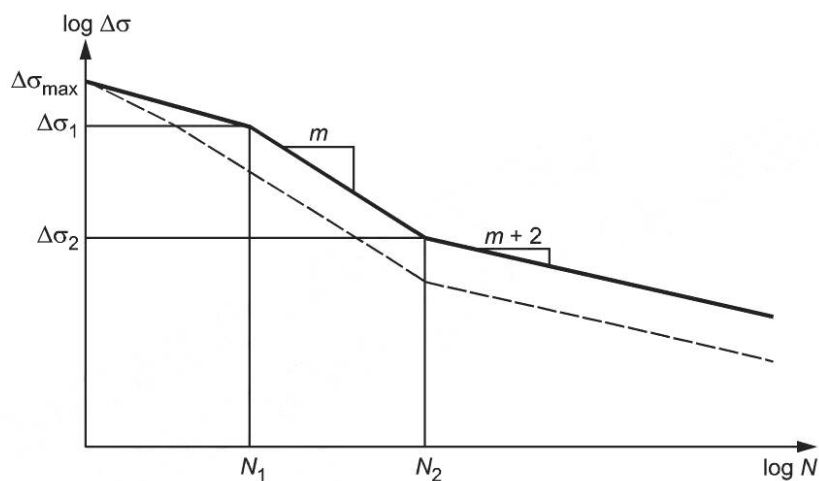


Рисунок Б.2 — Пример кривой S—N в воздушной среде

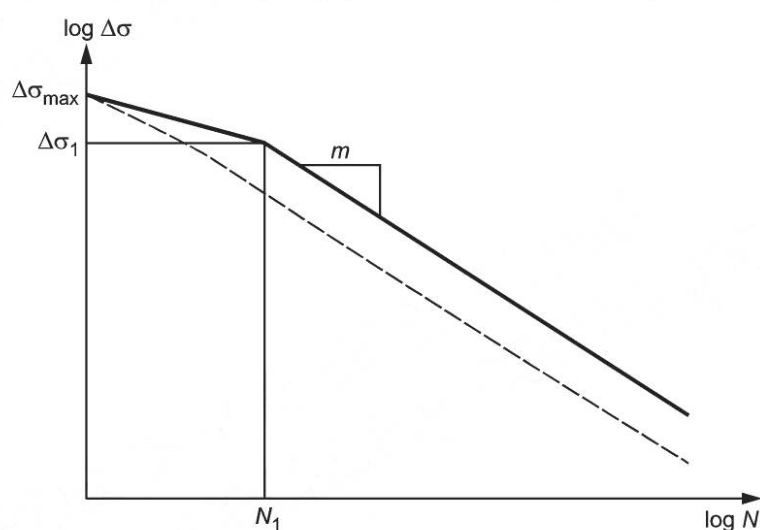
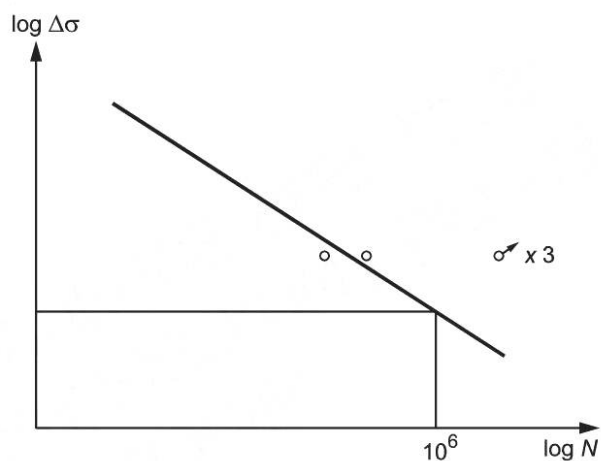


Рисунок Б.3 — Пример кривой S—N в коррозионной среде

Кривая между точками N_1 и N_2 на рисунке Б.2 соответствует кривой, полученной при постоянной амплитуде. Угол наклона расчетной кривой S—N в коррозионной среде после значения N_2 не изменяется.

N_1 определяют как количество циклов средней кривой при наиболее высоком размахе напряжений $\Delta\sigma_1$. При этом наибольшее напряжение цикла не должно превышать 90 % от предела прочности материала.

N_2 , как правило, принимают 10^6 , так как после данного количества циклов происходит наибольшее количество выбросов (см. рисунок Б.4).



x 3 — выброс при испытаниях на третьем уровне напряжений

Рисунок Б.4 — Пример появления выбросов

Б.6.5 Модель учета средних напряжений

Средние напряжения оказывают существенное влияние на усталостную долговечность и должны быть учтены при оценке усталости.

Пример модели учета средних напряжений приведен на рисунке Б.5. По оси абсцисс отложены средние напряжения, по оси ординат — размах напряжений. Величина $\Delta\sigma_{W,N}$ характеризует усталостную прочность при нулевых средних напряжениях, величина $SMTS$ — предел прочности материала при растяжении.

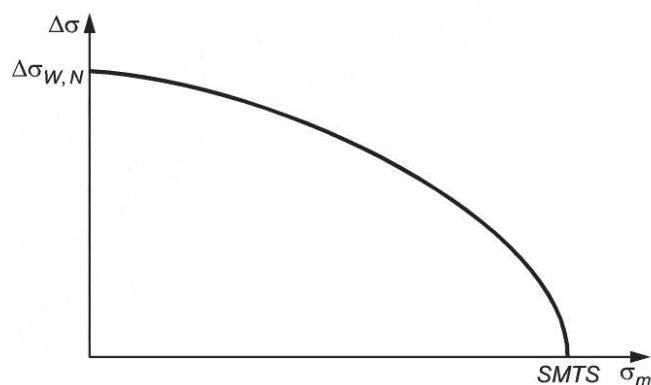


Рисунок Б.5 — Диаграмма предельных амплитуд

Модель учета средних напряжений выбирают на основании ряда испытаний с различными значениями R или средних напряжений. Пример комбинаций средних напряжений и размаха напряжений приведен на рисунке Б.6.

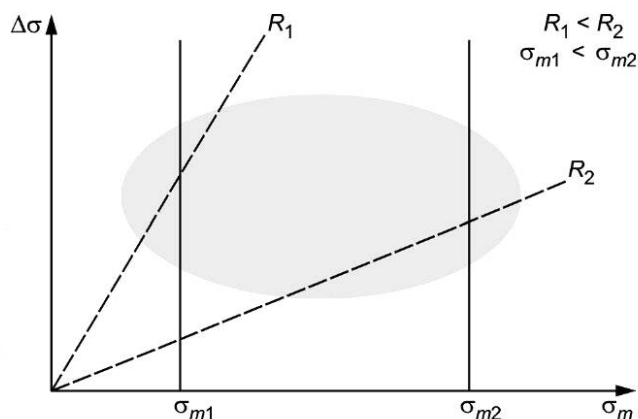


Рисунок Б.6 — Пример комбинации средних напряжений и размахов

Приложение В (справочное)

Упрощенный метод оценки повреждений

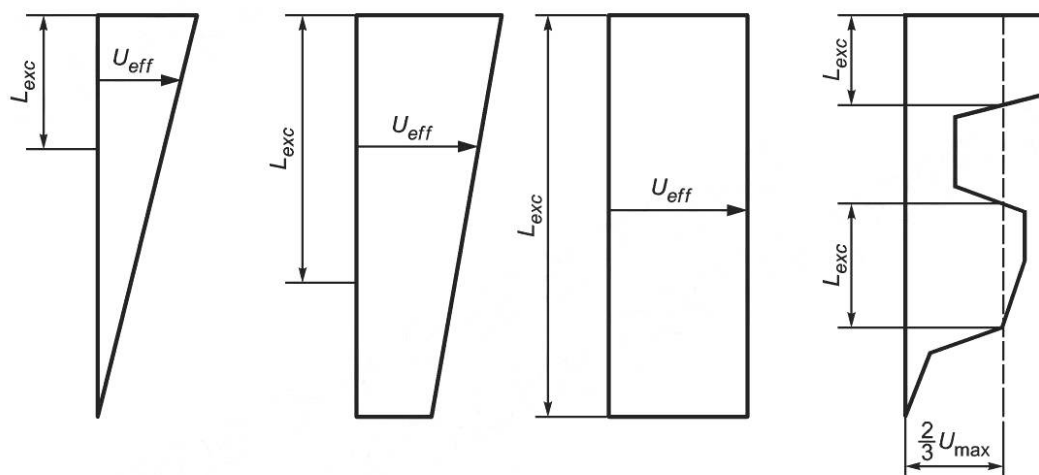
В.1 Общие сведения

В настоящем приложении приведены общие методические указания по выполнению упрощенной оценки повреждений, вызванных вибрациями от вихреобразований. Данный подход допускается применять на ранних этапах проектирования.

В.2 Описание методологии

Определяют формы участвующих мод и их собственные частоты:

- частоты и формы в продольном и поперечном направлениях на основе аналитических вычислений или по результатам численного расчета;
- характерную эффективную скорость и соответствующую длину возбуждения. Если диаметр райзера является постоянным, то длина возбуждения может быть принята как часть райзера, на которой скорость выше $2/3$ от максимальной скорости, как показано на рисунке В.1;



L_{exc} — длина возбуждения; U_{eff} — эффективная скорость потока; U_{max} — максимальная скорость потока

Рисунок В.1 — Примеры профиля скорости и длины возбуждения

- эффективную скорость потока U_{eff} , вычисляемую как средняя скорость по длине райзера по формуле

$$U_{eff} = \frac{1}{L_{exc}} \int_{L_{exc}} U(z) dz; \quad (B.1)$$

- если рассчитанная длина возбуждения составляет менее 10 % от длины райзера, то вибрации от вихреобразований для данной скорости возникать не будут. В этом случае необходимо пересчитать эффективную скорость, исключив вклад наиболее высоких скоростей профиля;

- частоту вихревого потока f_s , вычисляемую по формуле

$$f_s = S_{t,eff} \frac{U_{eff}}{D_h}, \quad (B.2)$$

где $S_{t,eff}$ — эффективное число Струхала для осциллирующих цилиндров (как правило, от 0,17 до 0,25);

D_h — гидродинамический наружный диаметр, м;

- частотный диапазон для поперечного и продольного потоков по формулам:

$$f^{CF} \in [(1 - \Delta)f_s; (1 + \Delta)f_s], \quad (B.3)$$

$$f^{LL} \in [(1 - \Delta)2f_s; (1 + \Delta)2f_s], \quad (B.4)$$

где Δ — параметр полосы частот, принимающий значения от 0,10 до 0,25.

Среднеквадратическое значение амплитуды отклика поперечного потока в зависимости от длины возбуждения определяют по графику, приведенному на рисунке В.2.

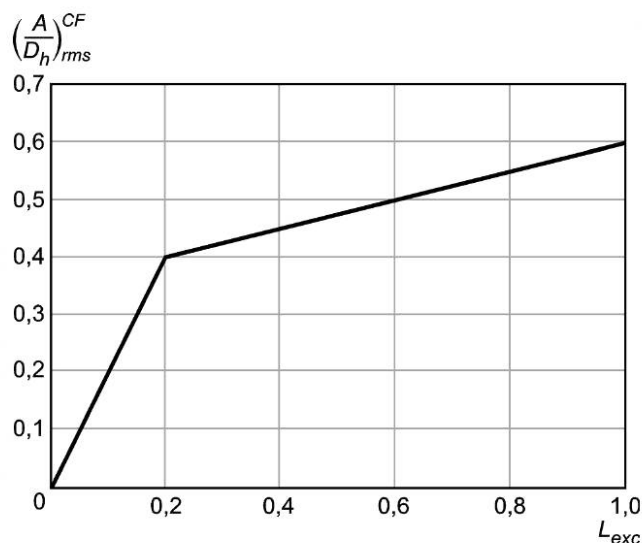


Рисунок В.2 — Амплитуда отклика поперечного потока

Среднеквадратическое значение амплитуды отклика продольного потока в зависимости от среднеквадратического значения амплитуды отклика поперечного потока и номера моды поперечного потока определяют по графику, приведенному на рисунке В.3.

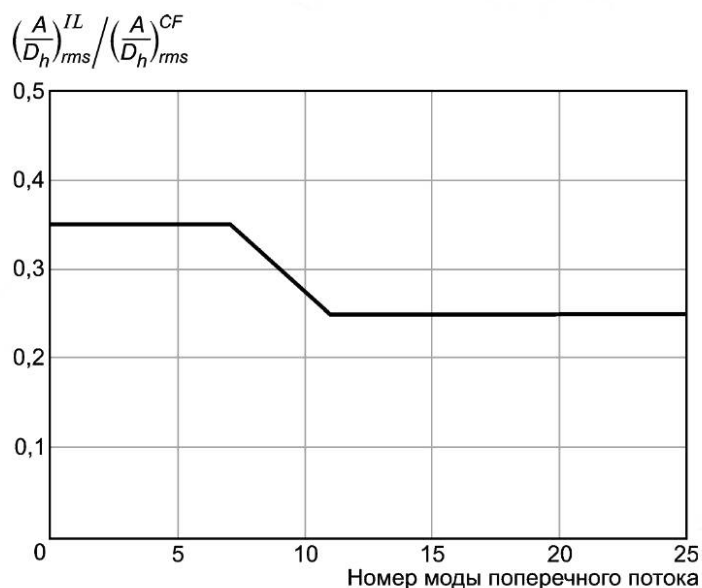


Рисунок В.3 — Амплитуда отклика продольного потока

Усталостные повреждения от поперечных и продольных вибраций вычисляют отдельно. Вклад в среднеквадратическую амплитуду дают все возбужденные моды при поперечных и продольных вибрациях, амплитуды которых определяют по формулам:

$$a_{i,rms}^{CF} = \frac{1}{\sqrt{p^{CF}}} A_{rms}^{CF}, \quad (\text{В.5})$$

$$a_{i,rms}^{IL} = \frac{1}{\sqrt{p^{IL}}} A_{rms}^{IL}, \quad (\text{В.6})$$

где A_{rms}^{CF} — общая среднеквадратическая амплитуда поперечных вибраций, м;

A_{rms}^{LL} — общая среднеквадратическая амплитуда продольных вибраций, м;

p^{CF} — число участвующих мод при поперечных вибрациях;

p^{LL} — число участвующих мод при продольных вибрациях.

Среднеквадратическое отклонение напряжений вычисляют по формуле

$$\sigma_S = SCF \cdot E \cdot K_{eff} \cdot 0,5 \cdot (D_S - t_{fat}), \quad (B.7)$$

где E — модуль упругости, МПа;

SCF — коэффициент концентрации напряжений;

K_{eff} — эффективная кривизна, 1/мм;

D_S — наружный диаметр трубы, мм;

t_{fat} — толщина стенки райзера, используемая в усталостном расчете, мм.

Эффективную кривизну определяют по формуле

$$K_{eff} = \sqrt{\sum_i (k_{i,max} a_{i,rms})^2}, \quad (B.8)$$

где $k_{i,max}$ — максимальная кривизна i -й формы, 1/мм.

Характерное максимальное усталостное повреждение для райзера оценивают с учетом соответствующей кривой S—N и среднеквадратического отклонения напряжений.

Библиография

- | | | |
|-----|------------------|--|
| [1] | DNVGL-ST-F201 | Динамические райзеры |
| [2] | DNVGL-RP-C205 | Условия окружающей среды и нагрузки от воздействия окружающей среды |
| [3] | DNVGL-RP-F205 | Глобальный расчет глубоководных плавающих конструкций |
| [4] | DNVGL-RP-C203 | Расчет усталости морских стальных конструкций |
| [5] | ISO 13628-5:2009 | Нефтяная и газовая промышленность. Проектирование и эксплуатация систем подводной добычи. Подводные шлангокабели |

УДК 622.276.04:006.354

ОКС 75.020

Ключевые слова: нефтяная и газовая промышленность, системы подводной добычи, расчет усталостной прочности, райзер, методические указания

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *О.В. Лазарева*
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Сдано в набор 08.09.2023. Подписано в печать 18.09.2023. Формат 60×84%. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,53.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru