

УДК 622.276.04

И.В. Староконов¹, e-mail: starokon79@mail.ru¹ ФГБОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассматриваются особенности коррозионных процессов, протекающих на морских нефтегазовых сооружениях (МНГС). На основе анализа существующих теорий в области оценки усталостной долговечности шельфовых сооружений автором сделан вывод о том, что ключевым требованием для определения срока службы объектов на шельфе является правильность оценки их напряженного состояния. Автор предлагает оценивать влияние коррозионного воздействия на длительность эксплуатации МНГС с точки зрения увеличения амплитуд переменных напряжений, приводящих к усталостному разрушению. Рассматриваются виды коррозионных поражений: сплошное поверхностное, приводящее к утонению толщины стенок элементов с равномерным снижением общей несущей способности, и язвенной, при котором коррозионные дефекты вызывают локальную концентрацию напряжений. Для конструктивных элементов МНГС, подверженных действию сплошной коррозии, автором вычислены новые формулы, устанавливающие зависимость между значением коэффициента концентрации напряжений, геометрическими размерами элементов и длительностью их эксплуатации. Также предложен и реализован подход, позволяющий осуществить численный расчет величин коэффициентов концентрации напряжений (K) при различных размерах дефектов при язвенном поражении морских конструкций. Определены значения K для сварных соединений исследуемых объектов в зависимости от длительности эксплуатации и формы приложенной нагрузки. На основе полученных данных на примере таврового сварного соединения морской стационарной платформы автором показано, как снижается расчетная длительность эксплуатации соединений платформы при введении в расчет коррозионных коэффициентов концентрации напряжений. Результатом данной работы является получение формул, позволяющих определить значения коррозионных коэффициентов концентрации напряжений и уточнить длительность эксплуатации МНГС.

Ключевые слова: морские нефтегазовые сооружения, переменные, напряжения, коррозионные дефекты, сплошная коррозия, язвенная коррозия, срок службы, усталостная долговечность, ресурс.

Агрессивная морская среда, характерная для условий эксплуатации морских нефтегазовых сооружений, вызывает значительную коррозию металла и опасность потери несущей способности всего сооружения. Коррозия в условиях морского месторождения имеет свои

специфические особенности и зависит от температуры, концентрации солей в морской воде, скорости течений, местоположения элементов (зоны: подводная, атмосферная и переменного смачивания), состояния систем защиты от коррозии и др. К примеру, с увеличением тем-

пературы скорость электрохимической коррозии возрастает из-за появления термогальванических пар, возникших из-за градиента температуры отдельных участков рассматриваемого элемента [1, 5]. Нагретый под воздействием солнечной радиации до более высокой

Таблица 1. Значения коэффициентов концентрации напряжений для элемента МНГС диаметром 478 мм и толщиной стенки 11 мм при различных параметрах коррозионных дефектов

Глубина коррозионного дефекта Н, мм	Длина коррозионного дефекта L, мм							Угловой размер коррозионного дефекта Θ , град.						
	1	10	20	30	40	50	60	1	5	10	20	45	135	160
0,05	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
0,5	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,05	1,03	1,17	1,17	1,12	1,13	1,12	1,08	1,07
1,0	1,21	1,19	1,18	1,16	1,14	1,12	1,09	1,31	1,31	1,21	1,23	1,22	1,14	1,13
1,5	1,32	1,30	1,28	1,26	1,23	1,21	1,18	1,44	1,45	1,29	1,32	1,31	1,19	1,18
2,0	1,42	1,40	1,37	1,35	1,32	1,29	1,26	1,56	1,57	1,34	1,39	1,38	1,23	1,21
2,5	1,54	1,50	1,47	1,45	1,42	1,39	1,36	1,67	1,69	1,39	1,46	1,44	1,25	1,23
3,0	1,64	1,60	1,56	1,53	1,51	1,48	1,45	1,77	1,79	1,41	1,50	1,49	1,26	1,23

температуры надводный участок конструктивного элемента опорного блока морской стационарной платформы (ОБ МСП) является анодом и подвергается более интенсивному коррозионному износу. Значительное влияние на скорость коррозии оказывает растворенная в морской воде соль, превращающая морскую воду в электролит с высокой степенью электропроводности [1, 5]. Кроме того, наиболее интенсивно коррозионные процессы идут в зонах переменного смачивания.

К настоящему моменту разработаны различные теории [2, 3, 6], позволяющие оценивать влияние коррозионного воздействия на срок службы МНГС. Большинство из них основано на проведении экспериментальных испытаний в различных условиях (с применением коррозионно-активных агентов, с различной периодичностью их применения и др.) с последующей интерполяцией полученных данных на реальные объекты. Автором также проводились подобные эксперименты, в результате которых был сделан вывод, что важны не только условия проведения эксперимента, но и правильность оценки возникающих амплитуд переменных напряжений, приводящих к усталостному разрушению. Поэтому новый подход, предлагаемый автором для оценки длительности эксплуатации МНГС, заключается в исследовании влияния коррози-

онных воздействий на изменение напряженного состояния элементов и сварных соединений морских нефтегазовых сооружений. Если рассматривать сплошную поверхностную коррозию, то она приводит к равномерному утонению толщины стенок элементов с равномерным снижением общей несущей способности. Гораздо более опасными являются коррозионные каверны, распространяющиеся от поверхности вглубь основного металла с малыми радиусами закругления на конце. Такие дефекты резко изменяют форму поверхности элементов, в результате чего возникает локальная концентрация напряжений. Напряжения в этих элементах характеризуются коэффициентами концентрации напряжений К, которые определяют действительное напряженное состояние элемента путем умножения этого значения на величину номинальных напряжений.

В результате анализа материалов комплексных диагностических обследований автором было установлено, что наиболее часто максимальная глубина каверны достигает 3 мм. На основе данных нормативного документа [6] для практического использования были вычислены значения коэффициентов концентрации напряжений для типовых элементов при различных параметрах коррозионных дефектов, детальное описание которых содержится в диссертаци-

онной работе автора. Для отдельного элемента диаметром 478 мм и толщиной стенки 11 мм значения коэффициентов концентрации напряжений приведены в табл. 1.

Произведя соответствующие расчеты, автор установил, что концентрация напряжений увеличивается с повышением глубины и уменьшением длины и угла раскрытия коррозионного дефекта.

Используя данные о скоростях коррозии для различных элементов опорного блока, приведенных в [6], исследована концентрация напряжений при действии равномерной поверхностной коррозии. Известно, что все виды нагрузок, действующих на элементы МНГС, можно классифицировать как сжатие-растяжение, изгиб и кручение. Напряжения, возникающие при этих нагрузках, зависят от площадей поперечного сечения элементов, значений осевых моментов сопротивления сечений при изгибе и кручении. Анализ материалов проектов показал, что колонны выполнены из труб диаметром 720–1020 мм с толщинами стенок 16–30 мм. На основании известных значений скоростей коррозии [6] проведено численно-аналитическое моделирование, в результате которого рассчитаны значения коэффициентов концентрации напряжений в зависимости от времени эксплуатации МНГС и размеров исследуемых элементов. Установлено, что значения коэффициентов концентрации

Таблица 2. Значения коэффициентов концентрации напряжений сварных соединений при коррозионном воздействии с учетом формы приложенной нагрузки

Соединяемые элементы	Продолжительность коррозионного воздействия, лет					
	3	9	15	21	27	30
При действии изгибающего момента в плоскости						
Горизонтальные поперечные в районе соединения с колоннами ($v_k = 0,18$ мм/год)						
325 x 10	1,04	1,16	1,34	1,52	1,88	2,00
426 x 12	1,05	1,16	1,25	1,44	1,72	1,86
530 x 14	1,04	1,16	1,26	1,41	1,72	1,87
Наклонные продольные в районе соединения с колоннами ($v_k = 0,15$ мм/год)						
325 x 10	1,04	1,12	1,26	1,41	1,55	1,73
426 x 12	1,04	1,13	1,20	1,30	1,54	1,68
530 x 14	1,03	1,14	1,25	1,34	1,48	1,53
Подводные части колонн ($v_k = 0,12$ мм/год)						
325 x 10	1,03	1,08	1,17	1,30	1,41	1,51
426 x 12	1,03	1,10	1,14	1,23	1,31	1,40
530 x 14	1,03	1,12	1,20	1,24	1,31	1,47
При действии осевой силы на поясную трубу и изгибающего момента вне плоскости						
Горизонтальные поперечные в районе соединения с колоннами ($v_k = 0,18$ мм/год)						
325 x 10	1,10	1,32	1,52	1,56	2,13	2,37
426 x 12	1,05	1,15	1,38	1,58	1,79	1,91
530 x 14	1,05	1,19	1,30	1,38	1,63	1,72
Наклонные продольные в районе соединения с колоннами ($v_k = 0,15$ мм/год)						
325 x 10	1,08	1,15	1,32	1,44	1,65	1,83
426 x 12	1,03	1,14	1,29	1,47	1,57	1,62
530 x 14	1,04	1,16	1,25	1,32	1,43	1,49
Подводные части колонн ($v_k = 0,12$ мм/год)						
325 x 10	1,18	1,20	1,31	1,34	1,48	1,50
426 x 12	1,02	1,09	1,18	1,34	1,48	1,53
530 x 14	1,02	1,10	1,20	1,24	1,33	1,37

напряжений в случаях сжатия-растяжения и изгибающих либо крутящих моментов незначительно различаются, что позволяет объединить их в общую формулу. Используя аппроксимацию полиномом пятой степени с точностью до 90 %, вычислены следующие формулы расчета значений К для колонн, расположенных в различных зонах при действии продольных сил, изгибающих и крутящих моментов:

1) для подводной зоны:

$$K = 2,7 - (2628\rho + 67,06t - 132,7\rho^2 - 10,45\rho t) \cdot 10^{-4} - (219,1\rho^3 - 6,02t^2 + 21,12\rho^2 t - 1,983\rho t^2) \cdot 10^{-6} - 3,153 \cdot 10^{-19} t^3; \quad (1)$$

2) для зоны переменного смачивания:

$$K = 3,429 - (3770\rho + 95,61t - 191,1\rho^2 - 13,68\rho t) \cdot 10^{-4} - (317,3\rho^3 - 116,1t^2 + 22,56\rho^2 t + 3,997\rho t^2) \cdot 10^{-6} + 24,68 \cdot 10^{-8} t^3; \quad (2)$$

3) для надводной зоны:

$$K = 2,441 - (2261\rho + 9,106t - 115,9\rho^2 - 3,773\rho t) \cdot 10^{-4} - (193,7\rho^3 - 17,16t^2 - 7,069\rho^2 t - 3,44\rho t^2) \cdot 10^{-6} - 98,77 \cdot 10^{-8} t^3; \quad (3)$$

где К – значение коэффициента концентрации напряжений; ρ – относительная координата, определяемая из отношения ра-

диуса исследуемого конструктивного элемента к толщине его стенки; t – длительность эксплуатации.

Анализ проектов показал, что все горизонтальные, поперечные и диагональные элементы имеют диаметры 325–530 мм с толщиной стенок 10–18 мм и соединены либо с колоннами, либо с другими элементами, точно так же, как и наклонные поперечные и продольные элементы. В соответствии с [6] скорость коррозии принимается равной 0,18 мм/год для любых зон. На основе расчета значений К и аппроксимации полученных результатов выведена следующая формула:

$$K = 1,035 + 0,07193t - 0,2372\rho - 0,00592t\rho + 0,2512\rho^2 - 0,05864t\rho^2 + 0,6685\rho^3 + 0,02765t\rho^3 - 0,2376\rho^4 + 0,03548t\rho^4 - 0,3197\rho^5, \quad (4)$$

где K – значение коэффициента концентрации напряжений; ρ – относительная координата, определяемая из отношения радиуса исследуемого конструктивного элемента к толщине его стенки; t – длительность эксплуатации.

Для определения значений коэффициентов концентрации напряжений сварных соединений в зависимости от длительности эксплуатации и формы приложенной нагрузки [6] автором были построены их модели в программном комплексе SolidWorks и произведен расчет значений K по точкам с максимальной концентрацией напряжений. Результаты приведены в табл. 2.

Рассмотрим, как описанные параметры коррозионных процессов влияют на оценку длительности эксплуатации МНГС. Для выполнения подобной оценки широко применяются теории Вейбулла и Когаева. Обе теории являются модернизированными теориями Палгрейма – Мейера и хорошо апробированы на практике [3, 4]. Для оценки этой длительности необходимо знать значения амплитуд переменных напряжений, условий нагружения и блоки амплитуд напряжений в течение срока эксплуатации, действующие в сварных соединениях и элементах. Кроме того, необходимо учитывать механические свойства металла сварных соединений.

Блок нагружения состоит из нескольких ступеней нагрузок, каждая из них вызывает переменные напряжения, которые можно охарактеризовать амплитудой переменного напряжения σ_{ai} , числом повторений этой амплитуды в ступени v_{ai} и частотой приложения нагрузки ν . Число циклов до разрушения по диаграмме усталости при амплитуде напряжений σ_{ai} равно N_i циклов. При такой амплитуде исследуемый объект получает долю повреждения, равную ν_i/N_i . В таком случае разрушение при блочном нагружении наступит, когда сумма значений относительных повреждений станет равной a_p , а долговечность исследуемого объекта, выраженная количеством лет λ , определится по формуле [2–4]:

$$\lambda = \frac{a_p}{\sum_{i=1}^g \frac{\nu_{i0} \sigma_{ai}^{m_1}}{\sigma_{Rk1}^{m_1} N_{Gi}} + \sum_{i=1}^k \frac{\nu_{i0} \sigma_{ai}^{m_2}}{\sigma_{Rk1}^{m_2} N_{Gi}}}, \quad (5)$$

где σ_{Rk} , N_{Gi} – координаты точки перелома кривой усталости; a_p – критическая степень повреждения материала; m_1 , m_2 – коэффициенты, характеризующие наклоны ветвей кривой усталости, а остальные значения приведены в работах [2–4]. Проведем сравнительные расчеты для сварного соединения Т-типа, основываясь на следующих исходных данных [2]: высота волны с 1%-й обеспеченностью составляет 11,2 м, длина волны – 149 м, период волны – 10,6 с, глубина моря – 30 м, величина статической составляющей номинальных растягивающих напряжений в сварном соединении составляет 80 МПа [2].

Общее количество циклов волновой нагрузки в год по результатам расчета ν_0 равно 30 532 411. Если a_p

по результатам расчета менее 0,2, то в расчетах следует принимать равным 0,2 [3, 4], поскольку меньшее значение не оправдывается экспериментальными результатами. В соответствии с данными нормативного документа [6] примем $m_1 = 3$ и $m_2 = 5$. В табл. 3 приведены расчеты амплитуд переменных напряжений для 1-го случая без учета коэффициентов концентрации напряжений K и для 2-го случая при усредненном за 15 лет эксплуатации значении K , равном 1,14.

В результате расчета установлено, что долговечность сварного соединения составляет 38,7 лет. Однако при введении поправки, учитывающей концентрацию напряжений от коррозионного воздействия, скорректированный ресурс существенно снижается и составляет 28,7 лет. По аналогии было вычислено увеличение амплитуд переменных напряжений при введении коррозионного коэффициента концентрации напряжений для конструктивных элементов морских нефтегазовых сооружений. Так, за 20 лет эксплуатации с учетом рассчитанного по формулам (1–4) коэффициента концентрации напряжений от коррозионного воздействия, равного 1,15, долговечность горизонтальных элементов, расположенных в зоне переменного смачивания, уменьшается с 21 года до 17 лет. Поэтому правильность оценки напряженного состояния сварных соединений и конструктивных элементов с учетом коррозионных коэффициентов концентрации напряжений является ключевым требованием для точного расчета длительности их эксплуатации.

Литература:

1. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: Учебник для вузов. Ч. 1. Конструирование. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 555 с.
2. Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Тиньгаев А.К. Определение остаточного ресурса опорного блока морской стационарной платформы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2012. № 1. С. 80–85.
3. Серенсен С.В., Когаев В.П. и др. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
4. Клыков Н.А. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
5. Колгушкин А.В., Беляев Н.Д. Влияние природных факторов на скорость коррозии морских ГТС // Предотвращение аварий зданий и сооружений. 2009. [Электронный ресурс.] Режим доступа: <http://www.pamag.ru/src/prensa/137.pdf>. Дата обращения: 17.11.2016.
6. DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures. Norway, 2010, 142 pp.