В рамках дополнительной подготовки слушатели изучают: задачи IGF Кодекса; основные особенности физического и химического состава газов LNG и LPG; правила безопасности при работе с СПГ; особенности бункеровки и хранения СПГ на борту судна; особенности использования СПГ, газоподготовки и подачи газа к двигателю; особенности контроля температуры, давления газа в танке хранения СПГ и на входе в главный двигатель; особенности конструкции судов использующих газ в качестве топлива, согласно требований СОЛАС раздел II-1; запуск двигателя и переход на использование СПГ, на примере двигателя MAN 8L51/60DF; системы аварийно-предупредительной сигнализации и автоматики; правила противопожарной безопасности судов, использующих газообразное топливо.

Очевидно, что сжиженный природный газ является более экологически чистым видом топлива, которое после 1 января 2020 года будет набирать все большую популярность в судоходстве. Но наряду с его достоинствами есть огромный риск использования метана, связанный с его взрывоопасностью, что требует не только повышения стандартов безопасности на борту судна, но также и улучшения уровня подготовки плавсостава.

Литература

1.WesAmelieContainerShipConversion [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (24 Kb). – Нью-Йорк, США: Shiptechnology, 2017. – Режим доступа: https://www.ship-technology.com/projects/wes-amelie-container-ship-conversion/ Суббота, 27 января 2020 15:17:15.

2. Гудков А. Shell предсказывает бум СПГ как топлива для судов и грузовиков [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (34 Kb). – Берлин, Германия: Deutsche Welle, 2019. – Режим доступа: https://www.dw.com/ru/shell-/a-47603972 Суббота, 21 февраля 2019 20:20:15.

3. Панамарев В., Хекерт Е.В.Расчет концентрации окислов азота для котельной установки Aalborg Missionol с топочным устройством kbsd-1900 и сравнение с экспериментальными данными//Эксплуатация морского транспорта.–2015.– № 3 (76).–С. 75-79.

REFERENCES

1. Wes Amelie Container Ship Conversion [Elektronnyj resurs]. – Elektron. tekstovye dannye (24 Kb). – N'yu-Jork, SSHA: Ship technology, 2017. – Rezhim dostupa: https://www.ship-technology.com/projects/wes-amelie-container-ship-conversion/ Subbota, 27 yanvarya 2020 15:17:15.

2. Gudkov A. Shell predskazyvaet bum SPG kak topliva dlya sudov i gruzovikov [Elektronnyj resurs]. – Elektron. tekstovye dannye (34 Kb). – Berlin, Germaniya: Deutsche Welle, 2019. – Rezhim dostupa: https://www.dw.com/ru/shell-/a-47603972 Subbota, 21 fevralya 2019 20:20:15.

3.Panamarev V., Hekert E.V.Raschet koncentracii okislov azota dlya kotel'noj ustanovki Aalborg Missionol s topochnym ustrojstvom kbsd-1900 i sravnenie s eksperimental'nymi dannymi//Ekspluataciya morskogo transporta. 2015. № 3 (76). S. 75-79.

УДК626,627.257,627.335.2,620.197.5
DOI: 10.34046/aumsuomt94/21

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МОРСКИХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ С ПИТАНИЕМ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

В. М. Ву, аспирант
Б. Б. Чернов, доктор химических наук, профессор
А. М. Нугманов, научный сотрудник

Оценена эксплуатационная надежность морских гидротехнических сооружений при использовании катодной защиты с питанием от солнечных панелей. Надежность металлических конструкций оценивали по степени коррозионного износа на примере шпунтовой стенки типа «Ларсен 4», скорость коррозии которой определялась по результатам коррозионных испытаний образцов при различных вариантах катодной защиты от солнечных панелей. Результаты работы показали, что использование катодной защиты с питанием от солнечных панелей может существенно повышать долговечность морских гидротехнических сооружений при малых экономических затратах относительно других способов реализации катодной защиты.

Ключевые слова: катодная защита, морская коррозия, плотность тока, солнечная панель, надежность, срок эксплуатации, морские гидротехнические сооружения

An operational reliability assessment of marine hydraulic structures using cathodic protection powered by solar panels was conducted. The reliability of metal structures was assessed by the degree of corrosion wear using the example of a sheet pile wall of the type Larsen 4, the corrosion rate of which was determined by the results of

corrosion tests of samples with various options for cathodic protection powered by solar panels. The results showed that the use of cathodic protection powered by solar panels can significantly increase the durability of offshore hydraulic structures at low economic cost related to other methods of implementing cathodic protection.
Key words:cathodic protection, marine corrosion, current density, solar panel, reliability, failure-free probability, offshore hydraulic structures

Согласно ГОСТ 27.002-2015 под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, долговечность, сохраняемость и др.

При проектировании и реконструкции причальных сооружений возникают трудности из-за методов расчета, поскольку они часто не учитывают фактор времени, чтоне позволяет определить реальные запасы прочности и долговечности эксплуатируемого объекта. Даже в тех случаях, когда специально проводится дополнительная инспекция технического состояния сооружения, расчеты далеко не всегда дают правильную оценку запасов ее надежности[1].

Изменения прочности и долговечности металлических морских гидротехнических сооружений обычно связывают с множеством факторов [2]: соленость, температура,морской воды, концентрация в ней растворенного кислорода, температура и влажность воздуха, колебания уровня воды, скорость течений, уровень солнечной радиации, попадание агрессивных химических компонентов от грузовв морскую воду и другие ее загрязнения, состав и марки сталей конструкции, конструктивное исполнение элементов, дополнительные нагрузки от причаливания судов, эксплуатационные повреждения, способы и др. Особую роль в продлении сроков эксплуатации морских сооружений играют способы и приемы защиты от коррозии. От них также зависит стоимость эксплуатации сооружения и их жизненный цикл.

Оценкой надежности морских гидротехнических сооружений занимались известные ученые [3-14]. Оценки надежности гидротехнических сооружений с использованием вероятностных подходов основываются на научных разработках Костюкова В.Д. [15], Болотина В.В. [13] и Ржаницына А.Р. [14]. Такие подходы использовались в диссертациях Сахненко М.А. [1] и Пивон Ю. И. [16].

Для сооружений типа больверкосновным показателем потери прочности и долговечности конструкции является коррозионный износ лицевой стенки, достигающей 60 % от износа всей конструкции в целом[17].

Манапов А.З. и Майстренко И.Ю. [18] провели специальное исследование о количественной значимости коррозионного износа на надежность сооружений с использованием подходов работ [13,14] и пришли к выводу, что защита от коррозии снижаетколичество отказовво времени сооружений в 8–20 раз. Эти исследования и прямой контроль за эксплуатационным состоянием реальных морских гидротехнических сооружений показывают, что без защиты от коррозии морские сооружения имеют весьма ограниченный срок службы. Согласно монографии [19] практическое применение катодной защиты позволило увеличить срок службу причала до 40 лет.

Целью этой работы является оценка эксплуатационной надежности по сроку службы морских гидротехнических сооруженийпри использовании катодной защиты с питанием от солнечных панелей на основании вероятностных расчетов.

СогласноРД 31.31.35-85 влюбой момент времени t при условиибезотказной работыi-го несущего элемента сооружения с вероятностью p_iдолжно соблюдаться неравенство

$$p_i=P(Y_i,t)\geq[Pn] \quad (1)$$

при

$$Y_i=R_i - S_i> 0, \quad (2)$$

где Y_i– резерв контролируемого параметра напряженного или деформированного состояния i-го элемента конструкции сооружения, случайная величина;

R_i– показатель прочности i-го несущего элемента сооружения, случайная величина;

S_i– нагрузка на i-й несущий элемент конструкции сооружения, случайная величина;

[Pn]– нормативная вероятность безотказной работы, которая для металлических элементов причальных сооружений обычно принимается равной 0,95 [20].

Математическое ожидание и дисперсию для контролируемого параметра (2) определяем через соответствующие характеристики статистически независимых распределений нагрузки и прочности:

$$\overline{Y}_i=\overline{R}_i-\overline{S}_i \quad (3)$$

$$D_Y=D_R+D_S, \quad (4)$$

где $\bar{Y}_i$– математическое ожидание напряженного или деформированного состояния i-го элемента конструкции сооружения;

$\bar{R}_i$,$\bar{S}_i$– математическое ожидания соответственно показателя прочности и нагрузки на i-й несущий элемент конструкции сооружения;

D_Y– дисперсия напряженного или деформированного состояния i-го элемента конструкции сооружения;

D_RиD_S– дисперсии показателя прочности и нагрузки i-гонесущего элемента конструкции сооружения.

Вероятностная надежность неразрушимости несущих элементов p_i

$$p_i = 1 - \Phi(z), \quad (5)$$

где Φ(z)– функция нормального распределения.

Для нормального или близкого к нормальному закону распределения R_i и S_i аргумент z определяется выражением [1,15,21]

$$z = \frac{\bar{R}_i - \bar{S}_i}{\sqrt{D_R + D_S}}. \quad (6)$$

Как было отмечено в литературном обзоре коррозионный износ лицевой стенки, как правило, является основным фактором, вызывающим изменения в прочности и устойчивости всего сооружения в целом. Из многочисленных данных натурных испытаний [22,23,24] известно, чтосамый сильный коррозионный износ стенки происходит в зоне переменного смачивания. На основании этого и для того, чтобы не допустить снижения расчетной надежности морских гидротехнических сооруженийпринимаем за расчетное значение скорость коррозии всего металлического шпунта как в зоне переменного смачивания [21].

Соответственно в результате действия коррозии с течением времени происходит изменение геометрических размеров шпунта. Изменение размеров шпунта приводит и к изменению момента сопротивления шпунта, по которому и проводим оценку надежности.

Расчет металлических шпунтов при изменении их геометрических размеров шпунта требует знания во времени величины самого коррозионного износа по поверхности шпунта. В [21] предложено принимать за количественную характеристику износа шпунта момент инерции в поперечном сечении до коррозии и момент инерции относительно оси стенки, полученный в результате коррозионного износа за определенный период времени (см. рис. 1).

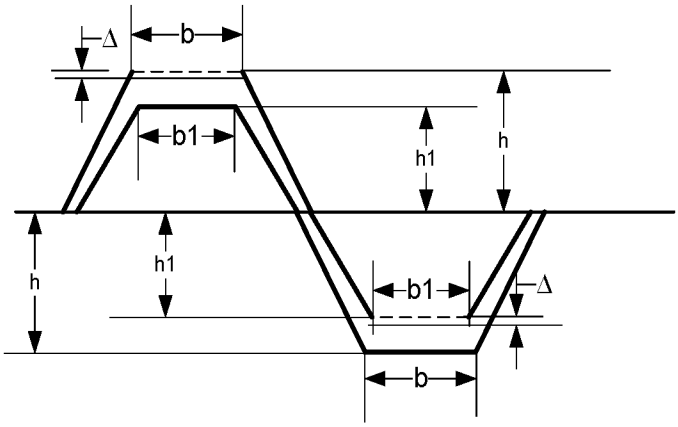

Рисунок 1–Схема коррозионного износа поперечного сечения шпунта.b– внешняя ширина полки шпунта; b1 – внутренняя толщина полки; Δ– математическое ожидание величина толщины коррозионных потерь; h1 – высота в поперечном сечении шпунта до внутренней поверхности полки; h – высота поперечного сечения шпунта до внешней поверхности полки

Надежность металлических конструкций будем оцениватьна примере шпунтовой стенки типа «Ларсен 4»с учетом степени коррозионного износа. Скорость коррозии определяласьпо результатам коррозионных испытаний образцов при различных плотностях токакатодной защитыс питанием от солнечных панелей [25]. Результаты таких коррозионных испытаний представлены
в таблице 1.

Для определения надежности шпунтарекомендуютиспользовать метод линеаризации функций.

Таблица 1–Скорость коррозии шпунта при различных плотностях тока катодной защиты

Плотность защитного тока, мА/м^2	Скорость коррозии, мм/год
0 (без защиты)	0,086
116	0,030
231	0,013
463	0,009

Примером такого подхода может служить функция момента прочности металлических шпунтов

$$M_{пр}=W\sigma_T, \quad (7)$$

где W –момент сопротивления несущего элемента;

$\sigma_т$– предел текучести стали.

Если считать, что геометрические характеристики сечения шпунта W и предел текучести стали $\sigma_т$ не зависимы, томежгрупповая дисперсияможет быть выражена по формуле

$$D_м=\overline{\sigma_т}^2D_W+\overline{W}^2D_{\sigma_T}, \quad (8)$$

где $\overline{\sigma_т}$ = 29800т/м^2–математическое ожидание предела текучести стали[26];

$D_{\sigma_T}=(1{,}92\cdot10^3)^2$(т/м^2)^2– дисперсия предела текучести стали[26];

D_W– дисперсия момента сопротивления;

$\overline{W}$– математическое ожидание момента сопротивления поперечного сечения несущего элемента.

Математическое ожидание момента сопротивления для одного метра шпунта при коррозионном износе, согласно работе[1, 15], определяется выражением

$$\overline{W}=\overline{W}_0-\frac{k}{3}\left[\overline{b}\left(\overline{h}\overline{v}t-2\overline{v}^2t^2+\frac{\overline{v}^3t^3}{h}\right)+\frac{\overline{b}_1}{\overline{v}t+\overline{h}_1}\left(\overline{h}_1{}^2\overline{v}t+2\overline{h}_1\overline{v}^2t^2+\overline{v}^3t^3\right)\right], \quad (9)$$

где $\overline{W}_0$– математическое ожидание начального момента сопротивления 1 погонного метра стенки ($\overline{W}_0$ = 2,2$\cdot10^{-3}$м^{3}для шпунтовой стенки типа «Ларсен 4»);

t – продолжительность эксплуатации, год;

$\overline{v}$– математическое ожидание скорости коррозии металла, мм/год;

k – коэффициент, учитывающий геометрические размеры шпунтов в 1 погонном метре шпунтовой стенки (k = 1,8 для Ларсена 4[1]).

Расчетные значения математических ожиданий момента сопротивления шпунта типа «Ларсен 4» при коррозионном износе по выражению (9)при различных вариантах защиты представлены в табл. 2.

Согласно работе [26] при учете допуска толщины шпунта, коэффициент вариации принимаем равным 7%

$$\sigma_W = 0{,}07\overline{W}, \quad (10)$$

$$D_W =\sigma_W{}^2 . \quad (11)$$

Результаты расчета дисперсии момента сопротивленияшпунта, защищаемогопри различных плотностях тока катодной защиты, представлены в табл. 3.

Таблица 2– Математическое ожидание момента сопротивления поперечного сечения шпунта при различных плотностях токакатодной защиты

Срок эксплуатациит, лет	Математическое ожидание момента сопротивления поперечного сечения шпунта, м$^3\cdot10^{-3}$			
	0 мА/м^2	116 мА/м^2	231 мА/м^2	463 мА/м^2
0	2,20	2,20	2,20	2,20
10	2,14	2,18	2,19	2,19
20	2,08	2,16	2,18	2,19
30	2,02	2,14	2,17	2,18
40	1,96	2,11	2,16	2,17
50	1,90	2,09	2,15	2,17
60	1,84	2,07	2,14	2,16
70	1,78	2,05	2,14	2,16
80	1,72	2,03	2,13	2,15
90	1,66	2,01	2,12	2,14
100	1,60	1,99	2,11	2,14

Таблица 3–Дисперсии момента сопротивленияшпунта при различных плотностях тока катодной защиты

Срок эксплуатациит, лет	Дисперсии момента сопротивленияшпунта, м$^3\cdot10^{-3}$			
	0 мА/м^2	116 мА/м^2	231 мА/м^2	463 мА/м^2
0	2,37	2,37	2,37	2,37
10	2,24	2,33	2,35	2,36
20	2,12	2,28	2,33	2,34
30	1,99	2,24	2,31	2,33
40	1,88	2,19	2,29	2,32
50	1,76	2,15	2,27	2,30
60	1,65	2,10	2,25	2,29
70	1,55	2,06	2,23	2,28
80	1,45	2,02	2,21	2,26
90	1,35	1,98	2,20	2,25
100	1,25	1,94	2,18	2,24

Анализ напряженного состояния сооружения рассматриваем через математические ожидания изгибающего момента от воздействия внешних сил $\bar{W}_{изг}$ =41,55тм , в соответствии с работой [26].

Математическое ожидание момента прочности шпунта в зависимости от срокаэксплуатации $\bar{W}_{пр} = \bar{W}\bar{\sigma}_{т}$ приразличных вариантах катодной защиты представлены в табл. 4.

Таблица 4–Математическое ожидание момента прочности шпунтапри различных плотностях тока катодной защиты

Срок эксплуатациит, лет	Математическое ожидание момента прочности шпунта, тм			
	0 мА/м^2	116 мА/м^2	231 мА/м^2	463 мА/м^2
0	65,56	65,56	65,56	65,56
10	63,73	64,92	65,28	65,37
20	61,91	64,28	65,01	65,18
30	60,10	63,65	64,73	64,98
40	58,30	63,01	64,45	64,79
50	56,51	62,38	64,18	64,60
60	54,73	61,74	63,90	64,41
70	52,95	61,11	63,63	64,22
80	51,19	60,48	63,35	64,03
90	49,43	59,85	63,07	63,84
100	47,68	59,22	62,80	63,65

Дисперсия момента $D_{м\text{-}изг}$от воздействия внешних сил при коэффициенте вариации 20%, согласно работе[1] равна

$$D_{м\text{-}изг}=(0{,}2\bar{W}_{изг})^2= (0{,}2\cdot 41{,}55)^2 = 69{,}06(тм)^2.$$

Дисперсии момента прочности шпунтаD$_{м\text{-}пр}$, рассчитанные по (8), при различных вариантах защиты представлены в табл. 5.

Таблица 5–Дисперсии момента прочности шпунтапри различных плотностях тока катодной защиты

Срок эксплуатациит,лет	Дисперсии момента прочности шпунта, (тм)^2			
	0 мА/м^2	116 мА/м^2	231 мА/м^2	463 мА/м^2
0	38,90	38,90	38,90	38,90
10	36,76	38,15	38,57	38,68
20	34,69	37,40	38,25	38,45
30	32,69	36,67	37,92	38,22
40	30,76	35,94	37,60	38,00
50	28,90	35,22	37,28	37,77
60	27,11	34,50	36,96	37,55
70	25,38	33,80	36,64	37,33
80	23,71	33,11	36,32	37,11
90	22,11	32,42	36,01	36,89
100	20,58	31,74	35,70	36,67

Надежность шпунта определялась по выражению [1,15,21,26]

$$P=1-\Phi\left(\frac{\bar{M}_{изг}-\bar{M}_{пр}}{\sqrt{D_{м-изг}+D_{M_{пр}}}}\right), \qquad (12)$$

где Ф(г) – вероятностная функция Гаусса.

Результаты расчета надежностьшпунта при различных плотностях тока защиты представлены в рис. 2.

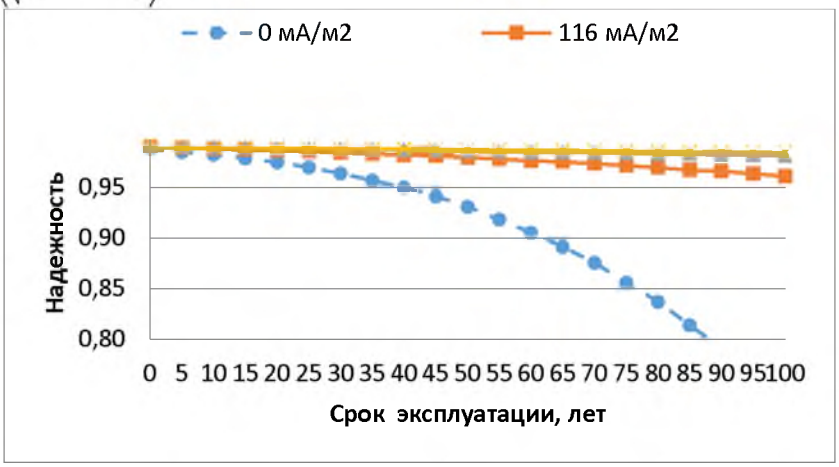

Рисунок2– Надежность шпунта при различных плотностях тока катодной защиты

Из рис. 2 видно, что надежность шпунта при защите всегдавыше чем у незащищаемого, увеличиваясь с ростом плотности тока защиты, и снижаетсяот срока его эксплуатации. Например, незащищаемый шпунт служит только 40лет, а защищаемые шпунты при использовании катодной защиты с питанием от солнечных панелей могут служить более 100 лет.

Таким образцомиспользование катодной защиты с питанием от солнечных панелей может существенно повысить долговечность морских гидротехнических сооружений при малых экономическихзатратах относительно других способов реализации катодной защиты, которые былирассмотрены в работе[27].Следует также отметить, что использование такой катодной защиты одновременно повышает и безопасность морских сооружений, поскольку позволяет отказаться от высоковольтных источников электричества.

Литература

1. Сахненко М. А. Методика оценки коэффициента надежности морских причалов с учетом сроков эксплуатации: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.19 / Сахненко Маргарита Александровна. - М., 2007. -124 с.
2. Костюков В. Д. Проблемы нормирования запасов прочности и долговечности конструкций причалов в поверочных расчетах / В. Д. Костюков, М. А. Сахнепко. -М.: ЦДМУ МГАВТ, 2002. - С. 81.
3. Melchers R. E. Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment / R. E. Melchers // J. Struct. Eng. -2003. - Vol. 129 (11). - P. 1484–1493
4. Marshall P. W. Risk evaluations for offshore structures / Marshall P. W. // J. Struct. Div. -1969.-Vol. 95(12). -P. 2907–2929.
5. Melchers R. E. Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure / R. E. Melchers, R.I. Jeffrey // Reliability Engineering & System Safety. -2008. - Vol. 93(3). - P. 423–432.
6. Melchers R. E. The effect of corrosion on the structural
reliability of steel offshore structures / R. E. Melchers // Corrosion Science. - 2005. - Vol. 47. - P. 2391–2410.
7. Garbatov Y. Bayesian Updating in the Reliability Assessment of Maintained Floating Structures / Y. Garbatov and C. GuedesSoares // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. - 2002. - Vol. 124. - P. 139–145.
8. GuedesSoares C. Reliability of maintained, corrosion protected plates subiected to non-linear corrosion and compressive loads / C. GuedesSoares, Y. Garbatov // Marine Structures. - 1999. - Vol. 12. - P. 425–445.
9. Moarefzadeh M. R. Nonlinear wave theory in reliability analysis of offshore structures / M. R. Moarefzadeh, R. E. Melchers // Probabilistic Engineering Mechanics. - 2006. - Vol. 21(2). - P. 99–111.
10. Бик Ю. И. Индекс безопасности как мера надежности строительных конструкций / Ю. И. Бик, В. В. Дегтярева // Науч. изд. Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Н-ск. СГУВТ. - 2016. – № 3-4. – С. 57–59.
11. Беккер А. Т. Безопасность шельфовых сооружений при воздействии дрейфующих ледяных образований / А. Т. Беккер, Л. В. Ким // Наука и безопасность. - 2015. - № 2 (15). – С. 79-88.
12. Цуприк В.Г. Методологические аспекты обоснования рисков при определении надежности сложных технических систем типа морских ледостойких оснований / В. Г. Цуприк // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. - 2011. - № 1(6). – С. 106-126.
13. Болотин В. В. Методы теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. - М.: Стройиздат, 1982. - С. 279.
14. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. М.: Стройиздат, 1978. - С. 239.
15. Костюков В.Д. Вероятностные методы расчета запасов прочности и долговечности портовых гидротехнических сооружений / В.Д. Костюков.– М.: Транспорт, 1979. – С. 15, С.39-67.
16. Пивон Ю. И. Эксплуатационная надежность существующих причалов в условиях сибири: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.19 / ЮрийИвановичПивон. - Новосибирск, 2000. -132 с.
17. Сахненко М. А. Зависимость коэффициента надежности от срока эксплуатации причального сооружения и связь его с вероятностью безотказной работы / М. А. Сахненко // Наука и техника транспорта. - 2007. - № 3. -С. 60–64.
18. Манапов А. З. Оценка надежности конструкции с учетом коррозионного износа / А. З. Манапов, И. Ю. Майстренко // Известия КГАСУ. - 2006. - №1(5). - С. 64–73.
19. Краснов Н. В. Стальные шпунтовые сваи в портовом гидротехническом строительстве / Н. В. Краснов. -М.: Транспорт, 1982. - 133 с.
20. РД 31.31.35-85 Основные положения расчета причальных сооружений на надежность. - Москва: В/О «Мортехинформреклама», 1984.
21. Нгуен В. В. Расчет причальных сооружений по теории надежности / В. В. Нгуен. Ханой: Транспорт
(МинистерствоТранспортаВьетнама), 1996. - С.77.
22. Bailey, S. I. Corrosion of Stainless Steels in the Marine Splash Zone / Bailey, S. I. and Li, X. //

Advanced Materials Research. - 2013. - Vol. 610–613. - P. 272–275.

23. Xiang-rong, Z. Study on the corrosion peak of carbon steel in marine splash zone / Xiang-rong, Z., Gui-qiao, H. &Cai-feng, L. // Chin. J. Ocean. Limnol. - 1997. - Vol. 15. -P. 378–380.
24. Liang M. Corrosion and pitting of 6060 series aluminium after 2 years exposure in seawater splash, tidal and immersion zones / M. Liang, R. Melchers, I. Chaves // Corrosion Science. - 2018. - Vol. 140. - P. 286–296.
25. Ву, В. М. Катодная защита морских сооружений, удаленных от стационарных источников электроснабжения / В. М. Ву, Б. Б. Чернов, А. М. Нугманов, Л. Ю. Фирсова // Морской вестник. – 2020. – № 1(73). – С. 66–69.
26. Фам В. Ч. Эксплуатационной надежность морских причалов в портах Вьетнама: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.19 / Фам Ван Чунг. –М., 2010. –162 с.
27. Ву, В. М. Оценка эффективности применения катодной защиты морских сооружений с питанием от солнечных панелей / В. М. Ву, Б. Б. Чернов, А. М. Нугманов // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 4(93). – С. 132–137.

References

1. SakhnenkoM. A. Metodikaotsenkikoeffitsiyentanadezhnostimorskikhprichalovsuchetomsrokovekspluatatsii: dis. ... kand. tekh. nauk: 05.22.19 / SakhnenkoMargaritaAleksandrovna. - M., 2007. - 124 p.
2. KostyukovV. D. Problemynormirovaniyazapasovprochnostiidolgovechnostikonstruktsiyprichalovvpoverochnykhraschetakh / V. D. Kostyukov, M. A. Sakhnepko. - M.: TSDMUMGAVT, 2002. - P. 81.
3. Melchers R. E. Probabilistic model for marine corrosion of steel for structural reliability assessment / R. E. Melchers // J. Struct. Eng. -2003. - Vol. 129 (11). - P. 1484–1493
4. Marshall P. W. Risk evaluations for offshore structures / Marshall P. W. // J. Struct. Div. -1969.-Vol. 95(12). -P. 2907–2929.
5. Melchers R. E. Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure / R. E. Melchers, R.I. Jeffrey // Reliability Engineering & System Safety. -2008. - Vol. 93(3). - P. 423–432.
6. Melchers R. E. The effect of corrosion on the structuralreliability of steel offshore structures / R. E. Melchers // Corrosion Science. - 2005. - Vol. 47. - P. 2391–2410.
7. Garbatov Y. Bayesian Updating in the Reliability Assessment of Maintained Floating Structures / Y. Garbatov and C. GuedesSoares // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. - 2002. - Vol. 124. - P. 139–145.
8. GuedesSoares C. Reliability of maintained, corrosion protected plates subiected to non-linear corrosion and compressive loads / C. GuedesSoares, Y. Garbatov // Marine Structures. - 1999. - Vol. 12. - P. 425–445.
9. Moarefzadeh M. R. Nonlinear wave theory in reliability analysis of offshore structures / M. R. Moarefzadeh, R. E. Melchers // Probabilistic Engineering Mechanics. - 2006. - Vol. 21(2). - P. 99–111.
10. Bik YU. I. Indeksbezopasnostikakmeranadezhnostistroitel'nykhkonstruktsiy / YU. I. Bik, V. V. Degtyareva // Nauch. izd. NauchnyyeproblemtransportaSibiriiDal'negoVostoka. N-sk. SGUVT. - № 3–4. - 2016. - P. 57–59
11. Bekker A. T. Bezopasnost' shel'fovykhsooruzheniyprivozdeystviidreyfuyushchikhledyanykhobrazovaniy / A. T. Bekker, L. V. Kim // Naukaibezopasnost'. - 2015. - № 2 (15). - P. 79–88.
12. Tsuprik V.G. Metodologicheskiyeaspektyobosnovaniyariskovpriopredeleniinadezhnostislozhnykhtekhnicheskikhsystemtipamorskikhledostoykikhosnovaniy / V. G. Tsuprik // VestnikDal'nevostochnogogosudarstvennogotekhnicheskogouniversiteta.- 2011. - № 1(6). - P. 106–126.
13. Bolotin V. V. Metodyteoriiveroyatnostiiteoriinadezhnosti v raschetakhsooruzheniy / V. V. Bolotin. - M.: Stroyizdat, 1982. –P. 279.
14. Rzhanitsyn A. R. Teoriyaraschetastroitel'nykhkonstruktsiynanadezhnost' / A. R. Rzhanitsyn. M.: Stroyizdat,1978. - C. 239.
15. Kostyukov V. D. Veroyatnostnyyemetodyraschetazapasovprochnosti idolgovechnostiportovykhgidrotekhnicheskikhsooruzheniy / V. D. Kostyukov. M.: Transport, 1979. - C. 15, C.39-67.
16. Pivon YU. I. Ekspluatatsionnayanadezhnost' sushchestvuyushchikhprichalov vusloviyakhsibiri: dis. ... kand. tekh. nauk: 05.22.19 / PivonYuriyIvanovich. –Novosibirsk, 2000. -132 p.
17. Sakhnenko M. A. Zavisimost' koeffitsiyentanadezhnostiotsrokaeksploatatsiiprichal'nogosooruzheniya i svyaz'yego s veroyatnost'yubezotkaznoyraboty / M. A. Sakhnenko // Nauka i tekhnikatransporta. - 2007. - № 3. - P. 60–64.
18. ManapovA. Z. Otsenkanadezhnostikonstruktsiisuchetomkorrozionnogoiznosa / A. Z. Manapov, I. YU. Maystrenko // Izvestiya KGASU. - 2006. - №1(5). -P. 64–73.
19. Krasnov N. V. Stal'nyyeshpuntovyyesvai v portovomgidrotekhnicheskomstroitel'stve / N. V. Krasnov. - M.: Transport,1982. - 133 p.
20. RD 31.31.35-85 Osnovnyye polozheniya rascheta prichal'nykh sooruzheniy na nadezhnost'. - Moskva: V/O «Mortekhinformreklama», 1984.
21. Nguyen V. V. Raschetprichal'nykhsooruzheniypoteoriinadezhnos

ti / V. V. Nguyen. Khanoy: Transport (MinisterstvoTransportaV'yetnama),1996. –P.77.
22. Bailey, S. I. Corrosion of Stainless Steels in the Marine Splash Zone / Bailey, S. I. and Li, X. // Advanced Materials Research. - 2013. - Vol. 610–613. - P. 272–275.
23. Xiang-rong, Z. Study on the corrosion peak of carbon steel in marine splash zone / Xiang-rong, Z., Gui-qiao, H. &Cai-feng, L. // Chin. J. Ocean. Limnol. - 1997. - Vol. 15. - P. 378–380.
24. Liang M. Corrosion and pitting of 6060 series aluminium after 2 years exposure in seawater splash, tidal and immersion zones / M. Liang, R. Melchers, I. Chaves // Corrosion Science. - 2018. - Vol. 140. - P. 286–296.
25. Vu, V. M. Katodnayazashchitamorskikhsooruzheniy, udalennykhotstatsionarnykhistochnikovelektrosnabzheniya / V. M. Vu, B. B. Chernov, A. M. Nugmanov, L. YU. Firsova // Morskoyvestnik. – 2020. – № 1(73). – P. 66–69.
26. Fam V. CH. Ekspluatatsionnoynadezhnost' morskikhprichalov v portakhV'yetnama: dis. ... kand. tekh. nauk: 05.22.19 / Fam Van Chung. - M., 2010. -162 p.
27. Vu, V. M. Otsenkaeffektivnostiprimeneniyakatodnoyzashchitymorskikhsooruzheniy s pitaniyemotsolnechnykhpaneley / V. M. Vu, B. B. Chernov, A. M. Nugmanov // Ekspluatatsiyamorskogotransporta. - 2019. - № 4(93). -P. 132–137.

УДК: 656.612: 656.613.2
DOI: 10.34046/aumsuomt94/22

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ROLLOVER ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАВУЧИХ РЕГАЗИФИКАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Д. А. Давыдов, аспирант
А. С. Арангулов, аспирант
В. А. Туркин, доктор технических наук, профессор

В статье предоставлен анализ эксплуатации плавучих регазификационных установок (ПРГУ) сжиженного природного газа (СПГ). Осуществляется обзор состояния отрасли на данный момент. Проводится сравнение плавучих регазификационных установок и терминалов хранения сжиженного природного газа, рассматриваются их преимущества и недостатки. Рассматривается такое явление как Rollover (перемешивание слоёв СПГ с резким повышением избыточного давления в танке), его суть, причины, предпосылки и стадии протекания. Выполнен анализ возможности снижения риска возникновения Rollover исходя из компонентного состава и состояния сжиженного природного газа. Также предоставлены рекомендации для предотвращения возникновения Rollover во время и после грузовых операций по приёму сжиженного природного газа, исходя из особенностей эксплуатации плавучей регазификационной установки. Показано, что во время грузовых операций необходимо тщательно следить за параметрами, падение или повышение которых может вызвать срабатывание автоматической системы прерывания погрузки, так как после её срабатывания потребуется время, чтобы восстановить режим работы всего сопряжённого оборудования, за которое давление в танке может достичь давления срабатывания предохранительных клапанов.
Ключевые слова: плавучая регазификационная установка, ПРГУ, сжиженный природный газ, СПГ, Rollover, танкер-газовоз, MARVS

This article provides an analysis of floating regasification units (FSRU) for liquefied natural gas (LNG) operation. The current state of the industry reviewed. The comparison of floating storage regasification units and liquefied natural gas storage terminals carried out, their advantages and disadvantages are considered. Phenomenon such as Rollover (mixing of LNG layers with a rapid excessive pressure increase in the tank), its essence, reasons, premises and stages of flow are considered. The analysis of Rollover risk reducing possibility based on the component composition and condition of liquefied natural gas carried out. Also provided recommendations for prevention occurrence of Rollover during and after cargo operations of liquefied natural gas loading, based on the operating characteristics of the floating storage regasification unit. It is shown that during cargo operations it is necessary to carefully monitor the parameters, the fall or increase of which can trigger the automatic loading interruption system, since after its operation it will take time to restore the operation of all associated equipment, during which the pressure in the tank can reach the response pressure safety valves.
Keywords: Floating storage regasification unit, FSRU, liquefied natural gas, LNG, Rollover, LNG carrier, MARVS

Введение

В течение последних лет роль и значение природного газа в энергобалансе мировой экономики постоянно возрастает, что обусловлено как его высокой эффективностью в качестве энергетического ресурса и сырья для промышленности, так и повышенной в сравнении с нефтью и углем экологичностью. Это обусловлено тем, что в процессе сжижения происходит очистка газа от вредных примесей и сернистых соединений, поэтому на выходе получается практически чистый газ с высоким содержанием метана. Гибкость транс-