

УДК 622.242.422 622.276.04 622.279.04

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА
ПО МЕТОДУ ВЕЙБУЛА НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА РЕСУРСА
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ
ПЛАТФОРМ**

**ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF DETERMINING
THE RESOURCE BY THE WEIBUL METHOD ON THE EXAMPLE
OF RESOURCE CALCULATING OF WELDED JOINTS
OF MARINE STATIONARY PLATFORMS**

Ч.С. Гусейнов, И.В. Староконь

**Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,
г. Москва, Российская Федерация**

Chingiz S. Huseynov, Ivan V. Starokon

**Russian State University of Oil and Gas (National Research University)
named after I.M. Gubkin, Moscow, Russian Federation**

e-mail: starokon79@mail.ru

Аннотация. В мире идет активное освоение морских нефтегазовых месторождений. Для добычи на шельфе активно применяются различные гидротехнические сооружения, среди которых широкое распространение получили морские стационарные платформы. В процессе эксплуатации на морские платформы воздействуют различные нагрузки, что приводит к возникновению переменных напряжений, активирующих в сварных соединениях и основных конструктивных элементах морских платформ усталостные процессы с последующим разрушением. Часто именно сварные соединения

морских платформ подвергаются усталостному разрушению ввиду конструктивных особенностей их исполнения, и поэтому они являются такими участками морских сооружений, для которых вероятности риска их усталостного разрушения повышены. Поэтому определение значений длительности безопасной эксплуатации сварных соединений морских платформ с момента начала их эксплуатации и до наступления их разрушения, которая также называется ресурсом, является ключевым требованием для обеспечения безопасной эксплуатации этих сооружений.

Целью статьи является определение эффективности применения метода Вейбулла для оценки ресурса сварных соединений морских стационарных платформ и возможности его применения для решения частных задач экспертизы промышленной безопасности морских стационарных платформ.

В статье рассматривается метод оценки ресурса, базирующийся на распределении Вейбулла. Распределение Вейбулла используют для моделирования данных из распределений с возрастающей, убывающей и постоянной интенсивностью отказов и применяют к широкому спектру данных (наработка до отказа, количество циклов до отказа, механическое напряжение до отказа и т.д.). Расчеты проводились на основании данных, описанных в «DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций».

Оценка ресурса по методу Вейбулла имеет значительный опыт промышленного применения, она показала свою высокую результативность. Однако, по мнению авторов, данную методику сложно применять при решении частных задач проведения экспертизы промышленной безопасности, например при продлении ресурса сварных соединений, восстановленных после ремонта. Кроме того, ресурс, рассчитанный по методу Вейбулла, зависит от вероятности разрушения, и при вероятности разрушения 10^{-2} сварное соединение может быть допущено к эксплуатации, а при уровне заданной надежности 10^{-4} при тех же самых эксплуатационных условиях – уже нет. Помимо этого, следует учитывать,

что точность определения ресурса по методу Вейбулла, предложенная в зарубежной нормативной документации, не в полной мере соответствует требованиям, приведенным в отечественной нормативной базе. Поэтому применение метода Вейбулла (приведенное в документе «DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций»), например, при решении задачи оценки допустимого риска гибели персонала платформы, потребует дополнительного увеличения его точности до значений $6,7 \cdot 10^{-6}$.

Abstract. The world is actively developing offshore oil and gas fields. Various hydraulic structures are actively used for offshore production, among which offshore fixed platforms are widely used. During operation, various loads act on offshore platforms, which leads to the appearance of alternating stresses, activating fatigue processes in welded joints and the main structural elements of offshore platforms, with their subsequent destruction. Often, it is the welded joints of offshore platforms that undergo fatigue failure due to the design features of their execution, and therefore they are such areas of offshore structures for which the probability of the risk of their failure is increased. Therefore, the determination of the duration of safe operation of welded joints of offshore platforms from the moment of their operation until the onset of their destruction, which is also called a resource, is a key requirement for ensuring the safe operation of these structures.

The purpose of the article is to assess the effectiveness of the Weibull method for assessing the service life of welded joints on offshore fixed platforms.

This article discusses a resource estimation method based on the Weibull distribution. The Weibull distribution is used to model data from distributions with increasing, decreasing and constant failure rates and is applied to a wide range of data (time to failure, number of cycles to failure, stress to failure, etc.). Calculations were made based on data, described in DNV-RP-C103. Rekomendovannaya praktika. Raschet ustalosti morskikh stalnykh konstruktsii.

Resource assessment by the Weibull method has significant experience in industrial application and has shown its high efficiency. However, according to

the author, this technique is difficult to apply when solving particular problems of industrial safety examination, for example, when extending the service life of welded joints restored after repair. In addition, the resource, calculated by the Weibull method, depends on the probability of failure and with a failure probability of 10^{-2} , the welded joint can be allowed to operate, and at a given reliability level of 10^{-4} under the same operating conditions, it is no longer. In addition, it should be borne in mind that the accuracy of determining the resource by the Weibull method proposed in foreign regulatory documents does not fully comply with the requirements of the domestic regulatory framework. Therefore, the use of the Weibull method (given in DNV-RP-C103. Rekomendovannaya praktika. Raschet ustalosti morskikh stalnykh konstrukttsii), for example, when solving the problem of assessing the permissible risk of death of platform personnel, will require an additional increase in its accuracy to values $6.7 \cdot 10^{-6}$.

Ключевые слова: морские стационарные платформы; накопление повреждений; методы расчета ресурса; сварные соединения; диаграммы усталости

Key words: offshore fixed platforms; damage accumulation; life calculation methods; welded joints; fatigue diagrams

В мире ведется активное освоение морских месторождений нефти, газа и иных ресурсов, которые играют ключевую роль в производстве энергии во всем мире. Значительное количество производимой в мире энергии приходится на счет переработки нефтегазовых ресурсов. Добыча углеводородных ресурсов ведется как на сухопутных, так и на морских месторождениях. Следует отметить, что на шельфе, принадлежащем РФ, содержится 25 % запасов нефти и 50 % запасов газа от общих запасов нашей страны. Распределены они следующим образом: Баренцево море – 49 %, Карское – 35 %, Охотское – 15 %, Черное, Каспийское море и Балтийское – 1 % [1].

Следует подчеркнуть, что добыча углеводородных ресурсов ведется в неблагоприятных морских условиях, которые характеризуются значительными ледовыми, ветровыми, волновыми и иными нагрузками [2–7].

В настоящее время в Российской Федерации активно разрабатываются месторождения нефти и газа на шельфе, а в ближайшей перспективе планируется разработка месторождений в Арктике, отличительной чертой которых являются значительные ледовые нагрузки и экстремальные температурные воздействия. Существуют также планы по строительству в Арктике морских платформ, на которых будут расположены предприятия по сжижению газа. Строительство таких заводов позволит существенно снизить производственные затраты на сжижение газа ввиду низких температур окружающей среды. В последние годы особый интерес представляют перспективные проекты морской ветровой электрогенерации, которые заключаются в установке на морских акваториях (для которых характерны существенные ветровые потоки) специальных морских платформ, на которых будут расположены ветровые электрогенераторы. К настоящему моменту в ряде европейских стран такие проекты уже реализованы. Примером может служить электростанция London Array (рисунок 1).



Рисунок 1. Морские ветровые электрогенераторы

В процессе освоения морских месторождений используется различное оборудование, расположенное на морских платформах (МСП). Морские платформы являются одним из наиболее распространенных объектов морской нефтегазодобычи и играют важную роль в решении задач по освоению шельфа (рисунок 2). В настоящее время общее количество таких сооружений превышает несколько тысяч.

МСП относятся к классу опасных производственных объектов [8], для которых существует значительный риск возникновения аварийных ситуаций, которые могут иметь серьезные последствия для находящихся в зоне аварии, для жизни и здоровья работающего на морской платформе персонала, для оборудования и природной среды. С целью предупреждения аварии на МСП, согласно п. 6 «Правила безопасности морских объектов нефтегазового комплекса» [9], предусматриваются проектные решения, позволяющие обеспечить прочность в условиях воздействия нагрузок.



Рисунок 2. Морские стационарные платформы

Одним из таких решений является оценка ресурса морской платформы (основных конструктивных элементов, сварных соединений платформы и

т.д.). Под ресурсом будем понимать длительность эксплуатации платформы с момента ввода её в эксплуатацию и до достижения ею предельного состояния (определяемого нормативно-технической документацией), препятствующего её безопасной эксплуатации. На значение ресурса прямое влияние оказывают условия эксплуатации платформы. Хорошо известно, что в течение всего срока эксплуатации на конструктивные элементы и сварные соединения морских платформ воздействуют различные нагрузки, что приводит к возникновению переменных напряжений. Очевидно, что переменные напряжения вызывают в сварных соединениях и основных конструктивных элементах морских платформ усталостное разрушение. Неоднократные диагностические обследования показали, что наиболее часто именно сварные соединения морских платформ подвергались усталостному разрушению ввиду конструктивных особенностей их исполнения. В связи этим, сварные соединения морских платформ являются участками морских сооружений с повышенной вероятностью риска их усталостного разрушения. Поэтому определение значений длительности безопасной эксплуатации сварных соединений морских платформ с момента начала их эксплуатации и до наступления их разрушения, которая также называется ресурсом, является ключевым требованием для обеспечения безопасной эксплуатации этих сооружений.

В настоящее время разработаны различные методики оценки ресурса морских платформ [9]. Большинство из этих методов базируется на анализе переменных напряжений, вызванных в элементах и сварных соединениях платформ влиянием внешних нагрузок и воздействием окружающей среды [10–13].

Особый интерес представляет метод оценки ресурса, базирующейся на оценке ресурса по методу Вейбулла и рекомендуемый к использованию в нормативном документе [13]. В России этот метод также носит название метод «Вейбулла – Гнеденко». Распределение Вейбулла используют для моде-

лирования данных из распределений с возрастающей, убывающей и постоянной интенсивностью отказов и применяют к широкому спектру данных (наработка до отказа, количество циклов до отказа, механическое напряжение до отказа и т.д.). Согласно документу [13], долгосрочное распределение диапазона напряжений в сварном соединении морских платформ можно представить как двухпараметрическое распределение Вейбулла. При использовании распределения Вейбулла для различных условий нагрузки применяется однонаклонная усталостная кривая, и ресурс определяется согласно формуле:

$$\eta \geq \frac{v_0 T_d}{\alpha} q^m \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right), \quad (1)$$

Где η – коэффициент использования;

T_d – расчетный срок службы в секундах;

h – параметр формы распределения диапазона напряжения по Вейбуллу;

$\Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right)$ – гамма функция [13];

α – параметр в логарифмическом уравнении, описывающим диаграмму усталости;

m – показатель наклона кривой усталости;

v_0 – средняя частота перехода через нулевой уровень;

q – параметр масштаба распределения диапазона напряжения по Вейбуллу, рассчитываемый по формуле (2):

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{\frac{1}{h}}}, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_0$ – предел усталости сварного соединения;

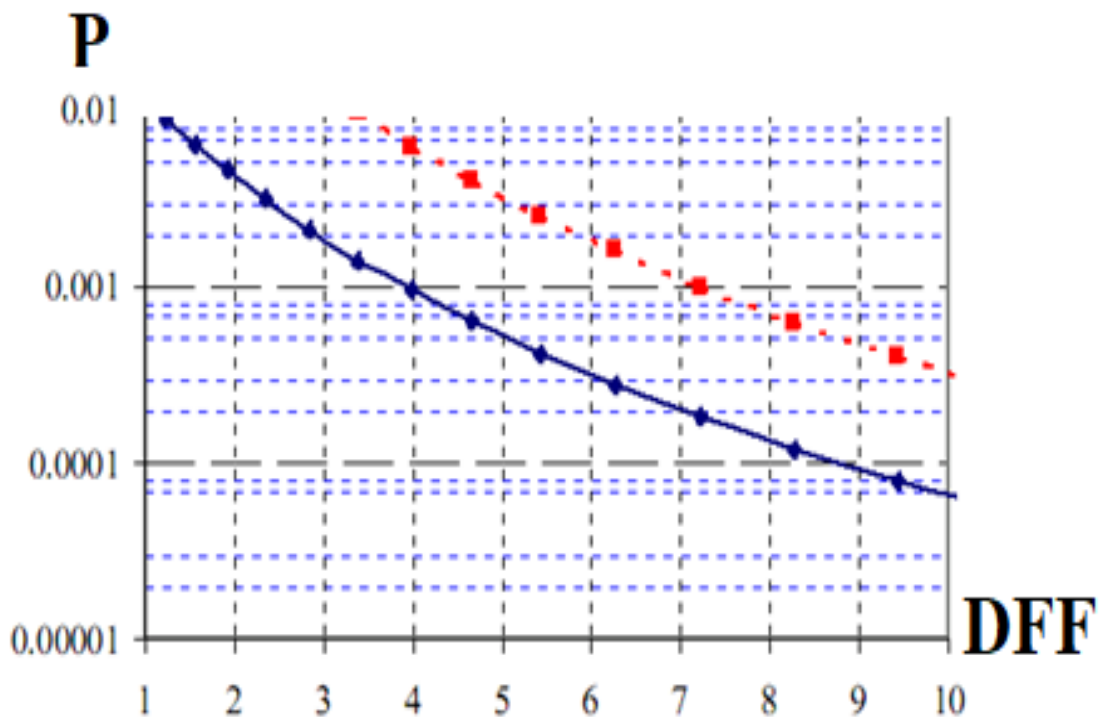
n_0 – количество циклов, соответствующее значению предела выносливости $\Delta\sigma_0$.

Коэффициент использования η в левой части уравнения определяется в зависимости от коэффициента усталости DFF и срока эксплуатации из таблицы 1.

Таблица 1. Взаимосвязь коэффициента использования η от коэффициента усталости DFF и срока эксплуатации морской платформы

Коэффициент усталости DFF	Срок эксплуатации, лет						
	5	10	15	20	25	30	50
1	4,0	2,0	1,33	1,00	0,80	0,67	0,40
2	2,0	1,0	0,67	0,50	0,40	0,33	0,20
...
10	0,40	0,20	0,13	0,10	0,08	0,07	0,04

В свою очередь, коэффициент усталости DFF можно определить, исходя из графика в зависимости от заданной вероятности разрушения P (рисунок 3). Чем меньше величина вероятности разрушения, тем больше величина коэффициента DFF. Предположим, что мы задаем условие вероятности разрушения сварного соединения морской платформы менее чем 0,001 в течении 25-летнего срока эксплуатации. В этой ситуации коэффициент использования η будет равен 0,08 (таблица 1).



красная линия – в течение всего срока эксплуатации морской платформы;
 синяя линия – в течение одного года эксплуатации морской платформы

Рисунок 3. Взаимосвязь коэффициента усталости DFF и вероятности разрушения рассматриваемого сварного соединения

Произведем расчет правой части уравнения (1). Согласно таблице 2.1 [13] для трубчатых соединений морской платформы принимаются значения $m = 3$ и $lg(\alpha) = 12,164$. Следовательно, α будет равно $1,45881 \cdot 10^{12}$.

Проведем анализ условий эксплуатации сварного соединения на примере задачи, описанной в работе [14] (таблица 2). Детальная информация об особенностях напряженно-деформированного состояния сварных соединений морских платформ, изменения структуры и свойств ремонтных сварных соединений и эффективность различных технологий ремонта приведены в работах [15–20].

Таблица 2. Значения амплитуд переменных напряжений, действующих в сварном соединении морской стационарной платформы

Номер ступени	Величина напряжения в сварном соединении σ_{ai} , МПа	Количество циклов $v_{i\sigma}$	Вспомогательный параметр t_i
1	82	430	0,000719921
2	60	2425	0,004060018
3	40	8447	0,014142256
4	32	22912	0,038360054
5	24	48386	0,081009496
6	20	514688	0,861708255

Поскольку максимальный размах напряжения равен 82 МПа, то согласно 5-3 документа [13], параметр формы распределения по Вейбуллу h будет равен 1,2. В этой ситуации гамма-функция Γ определяется согласно таблице 3 и равна 4,306 [13]. Значения гамма-функции Γ в зависимости от формы распределения по Вейбуллу h при постоянном значении $m = 3$ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Некоторые значения гамма-функции Γ в зависимости от формы распределения по Вейбуллу h [13]

h	0,97	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,20
Γ	6,750	6,483	6,234	6,000	5,781	5,575	5,382	5,200	5,029	4,868	4,715	4,571	4,435	4,306

Согласно формуле (2) определим q :

$$q = \frac{52,76}{(\ln 10^7)^{\frac{1}{1,2}}} = 5,202475$$

Согласно требованиям, расчет необходимо проводить не в годах, а в секундах. Поэтому 25 лет эксплуатации в переводе на секунды составит 788400000 с.

Отдельно следует рассмотреть определение частоты перехода напряжений через значение предела выносливости $\Delta\sigma_0$. Специфика волнового воздействия такова, что рассматриваемые в сварном соединении напряжения растяжения–сжатия по своей природе близки к коэффициенту асимметрии цикла $R = -1$. Совершенно очевидно, что частота таких пересечений напрямую зависит от периода волнового воздействия и определяется по формуле:

$$v_0 = \frac{1}{T}, \quad (3)$$

где v_0 – средняя частота перехода через нулевой уровень;

T – период рассматриваемой волны.

Период волны T можно легко определить, исходя из номограммы (рисунок 4), приведенной в нормативном документе [21]. Согласно этому документу, период волны можно определить как в зависимости от скорости ветра и глубины на шельфе, так и в зависимости от длины разгона волны и скорости ветра.

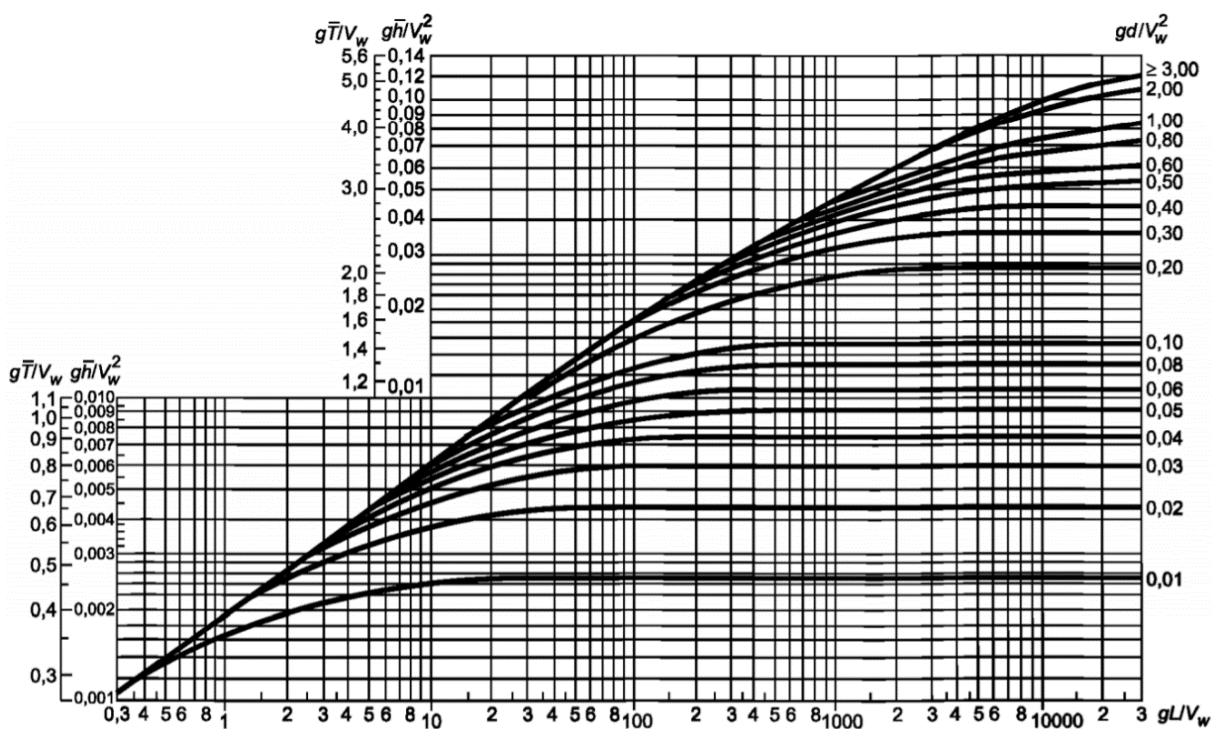


Рисунок 4. Номограмма определения периода волны T в зависимости от скорости ветра и глубины на шельфе и в зависимости от длины разгона волны и скорости ветра [21]

Согласно анализу проектной документации на морские платформы, расположенные в Черноморском регионе РФ, значение частоты волновой нагрузки можно принять равным 0,2. Однако это значение надо рассчитывать для каждого конкретного случая. Подставим все вычисленные значения в уравнение:

$$0,08 \geq \frac{0,2 \cdot 78840000}{1,45881 \cdot 10^{12}} \cdot 5,202475^3 \cdot 4,306 = 0,065^{\square}$$

Из полученных результатов становится очевидно, что условие обеспечения прочности выполняется.

Проведем оценку полученных результатов на соответствие требованиям отечественной нормативно-технической документации. Одним из важнейших аспектов при оценке безопасности эксплуатации морских стационарных платформ является определение допустимого риска гибели персонала при полном разрушении платформы.

Подобное разрушение может произойти в силу различных причин, в том числе и в случае усталостного разрушения элементов и сварных соединений платформы в условиях шторма.

Опираясь на данные, приведенные в работе [22], можно сделать вывод о том, что при полном разрушении морской платформы вероятность гибели при эвакуации оценивается по данным DNV как 18,2 %. Так как численность персонала платформы в зависимости от проекта колеблется от 100 до 200 человек, то согласно таблице № 6-3 [23], морские стационарные платформы можно отнести к опасным производственным объектам с высоким риском аварии.

В соответствие с рекомендациями таблицы № 3-1 приложения № 3 [24] ежегодный риск гибели людей при аварии на опасном производственном объекте нефтегазового комплекса в среднем за 2011–2015 гг. достигал 134 погибших на один миллион рискующих.

Согласно таблице № 4-1 приложения № 4 [24], коэффициент запаса для установления риска гибели персонала на данном опасном производственном объекте составляет 50 (при этом может применяться дополнительный понижающий коэффициент для объекта нового строительства, который равен 3).

Следовательно, вероятность допустимого риска гибели персонала от поражающих факторов аварии на морской стационарной платформе не должна превышать значение $6,7 \cdot 10^{-6}$. При этом максимальное значение оценки вероятности неразрушения, согласно диаграмме на рисунке 3, составляет $6 \cdot 10^{-5}$, что выше вероятности наступления допустимого риска гибели персонала. Таким образом, точность определения ресурса по методу Вейбулла, предложенная в нормативном документе [13], не соответствует требованиям, приведенным в нормативном документе [23].

Выводы

Оценка ресурса по методу Вейбулла имеет значительный опыт промышленного применения и показала свою высокую результативность. Однако, по мнению авторов, данную методику сложно применять при решении частных задач проведения экспертизы промышленной безопасности, например при продлении ресурса сварных соединений, восстановленных после ремонта. Кроме того, ресурс, рассчитанный по методу Вейбулла, зависит от вероятности разрушения, и при вероятности разрушения 10^{-2} сварное соединение может быть допущено к эксплуатации, а при уровне заданной надежности 10^{-4} при тех же самых эксплуатационных условиях – уже нет. Помимо этого, следует учитывать, что точность определения ресурса по методу Вейбулла, предложенная в зарубежной нормативной документации, не в полной мере соответствует требованиям отечественной нормативной базы.

Список используемых источников

1. Осадчий А. Нефть и газ российского шельфа: оценки и прогнозы // Наука и жизнь. 2006. № 7. URL: <http://www.nkj.ru/archive/articles/6334/> (дата обращения: 09.08.2020).
2. Pudlo D., Flesch S., Albrecht D., Reitenbach V. The Impact of Hydrogen on Potential Underground Energy Reservoirs // Geophysical Research Abstracts. 2018. Vol. 20. EGU2018-8606. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-8606.pdf> (дата обращения: 09.08.2020).
3. Panfilov M., Reitenbach V., Ganzer L. Self-Organization and Shock Waves in Underground Methanation Reactors and Hydrogen Storages // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. Article Number 313. DOI: 10.1007/s12665-015-5048-5.
4. Reitenbach V., Ganzer L., Albrecht D. Influence of Hydrogen on Underground Gas Storage. Hamburg: DGMK, 2014. 160 p.
5. Ganzer L., Reitenbach V., Pudlo D., Albrecht D., Singhe A.T., Awemo K.N., Wienand J., Gaupp R. Experimental and Numerical Investigations on CO₂ Injection and Enhanced Gas Recovery Effects in Altmark Gas Field (Central Germany) // Acta Geotechnica. 2014. Vol. 9 (1). P. 39-47.
6. Yuan Z., Schubert J., Esteban U.C., Chantose P., Teodoriu C. Casing Failure Mechanism and Characterization Under HPHT Conditions in South Texas // Materials of SPE International Petroleum Technology Conference. Beijing, China. 2013. IPTC-16704-MS. DOI: 10.2523/IPTC-16704-MS.
7. Teodoriu C. Selection Criteria for Tubular Connection used for Shale and Tight Gas Applications // European Unconventional Resources: Materials of SPE/EAGE Conference and Exhibition. Vienna, Austria. 2012. SPE-153110-MS. DOI: 10.2118/153110-MS.
8. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с посл. изм. и доп. от 29.07.2018 г.) // КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (дата обращения: 10.08.2020).

9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности морских объектов нефтегазового комплекса». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. Серия 08. Вып. 23. 68 с.

10. Староконь И.В. Проблемы оценки и продления остаточного ресурса морских стационарных платформ // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 12. С. 51-54. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-12-51-54.

11. Серенсен В., Когаев В.П. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 197 с.

12. DNV-RP 2A-WSD. Рекомендуемая практика планирования, проектирования и сооружения морских стационарных платформ-расчет по допустимым напряжениям. Нью-Йорк: American Bureau of Shipping, 2005. 132 с.

13. DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций. Хёвик: DNV, 2008. 158 с.

14. Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Тиньгаев А.К. Определение остаточного ресурса опорного блока морской стационарной платформы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2012. № 1. С. 65-70.

15. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения. Часть 1. Конструирование. М.: Недра-Бизнесцентр, 2006. 555 с.

16. Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Уткин И.Ю., Рамусь А.А., Пономаренко Д.В., Севостьянов С.П., Рамусь Р.О. Оценка структуры и свойств ремонтных сварных соединений газопроводов из сталей с повышенными показателями деформируемости // Сварочное производство. 2019. № 12. С. 40-46.

17. Макаров Г.И., Капустин О.Е. Компьютерные методы расчета и проектирования сварных конструкций нефтегазового профиля с использованием метода конечных элементов // Сварочное производство. 2019. № 11. С. 3-9.

18. Староконь И.В. Результаты математического анализа напряженного состояния морских нефтегазопромысловых сооружений при наличии в них трещин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. № 12. С. 54-57.

19. Староконь И.В., Калашников П.К. Оценка эффективности технологии ремонта сварного соединения «К»-типа морских стационарных платформ с учетом накопленных повреждений // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 4 (328). С. 56-60. DOI: 10.33285/0130-3872-2020-4(328)-56-60.

20. Староконь И.В., Романенко О.А., Шелчкова Н.С. Оценка пределов выносливости элементов морских нефтегазопромысловых сооружений с учетом накопленных повреждений // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2018. № 2. С. 15-17.

21. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) // Московский территориальный строительный каталог. URL: <http://mtsk.mos.ru/Handlers/Files.ashx/Download?ID=10908> (дата обращения: 11.08.2020).

22. Хафизов Ф.Ш., Пережогин Д.Ю., Краснов А.В., Султанов Р.М., Бутович В.И. Частота возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций на морских буровых платформах // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 5. С. 171-190. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p171-190_KhafizovFSh_ru.pdf (дата обращения: 11.08.2020).

23. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. Серия 27. Вып. 16. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293755/4293755568.htm> (дата обращения: 12.08.2020).

24. Руководство по безопасности «Методика установления допустимого риска аварии при обосновании безопасности опасных производственных объектов нефтегазового комплекса». М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. Серия 08. Вып. 32. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293752/4293752438.htm> (дата обращения: 12.08.2020).

References

1. Osadchii A. Neft' i gaz rossiiskogo shel'fa: otsenki i prognozy [Oil and Gas of the Russian Shelf: Estimates and Forecasts]. *Nauka i zhizn' – Science and Life*, 2006, No. 7. Available at: <http://www.nkj.ru/archive/articles/6334/> (accessed 09.08.2020). [in Russian].

2. Pudlo D., Flesch S., Albrecht D., Reitenbach V. The Impact of Hydrogen on Potential Underground Energy Reservoirs. *Geophysical Research Abstracts*, 2018, Vol. 20, EGU2018-8606. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-8606.pdf> (accessed 09.08.2020).

3. Panfilov M., Reitenbach V., Ganzer L. Self-Organization and Shock Waves in Underground Methanation Reactors and Hydrogen Storages. *Environmental Earth Sciences*, 2016, Vol. 75, Article Number 313. DOI: 10.1007/s12665-015-5048-5.

4. Reitenbach V., Ganzer L., Albrecht D. *Influence of Hydrogen on Underground Gas Storage*. Hamburg, DGMK, 2014. 160 p.

5. Ganzer L., Reitenbach V., Pudlo D., Albrecht D., Singhe A.T., Awemo K.N., Wienand J., Gaupp R. Experimental and Numerical Investigations on CO₂ Injection and Enhanced Gas Recovery Effects in Altmark Gas Field (Central Germany). *Acta Geotechnica*, 2014, Vol. 9 (1), pp. 39-47.

6. Yuan Z., Schubert J., Esteban U.C., Chantose P., Teodoriu C. Casing Failure Mechanism and Characterization Under HPHT Conditions in South Texas. *Materials of SPE International Petroleum Technology Conference*. Beijing, China, 2013, IPTC-16704-MS. DOI: 10.2523/IPTC-16704-MS.

7. Teodoriu C. Selection Criteria for Tubular Connection used for Shale and Tight Gas Applications. *Materials of SPE/EAGE Conference and Exhibition European Unconventional Resources*. Vienna, Austria, 2012, SPE-153110-MS. DOI: 10.2118/153110-MS.

8. *Federal'nyi zakon ot 21.07.1997 № 116-FZ «O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov» (s posl. izm. i dop. ot 29.07.2018 g.)* [RF Federal Law of July 21, 1997 No. 116-FZ «On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities» (with the Additions and Amendments of July 29, 2018)]. Konsul'tantPlyus. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (accessed 10.08.2020). [in Russian].

9. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti «Pravila bezopasnosti morskikh ob"ektov neftegazovogo kompleksa»* [Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety «Safety Rules for Offshore Oil and Gas Facilities»]. Moscow, ZAO NTTs PB Publ., 2015, Series 08, Issue 23. 68 p. [in Russian].

10. Starokon I.V. Problemy otsenki i prodleniya ostatochnogo resursa morskikh stacionarnykh platform [Problems of Assessment and Prolongation of Remaining Operational Time of Offshore Stationary Platforms]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more – Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*, 2019, No. 12, pp. 51-54. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-12-51-54. [in Russian].

11. Serensen V., Kogaev V.P. *Nesushchaya sposobnost' i raschet detalei mashin na prochnost'* [Bearing Capacity and Strength Calculation of Machine Parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 197 p. [in Russian].

12. *DNVRP 2A-WSD. Rekomenduemaya praktika planirovaniya, proektirovaniya i sooruzheniya morskikh stacionarnykh platform-raschet po dopustimym napryazheniyam* [DNVRP 2A-WSD. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms: Working Stress

Design]. New York, American Bureau of Shipping Publ., 2005. 132 p. [in Russian].

13. *DNV-RP-C103. Rekomendovannaya praktika. Raschet ustalosti morskikh stal'nykh konstruktsii* [DNV-RP-C103. Recommended Practice. Fatigue Analysis of Offshore Steel Structures]. Hyvik, DNV Publ., 2008. 158 p. [in Russian].

14. Gubaidulin R.G., Gubaidulin M.R., Tingaev A.K. *Opredelenie ostatochnogo resursa opornogo bloka morskoi statsionarnoi platformy* [Determination of the Residual Life of the Support Block of the Offshore Stationary Platform]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN – Akademicheskij Vestnik UralNIIproekt RAASN*, 2012, No. 1, pp. 65-70. [in Russian].

15. Borodavkin P.P. *Morskie neftegazovye sooruzheniya. Chast' 1. Konstruirovaniye* [Offshore Oil and Gas Facilities. Part 1. Design]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2006. 555 p. [in Russian].

16. Efimenko L.A., Kapustin O.E., Utkin I.Yu., Ramus A.A., Ponomarenko D.V., Sevostyanov S.P., Ramus R.O. *Otsenka struktury i svoistv remontnykh svarnykh soedinenii gazoprovodov iz stalei s povyshennymi pokazatelyami deformiruemosti* [The Structure and Properties Evaluation of the Gas Pipelines Repair Welded Joints from Steels with Increased Deformability Indices]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2019, No. 12, pp. 40-46. [in Russian].

17. Makarov G.I., Kapustin O.E. *Komp'yuternye metody rascheta i proektirovaniya svarnykh konstruktsii neftegazovogo profilya s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov* [Computer Methods for Calculating and Designing Welded Structures of Oil and Gas Profile Through the use of the Finite Element Method]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding Production*, 2019, No. 11, pp. 3-9. [in Russian].

18. Starokon I.V. *Rezul'taty matematicheskogo analiza napryazhennogo sostoyaniya morskikh neftegazopromyslovykh sooruzhenii pri nalichii v nikh treshchin* [Mathematical Analysis Results of the Stress-State of the Offshore Oil

and Gas Facilities in Case of Cracks Presence in them]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti – Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry*, 2017, No. 12, pp. 54-57. [in Russian].

19. Starokon I.V., Kalashnikov P.K. Otsenka effektivnosti tekhnologii remonta svarnogo soedineniya «K»-tipa morskikh statsionarnykh platform s uchetom nakoplennykh povrezhdenii [Efficiency Estimation of the Technology of «K»-Type Welded Joint Repair of Marine Stationary Platforms with Account of Accumulated Damages]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more – Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*, 2020, No. 4 (328), pp. 56-60. DOI: 10.33285/0130-3872-2020-4(328)-56-60. [in Russian].

20. Starokon I.V., Romanenko O.A., Shelchkova N.S. Otsenka predelov vynoslivosti elementov morskikh neftegazopromyslovykh sooruzhenii s uchetom nakoplennykh povrezhdenii [Estimation of the Limits of the Stability of Elements of Marine Oil and Gas Industrial Constructions with Accident Damages]. *Vestnik Assotsiatsii burovykh podryadchikov – Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2018, No. 2, pp. 15-17. [in Russian].

21. SP 38.13330.2012. Nagruzki i vozdeistviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov) [SP 38.13330.2012. Loads and Impacts on Hydraulic Structures (from Wave, Ice and Ships)]. Moskovskii territorial'nyi stroitel'nyi katalog. URL: <http://mtsk.mos.ru/Handlers/Files.ashx/Download?ID=10908> (accessed 11.08.2020). [in Russian].

22. Khafizov F.Sh., Perezhogin D.Yu., Krasnov A.V., Sultanov R.M., Butovich V.I. Chastota vozniknoveniya pozharovzryvoopasnykh situatsii na morskikh burovykh platformakh [The Incidence of Fire and Explosion Hazard Situations on Offshore Drilling Platforms]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2017, No. 5, pp. 171-190. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2017/ogbus_5_2017_p171-190_KhafizovFSh_ru.pdf (accessed 11.08.2020). [in Russian].

23. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodicheskie osnovy po provedeniyu analiza opasnostei i otsenki riska avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh»* [Safety Guide «Methodological Foundations for Hazard Analysis and Accident Risk Assessment at Hazardous Production Facilities»]. Moscow, ZAO NTTs PB Publ., 2016, Series 27, Issue 16. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293755/4293755568.htm> (accessed 12.08.2020). [in Russian].

24. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Metodika ustanovleniya dopustimogo riska avarii pri obosnovanii bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov neftegazovogo kompleksa»* [Safety Guide «Methodology for Establishing the Permissible Risk of an Accident when Justifying the Safety of Hazardous Production Facilities of the Oil and Gas Complex»]. Moscow, ZAO NTTs PB Publ., 2016, Series 08, Issue 32. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293752/4293752438.htm> (accessed 12.08.2020). [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Гусейнов Чингиз Саибович, д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматизация проектирования сооружений нефтяной и газовой промышленности», Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, Российская Федерация

Chingiz S. Huseynov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation of Designing of Oil and Gas Industry Structures Department, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, Moscow, Russian Federation

e-mail: guseinov2@yandex.ru

Староконь Иван Викторович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Автоматизация проектирования сооружений нефтяной и газовой промышленности», Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», г. Москва, Российская Федерация

Ivan V. Starokon, Candidate of Engineering Sciences, Head of Automation of Designing of Oil and Gas Industry Structures Department, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, Moscow, Russian Federation

e-mail: starokon79@mail.ru