

УДК 622.242.422 622.276.04 622.279.04  
DOI: 10.46548/21vek-2020-0950-0002

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛОВ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОРСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ

© 2020

**Иван Викторович Староконь**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой "Автоматизации проектирования сооружений нефтяной и газовой промышленности"

*Российский государственный университет нефти и газа*

*(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина*

*(119991, г. Москва, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, E-mail: starokon79@mail.ru)*

**Аннотация.** На сегодняшний день активно ведется добыча нефти, газа и других полезных ресурсов на морских месторождениях с применением морских стационарных платформ. Согласно Федеральному закону №116 "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" морские платформы относятся к опасным производственным объектам, аварии на которых сопровождаются значительным ущербом. Для предотвращения аварий на этих объектах проводится экспертиза промышленной безопасности, в ход которой определяется их ресурс. Ключевым параметром для определения ресурса является значение предела выносливости (или предела усталости). В настоящее время применяются различные теории для определения предела усталости. Однако расчеты по этим теориям дают разные результаты. Целью данной статьи является исследование различных методов определения пределов выносливости на примере сварных соединений морских стационарных платформ и выбору метода, позволяющего получить наиболее точное значение этого предела.

**Ключевые слова:** морские, стационарные, платформы, усталость, предел, выносливости.

## ANALYSIS OF THE ACCURACY OF METHODS FOR DETERMINING ENDURANCE LIMITS FOR WELDED COMPOUNDS OF MARINE STATIONARY PLATFORMS

© 2020

**Ivan Viktorovich Starokon**, candidate of Technical Sciences,

Head of the Department of Automation of Designing of Oil and Gas Industry Structures

*Russian State University of Oil and Gas (national research university) named after I.M. Gubkin*

*(119991, Moscow, Leninsky Prospekt, building 65, building 1, E-mail: starokon79@mail.ru)*

**Abstract.** Today, oil, gas and other useful resources are being actively extracted at offshore fields using offshore stationary platforms. According to Federal Law No. 116 On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities, offshore platforms are classified as hazardous production facilities, accidents at which are accompanied by significant damage. To prevent accidents at these facilities, an industrial safety examination is conducted, during which their resource is determined. The key parameter for determining the resource is the value of the endurance limit (or fatigue limit). Various theories are currently being applied to determine the fatigue limit. However, calculations on these theories give different results. The purpose of this article is to study various methods for determining endurance limits using welded joints of offshore stationary platforms as an example and choosing a method that allows you to obtain the most accurate value of this limit.

**Keywords:** marine, stationary, platforms, fatigue, limit, endurance.

**Введение.** Общеизвестно, что на территории мирового океана (площадью семьдесят пять миллионов квадратных километров) имеются потенциально извлекаемые запасы углеводородных ресурсов. Разработка морских месторождений имеет давнюю историю и традиции. Например, в районе японского города Идзумосаки был сооружен искусственный остров, на котором были расположены буровые установки и иное необходимое для добычи нефти и газа оборудование. Это строительство датировано 1870 годом. Приблизительно к 1900 году были пробурены первые наклонные скважины недалеко от побережья Калифорнии. Активно велось освоение морских месторождений после окончания второй мировой войны. Так, например, с 1947 г. активно разрабатывались месторождения в районе

Мексиканского залива. В то время там были построены первые буровые платформы на свайном основании. Постепенно, с развитием технологий, нефтегазодобывающая инфраструктура все больше удалялась от берега. На начало двухтысячного года подтвержденные запасы газа на шельфе выросли до пятидесяти трех миллиардов кубометров и составили 33 % от мировых запасов газа. Потенциальные ресурсы российских морских нефтегазовых месторождений можно сравнить с потенциальными запасами крупнейших шельфовых месторождений мира. Если пересчитать эти запасы на условное топливо, то получится, что Россия обладает более ста миллиардами тонн условного топлива. Из этого количества 70 % нефтегазовых ресурсов находятся на глубинах менее 100 метров, что существенно об-

легчает их добычу.

Как это было сказано ранее, в настоящее время в мире активно ведется добыча нефти, газа и других полезных ресурсов на морских месторождениях. При разработке и эксплуатации месторождений нефти и газа на шельфе используются различные сооружения. В число этих сооружений входят плавучие буровые установки, самоподъемные буровые установки, морские стационарные платформы и множество типов других специальных сооружений. Особый интерес представляют морские стационарные платформы (МСП). Морские стационарные платформы имеют очень давнюю историю применения. Одним из первых в истории МСП были так называемые форты Гая Мансона (рис. 1), которые были построены в 1942 году в устье Темзы для защиты от немецкой авиации и эксплуатируются до сих пор в самых различных целях.



Рисунок 1 – Форты Гая Мэнсона.

В СССР морские стационарные платформы также имеют давнюю историю применения. Еще в 1949 году началась разработка месторождения "Нефтяные Камни", которые расположены на Каспийском море на расстоянии приблизительно 40 км к востоку от Апшеронского полуострова. Для добычи углеводородных ресурсов были построены стальные эстакады, на которых размещалось все необходимое оборудование. В наше время МСП очень часто применяются для добычи углеводородных ресурсов, металлов, минералов и других полезных ископаемых на морских месторождениях как отечественными, так и зарубежными компаниями. В России стационарные платформ расположены в различных регионах. Так, например, в районе Сахалина компанией ПАО «Газпром» эксплуатируются платформы: «Моликпак», «Пильтун-Астохская-Б» и «Лунская-А». МСП «Беркут» и «Орлан» эксплуатируются компанией ПАО «Роснефть». В акватории Каспийского моря компанией ПАО «Лукойл» эксплуатируются ЛСП-2 и платформа D-6. Компанией ФГУП РК «Черноморнефтегаз» эксплуатируются приблизительно 30 морских стационарных платформ на шельфе Черного моря. Морские стационарные платформы применяются для добычи на крупнейших морских месторождениях во всем мире. Таким примером может быть платформа Хайберния, расположенная в Атлантическом океане

недалеко от Канады. В Мексиканском заливе в эксплуатации находятся более четырех тысяч этих сооружений. Т.е. можно уверенно отметить, что МСП используются в практике мировой нефтегазодобычи (как отечественными, так и зарубежными компаниями) и имеют давнюю историю применения.

В соответствии с федеральным законом №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» морские стационарные платформы классифицируются как опасные производственные объекты (ОПО) [1]. Согласно этому закону ОПО характеризуется тем, что для таких объектов имеется высокий риск возникновения аварийной ситуации, которая может сопровождаться существенным экономическим ущербом и повлечь массовые человеческие жертвы. Так, например, при аварии платформы *Alexandr Kinnell* погибло более 120 человек.

На сегодняшний день сложилась такая ситуация, что многие морские платформы (как в России так и за рубежом) имеют длительный срок эксплуатации. МСП эксплуатируются в сложных морских условиях. В этих условиях на платформы воздействуют разнообразные нагрузки. Примером таких нагрузок могут служить волновые, ветровые, ледовые, от навала судов, сейсмические, от течений и др. В результате влияния этих нагрузок возникают переменные напряжения, которые как известно из классической теории механики разрушений приводят к накоплению усталостных повреждений в элементах и сварных соединениях платформ, которую могут спровоцировать аварийную ситуацию. Особую важность проблема накопления усталостных повреждений встает при оценке ресурса отремонтированных сварных соединений морской платформы. В настоящее время ремонт этих соединений осуществляется на основе различных технологий к числу которых можно отнести установку усиливающих накладок, трещиноуловителей или специальных металлических вставок. Ресурс сварных соединений определяется на основе диаграммы усталости, однако к настоящему моменту диаграммы усталости для отремонтированных сварных соединений отсутствуют. Для таких диаграмм ключевым значением является предел усталости (также называемый в литературе пределом выносливости). В нормативно-технической документации приводятся различные методы нахождения пределов усталости, которые дают совершенно различные результаты. Поэтому целью данной статьи является исследование точности различных методов определения пределов выносливости применительно к его определению для сварных соединений морских стационарных платформ, что позволит в дальнейшем определить предел выносливости для каждой из известной технологии ремонта сварных соединений.

**Материалы и результаты исследования.** В настоящее время разработана нормативно-техническая база в которой содержатся диаграммы усталости применительно к новым сварным соединениям

морских стационарных платформ. К числу этой документации можно отнести зарубежную нормативную базу [2, 3], так и отечественную [4]. Согласно нормативным документам [2, 3, 4] предел выносливости сварных соединений морских платформ находится в диапазоне от 20 МПа до 35 МПа, если оперировать терминами размаха напряжений и соответствующим образом построена диаграмма. И от 10 МПа до 18 МПа, если диаграмма построена для амплитуд переменных напряжений. Поэтому целевым показателем для методик расчета пределов выносливости будем считать такое его значение, которое будет близко амплитудам переменных напряжений 10-35 МПа. Отметим также, что базовый предел выносливости сварного соединения без учета остаточных напряжений, шероховатости и иных факторов, описанных ниже, определяется в зависимости от временного сопротивления разрыву и принимается равным 234 Мпа.

Общепринята практика, согласно которой предел выносливости (или предел усталости) определяется на основе лабораторных испытаний. При этом полученные в лаборатории результаты необходимо соотносить с реальным сварным соединением учитывая при этом масштабный фактор, шероховатость поверхности сварного соединения платформы, концентрацию напряжений, остаточными напряжениями в сварном соединении и другие факторы [5, 6, 7, 8]. Задачей данной статьи является выбор метода сопоставления, который в технической литературе также носит название масштабирования или переноса, лабораторного значения предела выносливости на реальные сварные соединения морской платформы.

Проанализируем, насколько различные методы вычисления предела выносливости позволяют получить результат, близкий по значению к 10-35 МПа.

Ключевыми данными при определении предела выносливости являются данные о значении временного сопротивления разрыву сварного соединения. Автором были изучены материалы проектов морских стационарных платформ, расположенных на шельфе Черного моря. В результате было установлено, что при монтаже платформ для сварки стальных труб марки ВСт3Сп5 использовались электроды марки Э42А (предел прочности 420 МПа), а для сварных соединений элементов платформы из труб 09Г2С (Д) использовались электроды Э50А (предел прочности 490 МПа).

С целью определения предела усталости металла сварного шва предлагаются различные методы:

**Метод №1.** Предел выносливости можно определить как функции твердости металла по формуле:

$$\sigma_{-1} = 95,5 \left( \sqrt{149 + H} - 12,2 \right) \quad (1)$$

Где  $H = HV/8,2$  ( $HV$ - число твердости);  $\sigma_{-1}$ -предел выносливости, МПа.

Твердость сварных соединений можно определить по формуле:

$$HV = 4160 \cdot C_{\text{э}}^{1,08} \cdot g_{\text{охл}}^{0,17} \quad (2)$$

где  $C_{\text{э}}$  – эквивалентное содержание углерода;  $g_{\text{охл}}$  – скорость охлаждения.

Анализ проектов морских платформ показал, что временное сопротивление разрыву металла сварных швов сварного соединения равен 490 МПа [9-14]. Определим влияния фактора масштаба по формуле:

$$K_f = 0,5 \cdot \left\{ 1 + \left[ (1/88,3) (L/\bar{G}_1) \right]^{-0,2} \right\}, \quad (3)$$

Где:  $K_f$  – фактор влияния размера образца или еще он носит название масштабный;  $L$  – длина периметра сварного шва;  $\bar{G}_1$  – значение градиента первого главного напряжения, который рассчитывается как:

$$\bar{G}_1 = \left( \frac{1,6}{r} \right) \sqrt{\sin \varphi + 2/\delta} \quad (4)$$

где:  $r$  – высота равнобедренного треугольника, вписанного в сварное соединение;  $\varphi$  – угол, равный  $45^\circ$ ;  $\delta$  – толщина сварного соединения, выбираемая по меньшему значению из двух свариваемых между собой элементов платформы.

Выполним расчеты по описанной выше методике. Результаты этих расчетов приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициента влияния фактора размера (масштабного) при переносе лабораторных результатов на сварное соединение морской платформы

	Размер рабочей части периметра шва, м			Относительный градиент первого главного напряжения			Коэффициент масштабирования, $K_f$			Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа		
	325	426	530	325	426	530	325	426	530	325	426	530
Диаметры соединяемых элементов, мм												
720	1,035	1,373	1,742	346,3	288,6	288,6	3,81	3,55	3,46	61	66	68
1080	1,027	1,352	1,693	346,3	288,6	288,6	3,78	3,51	3,4	62	67	69

Полученные результаты показывают, что коэффициент влияния масштабного фактора для практически значимых случаев находится в диапазоне от 3,4 до 3,81. Вычисленные из отношения базового предела выносливости сварного соединения (234 Мпа) и коэффициента масштабирования пределы выносливости находятся в диапазоне от 61 Мпа до 69 Мпа и превышают определенную выше границу 35 Мпа.

**Метод №2.** Определение предела выносливости в зависимости от временного сопротивления разрыву

Современные энергетические теории рекомендуют принимать коэффициент влияния размера реального сварного соединения на результаты, полученные по итогам лабораторных испытаний, равным 0,58-0,6. При этом необходимо, чтобы значение площади поперечного сечения образца, подвергнутого усталостным испытаниям, была не менее четырех тысяч квадратных миллиметров. Учитывая это обстоятельство, автором принято значение коэффициента

масштабирования равное 0,6. Предел выносливости образцов с шероховатостью более 10мкм рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{-1} = K_{ос} (92 + 0,125 \sigma_g), \quad (5)$$

В результате расчетов получим значение приблизительно 92 МПа. Рассмотрим следующие ключевые факторы, позволяющие сопоставить результаты испытаний с реальным соединением:

1. Пропорциональность размеров образцов и реальных объектов;
2. Асимметрия циклов напряжений;
3. Величина остаточных напряжений.

Определим амплитуды первых главных напряжений для знакопеременного цикла по формуле:

$$\sigma_{1a}^{\Pi} = \frac{\sqrt{6} \alpha \sigma_{-1}}{K + [M_a / (1 - R_{\sigma_0}^{ост})] (\eta_1 + R_{\sigma_0}^{ост} \eta_2)}, \quad (6)$$

И для знакопостоянного цикла:

$$\sigma_{1a}^{\Pi} = \frac{\sqrt{6} \alpha (1 - c_1 R_{\sigma_0}^{ост} M_{max}^{ост}) \sigma_{-1}}{K + \eta_1 M_a}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{0,249 \sigma_b + 2,5}{0,35 \sigma_b + 70} \quad (8)$$

Рассмотрим влияние остаточных напряжений. При воздействии внешних нагрузок на сварное соединение возникают пластические деформации. В результате этого воздействия начальные остаточные напряжения (после снятия нагрузки) уменьшаются на некоторое значение  $\sigma_{max}$ , что можно определить по формуле:

$$\sigma_{ост} = \sigma_m - \sigma_{max}, \quad (9)$$

Где:  $\sigma_{ост}$  – остаточные напряжения,  $\sigma_{max}$  – максимальные напряжения от внешней нагрузки,  $\sigma_m$  – предел текучести металла сварного соединения. Остаточные главные напряжения рассчитываются по формуле:

$$\sigma_{1ост} = \sigma_m - \sigma_{1max}; \sigma_{2ост} = \sigma_m - \sigma_{2max}, \quad (10)$$

Где:  $\sigma'_{1ост}$  и  $\sigma'_{2ост}$  – первое и второе главные напряжения,  $\sigma_m$  – предел текучести металла сварного соединения,  $\sigma_{1max}$  и  $\sigma_{2max}$  – первое и второе главные напряжения от суммарной нагрузки.

Значения коэффициентов асимметрии циклов при наличии остаточных напряжений рассчитывается по формуле:

$$R_{\sigma_0}^{ост} = \frac{(\sigma_{min}^{ост})}{(\sigma_{max}^{ост})} = \frac{\sigma_{1min} + \sigma_{2min} + \sigma_{3min} + \sigma_{1ост} + \sigma_{2ост} + \sigma_{3ост}}{\sigma_{1max} + \sigma_{2max} + \sigma_{3max} + \sigma_{1ост} + \sigma_{2ост} + \sigma_{3ост}}, \quad (11)$$

Где  $\sigma_{1ост}$ ,  $\sigma_{2ост}$ ,  $\sigma_{3ост}$  – первое, второе и третье (главные остаточные) напряжения;  $(\sigma_{min}^{ост})$ ,  $(\sigma_{max}^{ост})$  – октаэдрические напряжения, определяемые как сумма остаточных и напряжений, вызванные в результате воздействия суммы всех нагрузок;  $\sigma_{1max}$ ,  $\sigma_{2max}$ ,  $\sigma_{3max}$  – максимальные главные напряжения цикла;  $\sigma_{1min}$ ,  $\sigma_{2min}$ ,  $\sigma_{3min}$  – минимальные главные напряжения цикла. Остальные значения приведены в работах [15-20].

Автором разработана модель сварного соединения в программном комплексе *SolidWorks* (рис.2). Эта модель демонстрирует достаточно точное распределе-

ние напряжений в сварном соединении платформы. При этом *SolidWorks* обладает встроенным алгоритмом расчета трубчатых соединений с учетом местной концентрации напряжений.

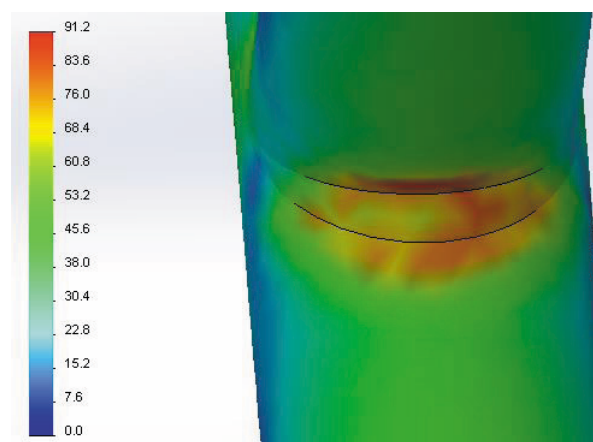


Рисунок 2 – Модель сварного соединения "Т"-типа в системе *SolidWorks* с учетом неравномерности распределения напряжений

Автором проведены расчеты на примере платформы, расположенной на Субботинском газоконденсатном месторождении, в результате которого были установлены максимальные значения амплитуд переменных напряжений, возникающих при действии комбинированной ветро-волновой нагрузки обеспеченностью 1% (рассматривались только соединения "Т"-типа).

По результатам расчета максимальная амплитуда напряжений соединения типа «Т» для условий Субботинского газоконденсатного месторождения составляет 91,2 МПа. Рассчитаем предел усталости соединения "Т"-типа в условиях первого разрушения. Анализ проектов морских платформ показал, что для сварных соединений из стали 09Г2С с номинальной толщиной соединения от 10 до 80 мм предел текучести материала составляет не менее 280Мпа. Соответственно, значения главных остаточных напряжений определяемы по формуле (10) должны быть равны  $\sigma_{1ост} = 188$  МПа и  $\sigma_{2ост} = 273$  МПа.

Рассчитаем предел выносливости для соединения "Т"-типа морской стационарной платформы и полученные результаты сведем в таблицу 2.

Таблица 2- Результаты расчета предела выносливости таврового соединения

Наименование параметра	Результат
Амплитуда первого главного напряжения, $\sigma_{1a}$ , МПа	91,3
Коэффициент асимметрии остаточных напряжений, $R_{ост}$	0,63
Коэффициент влияния растягивающих напряжений, $\eta_1$	0,1
Коэффициент влияния сжимающих напряжений, $\eta_2$	0,4
Коэффициент влияния нормальных напряжений, $\eta_3$	0,24
Предел выносливости с учетом фактических условий эксплуатации, $\sigma_{-1}^{\Phi}$ , МПа	22

**Заключение.** Расчеты по методу №1 дали результат выше 35 МПа, что не соответствует определенным в настоящей статье требованиям. Это можно объяснить тем, что сварные соединения являются концентраторами как рабочих, так и остаточных напряжений. При совместном действии рабочих и остаточных напряжений критерий масштабирования будет отличаться от критерия масштабирования основного металла элемента морской платформы, так как изменяются параметры, характеризующие распределение предела выносливости образцов с остаточными напряжениями и без них. При наличии остаточных напряжений не выполняется предположение об упругом распределении максимальных напряжений в упругой области. В связи с этим возможность использования метода 1 применительно к оценке предела выносливости сварных соединений морских стационарных платформ должен быть дополнительно обоснован. В результате расчетов установлено, что описанный метод (метод №2) определения предела выносливости в зависимости от временного сопротивления разрыву хорошо удовлетворяет требованиям для вычисления предела выносливости сварных соединений морских стационарных платформ. Использование данного метода позволит в дальнейшем приступить к определению пределов выносливости сварных соединений морских платформ, отремонтированных с применением различных технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.1997 N 116-ФЗ [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_15234/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/)
2. DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций. – Norway: DNV, 2008. – 158 p.
3. DNVRP 2A-WSD «Рекомендуемая практика планирования, проектирования и сооружения морских стационарных платформ-расчет по допустимым напряжениям»- American Bureau of shipping, New York, 2005-132p
4. Правила Классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ-Российский морской регистр судоходства, СПб., 2014- 484с.
5. Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: учебник для вузов. Часть 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
6. Клыков Н.А. Расчет характеристик сопротивления усталости сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
7. 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.
8. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений.-Киев: Наукова думка, 1973. - 216 с.
9. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Капустин О.Е. Оборудование зависимости определения углеродного эквивалента малоуглеродистых трубных сталей нового поколения.// Сварочное производство.-2017.-№10.-С. 3-7.
10. Ефименко Л.А., Капустин О.Е., Рамусь А.А., Рамусь Р.О. Регулирование процессов разупрочнения зоны термического влияния при сварке высокопрочных сталей. // Металловедение и термическая обработка металлов.-2016.-№7(773). -Том 79. -С.55-60
11. 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
12. Уткин И.Ю., Капустин О.Е., Франтов И.И., Севостьянов С.П. Влияние содержания углерода на механические свойства основного металла прокатаи околшовной зоны ниобийсодержащихсталей класса прочности К65. Сварочное производство.-2017.-№9.-С. 3-7
13. Макаров Г.И., Капустин О.Е. Экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния сварных трубопроводов с помощью электрических датчиков сопротивления и аналогово-цифровых преобразователей // Сварочное производство.-2018.-№11.-С. 3-14
14. 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
15. Лукьянов В.Ф., Рогозин Д.В., Грицыхин В.А. Ремонт металлических конструкций морских буровых и нефтедобывающих платформ// Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11, №9 (60)-с.1630-1636
16. Староконь И.В. Основы теории и практики образования усталостных трещин на морских нефтегазовых сооружениях // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4.
17. Староконь И.В. Усталостная долговечность восстановленных тавровых сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ// Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 7 (220). С. 51-56.
18. Староконь И.В. Исследование пределов выносливости сварных соединений и конструктивных элементов морских нефтегазовых сооружений//Территория Нефтегаз. 2017. № 1-2. С. 88-92.
19. Староконь И.В. Результаты экспериментально-аналитического исследования срока службы отремонтированных сварных соединений морских нефтегазовых сооружений// Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2016. № 12. С. 25-28.
20. Староконь И.В. О результатах экспериментального исследования процессов усталостного разрушения, протекающих в восстановленных сварных соединениях морских нефтегазопромысловых сооружений// Труды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. 2016. № 3. С. 118-125.

*Статья поступила в редакцию 06.04.2020*

*Статья принята к публикации 10.06.2020*