

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЯХ

Староконь И. В.

*Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва, Россия (119991, Москва, Ленинский пр-т., д. 65, e-mail: starokon79@mail.ru)*

Проведен анализ современных теорий возникновения и распространения усталостных трещин. В результате этого анализа установлено, что применительно к морским нефтегазовым сооружениям отсутствует теория, которая позволяла бы предметно описать природу этого явления и дать численно-аналитические зависимости влияния различных воздействий на параметры возникновения и развития усталостных трещин для условий морского месторождения. Существующие исследования устанавливают взаимосвязь между количеством циклов волновой нагрузки и величинами максимально допустимых напряжений. Автором ставится задача систематизировать воздействия, влияющие на развитие усталостных трещин морских нефтегазовых сооружений, и дать заключение о степени их влияния на исследуемый процесс усталостного трещинообразования. Основываясь на анализе опыта эксплуатации конструкций, расположенных на шельфе Черного моря, автором сделан вывод о том, что помимо силового воздействия на процесс развития усталостных трещин влияют температурные, коррозионные и вибрационные воздействия. В статье кратко описывается механизм этого влияния. В результате делается вывод о том, какое из перечисленных воздействий играет ключевую роль в процессах трещинообразования на морских нефтегазовых сооружениях в различных зонах (надводной, подводной и зонах периодического смачивания).

Ключевые слова: усталостные трещины, морские нефтегазовые сооружения, температурное воздействие, вибрационное воздействие, коррозионное воздействие, переменные напряжения.

## FUNDAMENTALS OF THEORY AND PRACTICE OF THE ORIGIN AND SPREAD FATIGUE CRACKS FOR OFFSHORE OIL AND GAS INSTALLATIONS

Starokon I. V.

*Russian State oil and gas university named after I.M. Gubkin (119991, Moscow, Leninsky prospect, 65, e-mail: starokon79@mail.ru)*

Me made the analysis of the contemporary theories of the origin and spread of fatigue cracks. As a result of this analysis showed that, there is no theory for offshore oil and gas installations, which would allow to objectively describe the nature of this phenomenon and give analytical dependence of influence of various factors on the parameters of spread of fatigue cracks in offshore conditions. The existing studies establish a link between the number of cycles of the wave load and the maximum permissible stress. The author aims to systematize the impact, affecting the development of fatigue cracks offshore oil and gas installations, and to give a conclusion on the degree of their influence on the study process of fatigue crack formation. Based on the analysis of experience of operation of structures, located on the shelf of the Black sea, the author concludes that, in addition to force influence on the process of the development of fatigue cracks influenced by temperature, corrosion and vibration impacts. The article briefly describes the mechanism of this influence. As a result the conclusion is made about the fact, which of the following effects plays a key role in the processes of crack formation in the offshore oil and gas facilities in the various zones (surface, underwater and in the areas of periodic wetting).

Key words: fatigue cracks, offshore oil and gas structures, thermal effects, vibration impacts, corrosion effects, variable stress.

Длительная эксплуатация стальных морских нефтегазовых сооружений (МНГС) приводит к необходимости введения усталостного критерия. Усталостные трещины, образующиеся на различных участках МНГС, представляют собой достаточно серьезную опасность и могут при определенных условиях привести к их разрушению. Кроме того, усталостные трещины могут нарушить герметичность конструкции МНГС, вызывать течь с последующим затоплением, что, возможно, произошло в случае катастрофы платформы

«Кольская». Основным механизмом, вызывающим развитие усталостных трещин, является действие переменных нагрузок и воздействий. Как это показано в работе [1], существует принципиальная разница между понятиями «нагрузка» и «воздействия». Если вопросам влияния нагрузок, вызывающих переменные напряжения, и соответственно развитию усталостных трещин уделялось некоторое внимание, то вопросам «влияния воздействий», которые также создают различные переменные напряжения, по мнению автора, уделяется недостаточно внимания. В настоящее время применительно к морским нефтегазовым сооружениям отсутствует методика, которая позволяла бы предметно описать как природу этих воздействий, так и дать численно-аналитические зависимости влияния этих воздействий на параметры возникновения и развития усталостных трещин. Немногочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов, изучавших эти вопросы, рассеяны по различным областям науки, а решения, предложенные ими, не могут быть легко адаптированы применительно к МНГС [2, 3]. Поэтому автором ставится задача систематизировать воздействия, влияющие на развитие усталостных трещин морских нефтегазовых сооружений, и разработать математический аппарат, позволяющий определить конкретные числовые значения переменных напряжений, вызываемыми этими воздействиями, и дать заключение о степени их влияния на исследуемый процесс усталостного трещинообразования. Статистические данные об условиях эксплуатации морских нефтегазовых сооружений позволяют выделить три вида основных воздействий, влияющих на развитие усталостных трещин – коррозионное, вибрационное и температурное. Рассмотрим их более подробно.

**Коррозионное воздействие.** Как известно, погружение металла в жидкость может привести к образованию в нем трещин даже при нулевых напряжениях. Агрессивная морская водная среда, характерная для условий эксплуатации МНГС, вызывает коррозию металла. При наличии напряжений, вызванных различными нагрузками, коррозионное воздействие приводит к образованию трещин. Как показал выполненный при участии автора анализ материалов отчетов ООО «Институт «ШЕЛЬФ» по диагностике морских стационарных платформ, конструктивные элементы, находящиеся в одних и тех же зонах (атмосферная, подводная и переменного смачивания) имеют разную степень коррозионного поражения. В атмосферной зоне наблюдается различная степень коррозионного износа и виды коррозионных поражений. Это обусловлено тем, что на скорость коррозии оказывают влияние состояние и химический состав материала конструкции, интенсивность солнечной радиации, время года, температура воздуха и воды, влажность воздуха и другие факторы. Проведенный структурный анализ элементов верхних строений показал, что средний коррозионный износ верхних поясов ферм платформы МСП-4, находящейся в эксплуатации более 30 лет, составляет 10,8%, нижних поясов – 14,6%, раскосов -10% и стоек 9%. На платформе МСП-5,

эксплуатирующейся более 20 лет и установленной в том же районе, коррозионный износ элементов верхних строений более высокий (в среднем 18,9%), чем в упомянутой выше платформы. Этот пример подтверждает утверждение, что интенсивность коррозионного поражения зависит от множества факторов. Максимальные величины коррозионного износа составляют 25-40%. Средняя скорость коррозии элементов верхних строений находится в пределах 0.04 -0.13 мм/год. Оценивая степень поражения металлоконструкций производственных опорных блоков МСП, необходимо отметить, что все элементы платформ затронуты коррозией, однако интенсивность коррозионного процесса во многом зависит от мест расположения элементов, их конструктивных особенностей и качества изготовления. Для конструкций МСП при общем наличии сплошной и язвенной коррозии наблюдаются трещины коррозионной усталости и коррозионное растрескивание (рис.1 – рис. 4).



Рис.1. Общий вид морской платформы



Рис.2. Сплошная коррозия морской платформы



Рис. 3. Трещины коррозионной усталости



Рис. 4. Коррозионное растрескивание

Фактическое состояние металлоконструкций надводных частей производственных блоков в зоне переменного смачивания характеризуется значительным коррозионным износом, дефектами сварных швов, расслоениями трубного материала и значительными трещинами. Средний износ элементов в этой зоне составляет от 25 до 40 %. Максимальный износ отдельных элементов достигает 75–85 %. Средняя скорость коррозии согласно данным,

полученным в процессе обследования, составляет 0,15-0,35 мм/год. В 2008 г. норвежским сообществом DET NORSKE VERITAS был разработан стандарт DNV-RP-C103 [4], в котором в том числе содержится усталостный анализ от коррозионного воздействия для различных элементов морских нефтегазовых сооружений. Документ [4] основан на проведении усталостных испытаний определенных образцов в лабораторных условиях до тех пор, пока не произойдет его разрушение. Существенным недостатком этих испытаний, как показала практика, оказалась статичность напряжений, в то время как на практике при эксплуатации МНГС происходит постоянное перераспределение напряжений, что оказывает значительное влияние на динамику развития трещины. Кроме того, рассматривалась лишь взаимосвязь напряжений, создаваемых волновой нагрузкой, и коррозионного воздействия. Все остальные нагрузки и воздействия, влияющие на усталостную долговечность конструктивных элементов МНГС, авторами данного нормативного документа не рассматривались. На основе проведенных испытаний авторами нормативного документа построены так называемые S-N кривые, которые увязывают количество циклов волновой нагрузки с максимально допустимой величиной напряжений, действующих в сечениях конструктивных элементов МНГС, выше которых характеристики усталостной трещины становятся критическими. Эти исследования проводились с учетом коррозионного воздействия в условиях полностью погруженного в воду образца и элемента, находящегося в воздухе. Также учитывается влияние систем электрохимической защиты на скорость распространения трещины и роста ее до критической величины. Приведенные данные говорят о том, что при одинаковом числе циклов волновой нагрузки на морские нефтегазовые сооружения при наличии систем катодной защиты, существенно снижающей интенсивность коррозионных процессов, максимально допустимое напряжение значительно выше, чем при отсутствии подобных защитных систем. Это еще раз подтверждает вывод о том, что коррозионное воздействие оказывает значительное влияние на развитие усталостных трещин на МНГС. Одним из важных воздействий, влияющих на усталостное разрушение, является вибрационное воздействие. В процессе эксплуатации морские нефтегазовые сооружения под действием различных нагрузок, в первую очередь волновых и ветровых, испытывают циклические колебания напряжений, имеющие различное происхождение и частоту. Источниками вибрации на морских нефтегазовых сооружениях могут быть: вибрации от механического оборудования, резонансные вибрации от волновой нагрузки, медленно меняющиеся силы, вызванные волнами и ветром, приливно-отливные явления. Одним из важнейших механизмов, вызывающих колебания, является образование и срыв вихрей с поверхности конструктивного элемента МНГС, которые возникают при обтекании установившимся гидродинамическим или ветровым потоком [1]. Под действием этих колебаний происходит циклическое изменение положения сечений конструктивных

элементов МНГС относительно их исходного положения. Амплитуда колебаний изменяется от нулевых до максимальных значений с различной частотой, вызывая при этом изменение величины и направления напряжений в сечениях конструктивных элементов МНГС. Суммарное напряжение, вызванное колебаниями, характеризуется двумя составляющими – статической и динамической. Статическая составляющая является постоянной, а динамическая зависит от амплитуды колебаний. Полное напряжение, которое при изучении вибрационных воздействий будем рассматривать как суммарное напряжение, полученное от вибрационного и всех других видов нагрузок и воздействий. Полное напряжение изменяется два раза в течение одного периода колебаний в пределах от суммы статического и минимального вибронпряжения до суммы статического и максимального вибронпряжения. При этом в каждом последующем периоде полное напряжение уменьшается по мере затухания колебаний. В случае возникновения резонанса колебания не затухают, и значения минимального и максимального вибронпряжений остаются постоянными. В общем случае можно говорить о том, что в конструктивных элементах МНГС действуют постоянные переменные вибронпряжения. При таком воздействии в материале МНГС накапливаются усталостные повреждения, которые значительно снижают прочностные характеристики металла, и разрушение МНГС может произойти при значениях меньших, чем значение максимально допустимого напряжения [1]. Усталость металла наступает при большом цикле изменения напряжений, независимо от состояния материала, из которого выполнены МНГС. Даже в абсолютно новом материале могут иметься какие-либо дефекты. В процессе эксплуатации за счет изменения напряженного состояния элемента при колебаниях происходит постепенное увеличение этих дефектов, изменение их размеров и формы которых носит случайный характер. Поэтому развитие усталостных трещин и дефектов характеризуется возможными случайными явлениями, обусловленным вероятностным характером самой природы усталости. Вероятностный, т.е. случайный характер усталостных разрушений не дает возможности точно рассчитать тот момент, когда наступит усталостное разрушение от переменных вибронпряжений. К настоящему моменту разработаны несколько теорий, позволяющих приблизительно определить время до наступления усталостного разрушения. Наиболее достоверным среди этих методов является метод испытания образцов материала либо непосредственно конструктивных элементов МНГС, определяя количество циклов переменного вибронпряжения вплоть до непосредственного их разрушения. При рассмотрении усталостных явлений за пределами этих исследований остается изучение влияния переменных температурных полей. Поэтому автором ставится задача оценить степень влияния переменных температурных воздействий на развитие одного из самых опасных дефектов МНГС – усталостной трещины. Рассмотрим вопрос воздействия температурных

полей более подробно. По мнению авторов, целесообразно выделить три класса зон температурного воздействия: 1) подводную; 2) атмосферную; 3) переменного смачивания. Подводная зона характеризуется неоднородным температурным полем, обусловленным различными течениями. Температуры в подводной зоне при значительных глубинах, как правило, положительные. С уменьшением глубины температурный режим подводной зоны в значительной мере зависит от температуры окружающего воздуха. Так, например, в районе Субботинского месторождения Черного моря наиболее сильные колебания температур отмечаются на глубинах до 50 метров, ниже этой отметки изменения температуры практически не происходит. Начиная с зоны глубиной от 50 метров, температура практически не меняется и находится в пределах +8 градусов Цельсия. И до глубины 1500 метров температура находится приблизительно в пределах +9 градусов Цельсия. Это говорит о том, что с увеличением глубины влияние переменных температурных напряжений на развитие усталостных разрушений падает. Температурный режим моря на глубине до 30 метров определяется в первую очередь фактором температуры атмосферного воздуха. Постепенно с увеличением глубины до 50 метров влияние этого фактора падает, и температура приближается к постоянной отметке +9 градусов Цельсия. Атмосферная зона характеризуется колебанием температур от  $-65^{\circ}\text{C}$  до  $+5\dots+10^{\circ}\text{C}$  на Северных месторождениях и от  $+10^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  на месторождениях стран Персидского залива. Следует также отметить тот факт, что, несмотря на то, что температура атмосферного воздуха в районе Субботинского месторождения редко прогревается более чем  $+40^{\circ}\text{C}$ , сами же конструктивные элементы МНГС (как это показали проведенные непосредственно на месторождении автором измерения) под воздействием солнечной радиации в пиковые часы солнечной активности нагреваются до  $+60^{\circ}\text{C}$  и даже более. В ночные же часы температура конструктивных элементов МНГС опускалась до  $+20^{\circ}\text{C}\dots+25^{\circ}\text{C}$ . Приведенные данные говорят о том, что перепад температуры конструктивных элементов морских нефтегазовых сооружений дважды в течение суток может достигать величины  $\Delta T=40^{\circ}\text{C}$ , что по предварительным расчетам, проведенных автором, вызывает переменные напряжения, которые могут достигать величин порядка  $70 \text{ Н/мм}^2$  (расчеты проводились для элемента опорного блока морской стационарной платформы Субботинского месторождения, выполненного из стали Вст3сп5 и имеющего цилиндрическую форму диаметром 1220 мм и толщиной стенки 12 мм). Теоретически, наиболее неблагоприятная с точки зрения кинетики воздействия температурных полей является зона периодического смачивания, т.к. она находится в зоне действия атмосферного температурного поля и температурного поля набегающих волновых потоков, характеризующихся высокой частотой. Однако, как показали проведенные автором натурные измерения в районе Субботинского месторождения, температурные поля морской воды и

атмосферного воздуха в диапазоне  $-10\text{ м} < Г.В. < 15\text{ м}$  ( $Г.В.$  – горизонт воды) практически не отличаются друг от друга. Это обусловлено, вероятно, преобладающим воздействием температуры атмосферы на температуру морской воды на глубинах до 30 м. Поэтому предположение о том, что зона переменного смачивания с точки зрения воздействия переменных температурных полей является самой неблагоприятной для образования усталостных трещин, по крайней мере, в условиях Субботинского месторождения, по мнению автора, можно считать ошибочным. Возможно, это предположение может оказаться верным в условиях сильных вертикальных течений, поднимающих с глубины водную массу, имеющую более низкую, чем в поверхностных слоях температуру, в сопровождении волнения, однако, при натурных измерениях подобные результаты зафиксированы не были, и данное предположение остается теоретическим. Изменение температурного поля окружающей МНГС среды приводит к изменению температурного поля самого морского нефтегазового сооружения, изменяя его текущее напряженное состояние. Опасными являются напряжения растяжения, в результате которых в теле конструктивных элементов МНГС возникают трещины, которые можно назвать термоусталостными. Отметим, что растягивающие напряжения появляются в момент понижения температуры конструктивных элементов МНГС. Ситуация несколько усугубляется при рассмотрении морских нефтегазопроводов, т.к. в этой ситуации помимо уже перечисленных случаев возникает третье температурное поле со стороны перекачиваемого продукта. Как правило, это поле значительно отличается от температуры окружающей среды и имеет некоторую свою величину, что обусловлено увеличением вязкости нефти и невозможностью ее транспортировки по трубопроводам ниже определенных температур или образованием газоконденсатных пробок при перекачке газа. Кроме того, температура нефти, выходящей из скважины, может достигать до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поэтому решение задачи о влиянии переменного температурного поля на надежность, безопасность и долговечность МНГС является актуальным и своевременным. Решение этой задачи предлагается на основе классической теории термоупругости и сводится к следующим этапам. Первым шагом является определение температурных полей, действующих в сечениях конструктивных элементов МНГС, методика определения которых описана в [5]. Второй шаг заключается в определении зависимости между температурным полем и напряжениями, возникающими от его действия, по формулам, приведенным в [5,6]. Результаты численно-аналитического моделирования, проведенного автором на примере нефтепровода, выполненном из стали 09Г2С, диаметром 530 мм и с толщиной стенки 25 мм, показывают, что при разнице температуры между внутренней и внешней стенками нефтепровода все в  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  кольцевые напряжения составляют порядка  $28\text{ Н/мм}^2$ , а при разнице в  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  эти напряжения достигают значений порядка  $140\text{ Н/мм}^2$ . Экспериментальные замеры на нефтепроводе в

районе Субботинского месторождения показали, что температура внешней стенки трубы зависит в первую очередь от температуры перекачиваемого продукта и в меньшей степени от температуры окружающей среды. Таким образом, можно говорить о том, что в настоящее время не разработано теории возникновения и развития усталостных трещин применительно МНГС, а существующие исследования при рассмотрении данного вопроса учитывают лишь волновое воздействие, пренебрегая температурным и вибрационным воздействиями. Автором предлагается новая теория развития усталостных трещин МНГС, в которой помимо силовых учитываются коррозионные, температурные и вибрационные воздействия. В результате проведенных исследований автором установлено, что при образовании усталостных трещин температурные воздействия наиболее активны в надводной зоне и подводной с глубиной до 30 м, коррозионные воздействия сильней всего оказывают влияние в зоне переменного смачивания, а вибрационные воздействия способствуют росту усталостных трещин в зонах максимального влияния гидродинамических и ветровых потоков. Автор продолжает проводить экспериментальные исследования в направлении усталостного трещинообразования МНГС, результаты которых будут опубликованы позднее.

#### **Список литературы**

1. Бородавкин П. П. Морские нефтегазовые сооружения: Учебник для вузов. Часть 1. Конструирование. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. – 555 с.
2. Староконь И. В. Анализ отечественной нормативной документации по безопасности эксплуатации морских нефтегазовых сооружений (МНГС) // Естественные и технические науки. – 2009. – №6. – С. 346-347.
3. Староконь И. В. Анализ зарубежных норм оценки рисков морских нефтегазовых сооружений на основе изучения нормативной документации // Естественные и технические науки. – 2009. – №6. – С. 343-345.
4. DNV-RP-C103. Рекомендованная практика. Расчет усталости морских стальных конструкций. – Norway: DNV, 2008. – 158 с.
5. Коваленко А. Д. Основы термоупругости: Учебник для вузов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 308 с.
6. Окопный Ю. А. Механика материалов и конструкций: Учебник для вузов / Окопный Ю. А., Радин В. П., Чирков В. П. – М.: Машиностроение, 2001. – 408 с.

#### **Рецензенты:**

Бородавкин Петр Петрович, д.т.н., проф., генеральный директор АО «Интергаз», г. Москва.  
Литвин Игорь Евгеньевич, д.т.н., генеральный директор ООО «СТД», г. Москва.