Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-2>
УДК 539.431

К.Н. Фигура

ФИГУРА КОНСТАНТИН НИКОЛАЕВИЧ – к.т.н., доцент, SPIN: 2199-8121,
ORCID: 0000-0002-0777-0089, ResearcherID: G-9221-2012, ScopusID: 56433299000,
e-mail: figura_85@mail.ru
Кафедра подъемно-транспортных, строительных, дорожных машин и оборудования
Братский государственный университет
Братск, Россия

Влияние асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность трубопроводов в условиях коррозионного повреждения

Аннотация: Статья посвящена усталостным характеристикам трубопроводов при наличии коррозионного повреждения: рассматривается трубопровод, работающий в условиях асимметричного нагружения внутренним давлением рабочей жидкости. Проведен анализ публикаций, связанных с долговечностью трубопроводов при наличии коррозионных повреждений и переменных нагрузок, выделена наиболее актуальная область исследований – оценка изменения эффективного сечения трубопровода вследствие коррозии и способы учета изменения характера напряженного состояния стенок трубы. Однако в данных работах не учитывается изменение асимметрии цикла нагружения в процессе движения рабочей жидкости по трубопроводу. Такие колебания цикла нагружения могут быть вызваны гидроударами, импульсным характером движения жидкости и другими причинами. Поэтому в данной статье предпринята попытка выявить степень влияния асимметрии цикла нагружения на усталостную долговечность трубопровода. Предлагаемое исследование опирается на стандартные методики определения усталостных характеристик конструкций, описанные в государственных стандартах, а также в наиболее распространенных нормах по расчету прочности. Принятый подход не учитывает процесса трещинообразования в явном виде, но является более универсальным для осуществления инженерных расчетов. Основанная на стандартных методах и совершенствуемая авторами данной статьи методика позволяет использовать стандартные программные пакеты для определения усталостных характеристик конструкций, работающих при сложных режимах нагружения. Моделирование выполнялось в программном пакете ANSYS. Получены распределения долговечности конструкции, а также коэффициента запаса по амплитудам напряжений. Также построена зависимость усталостной долговечности от коэффициента асимметрии цикла нагружения. Показано, что импульсное изменение давления в трубопроводе может приводить к значительному снижению усталостной долговечности данного типа конструкций. Результаты работы согласуются с известными данными, связывающими нестационарные режимы движения рабочей жидкости со снижением ресурса трубопроводов. Кроме того, так как в нормативной и научной литературе отсутствуют теоретические и экспериментальные данные, связывающие асимметрию цикла нагружения внутритрубно́м давлением и усталостную прочность ме-

© Фигура К.Н., 2020

О статье: поступила: 24.12.2019; финансирование: Братский государственный университет.

талла трубопровода, то примененная авторами статьи методика может быть использована для оценки ресурса трубопроводов на стадии проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: усталостная долговечность, циклическое нагружение, асимметрия цикла, коррозионное повреждение, трубопровод.

Введение

При современном подходе к проектированию и эксплуатации трубопроводов считается, что основным фактором, влияющим на усталостную прочность, является наличие явных дефектов, это сварные дефекты, риски и царапины от рабочего инструмента, каверны в стенках трубы и т.д. Кроме того, анализ причин отказов трубопроводного транспорта показывает, что к усталостному разрушению приводят концентраторы напряжений, вызванные нарушением технологии изготовления, коррозионные повреждения от воздействия сероводородсодержащей среды, несоответствие физико-механических свойств металла трубопровода и арматуры проектным характеристикам [6].

В последнее время в литературе, посвященной надежности трубопроводов, выделяется новая причина усталостного разрушения, происходящего без явных дефектов – циклические перепады внутритрубногo давления с явно выраженной асимметрией цикла [11, 13, 14].

Очевидно, что на усталостную прочность трубопроводов влияет множество факторов. Тем не менее внимание, уделяемое анализу и исследованию различных критериев, влияющих на долговечность трубопроводов, носит неоднородный и фрагментированный характер. Так, при проектировании и эксплуатации основные усилия направлены на предотвращение появления и выявление явных дефектов конструкции. Влияние концентраторов напряжений, не обязательно связанных с дефектами, частично описано в литературе, посвященной усталостной прочности [2, 5], но практически не отражено в нормативах, регламентирующих методы проектирования, порядок обследования и переаттестации трубопроводов. Влияние асимметрии цикла нагружения внутритрубногo давлением на усталостную прочность, насколько нам известно, не отображено в литературе, несмотря на то что именно эта причина, наряду с коррозионным повреждением, считается основной, вызывающей разрушение при отсутствии явных дефектов и концентраторов напряжений.

В работах, посвященных усталостной прочности [12, 15], можно выделить два основных направления оценки усталостной долговечности: с учетом появления и развития дефекта конструкции (трещины) и без учета влияния трещинообразования. При первом подходе производится моделирование роста трещины и проводится оценка одного или нескольких критериев процесса развития дефекта: величины раскрытия трещины в своей вершине, коэффициента интенсивности напряжений или инвариантного энергетического интеграла (J-интеграла) [5, 7, 8]. Далее проводится сравнение данных величин с их критическими значениями и делается вывод о выходе конструкции из строя. Применение данного метода обусловлено спецификой решаемой задачи и зачастую носит узкоспециализированный характер, что делает его использование достаточно затруднительным для решения общих инженерных задач.

Второй подход не учитывает появление и развитие дефектов конструкции в явном виде. Здесь производится учет различных критериев повреждения совместно с их взаимосвязью с изменением механических и геометрических характеристик конструкции. Данный подход является более универсальным для решения инженерных задач механики разрушения [2, 5, 8].

При исследовании усталостной прочности трубопроводов свое применение нашли оба метода [12–14]. Анализ литературных источников [1, 3, 4, 7] показал, что наибольший интерес у исследователей вызывают вопросы, связанные с долговечностью трубопроводов при наличии коррозионных повреждений и переменных нагрузок. Наиболее часто для анализа усталостной долговечности авторы исследований ищут способы оценки изменения эффек-

тивного сечения трубопровода вследствие коррозии и способы учета изменения характера напряженного состояния стенок трубы [3, 4]. При этом не учитывается изменение асимметрии цикла нагружения в процессе движения рабочей жидкости по трубопроводу. Такие колебания цикла нагружения могут быть вызваны гидроударами, импульсным характером движения жидкости и другими причинами [12, 15].

Таким образом, при проектировании и исследовании трубопроводного транспорта не учитываются асимметричные колебания внутритрубногo давления, что может приводить к неправильной оценке ресурса данного типа конструкций. Поэтому цель данного исследования – выявление влияния асимметрии цикла нагружения на усталостную прочность трубопровода при наличии коррозионного повреждения.

Описание моделирования

В нашем исследовании для оценки усталостной долговечности использована методика, изложенная в государственных стандартах, а также в наиболее распространенных нормах по расчету прочности [2, 5]. Как правило, данная методика сводится к шести стандартным этапам: 1) задание опасной точки; 2) задание истории нагружения; 3) задание усталостных свойств материалов; 4) введение коэффициента запаса; 5) вычисление поправочных коэффициентов, учитывающих свойства конструкции; 6) оценка параметров, характеризующих сопротивление усталости конструкции. При осуществлении расчетов мы в основном придерживались данных этапов, вычисления производились в программном комплексе ANSYS [9] в модуле Fatigue.

Геометрически модель представляет собой участок трубы диаметром 1220 мм, длиной 1000 мм, с толщиной стенки 10 мм. Материал детали – конструкционная сталь с пределом прочности $\sigma_b=450$ МПа и пределом текучести $\sigma_t=250$ МПа. Давление, прикладываемое равномерно к внутренней поверхности трубы, составляет 5,3 МПа. Ввиду симметрии модели и равномерности прикладываемой нагрузки в расчете рассматривается сегмент трубопровода, ограниченный горизонтальной плоскостью. В качестве граничных условий приняты: жесткая заделка с одного торца трубы (область А на рис. 1) и условия симметрий на другом – область В на рис. 1 (запрещение перемещений по нормали к области В), также условия симметрии заданы в области сечения горизонтальной плоскостью симметрии (запрещение перемещений по нормали к области D на рис. 1). Данная геометрическая модель была разбита на конечно-элементную сетку, состоящую из объемных шестигранников, имеющих 20 узлов, расположенных в вершинах, к узлам, расположенным в вершинах, добавлены промежуточные узлы на серединах сторон (данный тип элементов в системе ANSYS носит название Brick 20node 95).

Так как многоцикловая усталость происходит в основном в условиях упругого деформирования [2, 5, 8], для построения истории нагружения используют гипотезу линейности взаимосвязи напряжений и прикладываемых внешних усилий. В рамках данной гипотезы необходимо учитывать шкалирующий множитель, служащий для подгонки значения статической силы к интервалу изменения переменной нагрузки. В наших расчетах с учетом номинального давления в трубопроводе и давления, используемого в статическом расчете, шкалирующий множитель равен 5,3. Зависимость, используемая для построения истории нагружения, имеет вид

$$\begin{cases} \sigma_{ijag} = \sigma_{ij} k_{sc} T_{ag} \\ \sigma_{ijmg} = \sigma_{ij} k_{sc} T_{mg} \end{cases}, \quad (1)$$

где σ_{ijag} , σ_{ijmg} – характеристики истории нагружения для амплитудного и среднего значения i, j -й компонент тензора напряжений соответственно;

σ_{ij} , – i, j -е компоненты тензора напряжений, полученные в результате статических расчетов;

k_{sc} – шкалирующий множитель;

T_{ag} , T_{mg} – амплитудное и среднее значения временного ряда, рассматриваемого в цикле нагружения.

Кривая усталости для материала изделия изображена на рис. 3. Данная кривая была получена в условиях циклического изгиба при симметричном нагружении.

Рис. 1. Модель трубопровода с приложенными граничными условиями и нагрузкой.

На первом этапе исследовалось влияние статически прикладываемого давления на прочностные характеристики модели. При решении статической задачи было принято, что величина прикладываемого давления составляет 1 МПа. Результатом решения является распределение поля напряжений в конструкции (рис. 2). Полученное решение показывает, что поле напряжений носит распределенный характер и установить опасную точку конструкции невозможно, поэтому в наших расчетах мы не учитываем наличие и месторасположение опасной точки.

Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений.

Соотношения (1) указывают на то, что в узлах конструкции возникает многоосное напряженное состояние. Но кривая усталости материала (рис. 3) была получена в условиях одноосного нагружения. Для приведения характеристик тензора напряжений в многоосном случае к эквивалентным по повреждаемости характеристикам в одноосном случае используются различные зависимости.

Так как материал расчетной модели обладает пластичными свойствами, мы использовали подход удельной энергии формоизменения со знаком:

$$\begin{cases} \sigma_a^{пр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1a} - \sigma_{2a})^2 + (\sigma_{2a} - \sigma_{3a})^2 + (\sigma_{3a} - \sigma_{1a})^2} \cdot \text{sign}(\sigma_{1a}) \\ \sigma_m^{пр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{1m} - \sigma_{2m})^2 + (\sigma_{2m} - \sigma_{3m})^2 + (\sigma_{3m} - \sigma_{1m})^2} \cdot \text{sign}(\sigma_{1m}) \end{cases} \quad (2)$$

где: $\sigma_a^{пр}$, $\sigma_m^{пр}$ – приведенные значения амплитудного и среднего значений напряжения соответственно,

σ_{1a} , σ_{2a} , σ_{3a} и σ_{1m} , σ_{2m} , σ_{3m} – главные напряжения тензоров амплитудных и средних значений напряжений соответственно, получаемых с использованием соотношений (1).

Рис. 3. Кривая усталости для материала модели.

Кроме того, зависимость, изображенная на рис. 3, была получена при симметричном нагружении и не учитывает средние значения напряжений, которые могут значительным образом влиять на сопротивление усталости [5, 8]. Для учета средних напряжений используют различные соотношения для амплитуды эквивалентного симметричного цикла напряжений $\sigma_{a экв}$ [2, 5]. В данном исследовании была использована зависимость Гудмана:

$$\sigma_{a экв} = \begin{cases} \frac{\sigma_a^{пр}}{1 - \frac{\sigma_m^{пр}}{\sigma_B}}, & \sigma_m^{пр} \geq 0 \\ 0, & \sigma_m^{пр} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Для учета различий в свойствах реальной конструкции и модельных образцов, на которых экспериментально получают кривые усталости, используют коэффициент снижения предела выносливости K_f (в соответствии с ГОСТ 25.504-82):

$$K_f = K_v / \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right), \quad (4)$$

где K_v – коэффициент влияния поверхностного упрочнения;

K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений;

$K_{d\sigma}$ – коэффициент влияния абсолютных размеров поперечного сечения;

$K_{F\sigma}$ – коэффициент влияния шероховатости поверхности.

Значения величин K_v и K_σ принимаем равными 1. Значение величины $K_{d\sigma}$ рассчитаем по формуле, приведенной в [2]:

$$K_{d\sigma} = K_\infty + (1 - K_\infty)e^{-\lambda d}, \quad (5)$$

где K_∞ – предел, к которому стремится коэффициент $K_{d\sigma}$ при увеличении абсолютных размеров (принимается равным 0,5 для деформируемых материалов – сталей, алюминиевых и титановых сплавов);

d – характерный размер детали (принимается равным диаметру трубопровода в миллиметрах);

λ – коэффициент, принимается равным 0,01.

Таким образом, коэффициент $K_{d\sigma}$ равен 0,67. Так как в нашем исследовании производится учет влияния коррозионного повреждения, то вместо коэффициента влияния шероховатости поверхности вводится коэффициент коррозии (ввиду большего, по сравнению с коэффициентом шероховатости, влияния на снижение предела выносливости, [5]). Принимаем, что коррозионные повреждения равномерно распределены по внутренней поверхности трубы. Коэффициент коррозии определяется по зависимости

$$K_{кор} = \frac{\sigma_{кор}}{\sigma}, \quad (6)$$

где $\sigma_{кор}$, σ – пределы выносливости гладких лабораторных образцов в коррозионной среде и на воздухе соответственно. По экспериментальным данным, изложенным в [10], коэффициент коррозии для трубопроводов, транспортирующих углеводородные среды в различных условиях, лежит в пределах от 0,16 до 0,6, принимаем усредненное значение коэффициента коррозии, равное 0,38, что соответствует средней степени коррозионного повреждения трубопровода. В результате коэффициент снижения предела выносливости K_f для расчетной модели равен 0,32.

Для учета влияния асимметрии цикла (т.е. отношения минимального значения амплитуды прикладываемой нагрузки к ее максимальному значению) данный параметр варьировался в промежутке от 0,2 до 1.

Обсуждение результатов

В качестве результатов численного моделирования были получены распределение долговечности конструкции и распределение коэффициента запаса по амплитудам напряжений (рисунки 4 и 5). Также была построена зависимость усталостной долговечности от коэффициента асимметрии цикла нагружения (рис. 6). Как демонстрируют диаграммы (рис. 6), асимметрия цикла нагружения имеет значительное влияние на ресурс конструкции. Согласно полученным теоретическим расчетам, двукратное различие между минимальным и максимальным значениями прикладываемой нагрузки приводит к уменьшению ресурса по усталостной долговечности практически на три порядка.

Рис. 4. Распределение долговечности.

Рис. 5. Распределение коэффициента запаса по амплитудам напряжений.

Рис. 6. Зависимость усталостной долговечности от коэффициента асимметрии цикла нагружения.

Данные результаты теоретически объясняют снижение ресурса службы трубопроводов и их аварийный выход из строя в результате периодических колебаний давления рабочей жидкости, импульсного движения среды, микрогидроударов.

Заключение

Итак, показано, что импульсное изменение давления в трубопроводе может приводить к значительному снижению усталостной долговечности данного типа конструкций. Полученные нами результаты согласуются с известными ранее данными, связывающими нестационарные режимы движения рабочей жидкости и снижение ресурса трубопроводов. Кроме того, мы показали возможность использования существующих программных продуктов для оценки усталостных характеристик конструкции с применением стандартных инженерных методик. Конечно, при данном подходе не учитываются возникновение и рост трещин или конкретное местонахождение и кинетика развития коррозионных повреждений, но тем не менее есть возможность, используя стандартные расчетные методики, прогнозировать усталостные характеристики различных конструкций. Так как в нормативной и научной литературе отсутствуют теоретические и экспериментальные данные, связывающие асимметрию цикла нагружения внутритрубным давлением и усталостную прочность металла трубопровода, то примененная в исследовании методика может быть использована для оценки ресурса трубопроводов на стадии проектирования и эксплуатации. Все полученные в работе теоретические результаты требуют дальнейшей экспериментальной проверки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арабей А.Б., Мелехин О.Н., Ряховских И.В. и др. Исследование возможности длительной эксплуатации труб с незначительными стресс-коррозионными повреждениями // Вести газовой науки: науч.-техн. сб. 2016. № 3(27). С. 4–11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vozmozhnosti-dlitelnoy-ekspluatatsii-trub-s-neznachitelnymi-stress-korrozionnymi-povrezhdeniyami> (дата обращения: 08.10.2019).
2. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с. URL: <http://techlib.org/books/birger-raschet-na-prochnost-detalejj-mashinspra-vochnik/> (дата обращения: 20.09.2019).
3. Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю., Шабаров А.Б. и др. Расчетная модель и алгоритм определения остаточного ресурса трубопровода в условиях периодических изменений напряжений и коррозии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S 4.

- С. 199–206. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnaya-model-i-algoritm-opredeleniya-ostatochnogo-resursa-truboprovoda-v-usloviyah-periodicheskikh-izmeneniy-napryazheniy-i> (дата обращения: 12.09.2019).
4. Ибрагимов А.А., Шабаров А.Б., Подорожников С.Ю., Земенков Ю.Д. Метод расчета долговечности трубопроводов с учетом коррозии и переменных напряжений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S4. С. 284–293. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-dolgovechnosti-truboprovodov-s-uchetom-korrozii-i-peremennyh-napryazheniy> (дата обращения: 29.11.2019).
5. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с. URL: <https://www.chipmaker.ru/files/-file/8276/> (дата обращения: 12.09.2019).
6. Кушнарченко В.М., Репях В.С., Кушнарченко Е.В., Чирков Е.Ю. Анализ причин отказов оборудования и трубопроводов // Вестник ОГУ. 2010. № 10(116). С. 153–159. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-prichin-otkazov-oborudovaniya-i-truboprovodov> (дата обращения: 05.11.2019).
7. Муравьева Л.В., Овчинников И.Г. Анализ усталостной прочности морского трубопровода из высокопрочной стали // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 10(121). С. 1260–1268. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ustalostnoy-prochnosti-morskogo-truboprovoda-iz-vysokoprochnoy-stali> (дата обращения: 10.11.2019).
8. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Соппротивление усталости металлов и сплавов: в 2. ч. Ч. 1. Киев: Наукова думка, 1987. 320 с. URL: http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/-knigi/soprotivlenie_ustalosti_metallov_i_splavov_spravochnik__troshchenko_vt_sosnovskiy_la_ch1_kiev_naukova_dumka_1987__347s_07_02_2010/ (дата обращения: 06.12.2019).
9. ANSYS Theory Reference. Structures. SAS IP, Inc. URL: <https://ru.scribd.com/document/178100129/-ANSYS-Theory-Reference-for-the-Mechanical-APDL-and-Mechanical-Applications-R13-pdf> (дата обращения: 11.12.2019).
10. Bin Ma, Jian Shuai, Dexu Liu, Kui Xu. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects. Engineering Failure Analysis. 2013;32:209–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.03.015>
11. Cunha S.B. Comparison and Analysis of Pipeline Failure Statistics. Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference. Vol. 4: Pipelining in Northern and Offshore Environments; Strain-Based Design; Risk and Reliability; Standards and Regulations. Calgary, Alberta, Canada, Sept. 24–28. ASME, 2012, p. 521–530. DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90186>
12. Elostia H., Huang S., Incecik A. Wave loading fatigue reliability and uncertainty analyses for geotechnical pipeline models. Ships and Offshore Structures. 2014;9(4):450–463. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2013.834168>
13. Majid Z.A., Mohsin R., Yaacob Z., Hassan Z. Failure analysis of natural gas pipes. Engineering Failure Analysis. 2010;17(4):818–837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.016>
14. Xu L.Y., Cheng Y.F. Reliability and failure pressure prediction of various grades of pipeline steel in the presence of corrosion defects and pre-strain. International J. of Pressure Vessels and Piping. 2012;89:75–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2011.09.008>
15. Yu M., Xing X., Zhang H., Zhao J., Eadie R., Chen W., Been J., Boven G.V., Kania R. Corrosion fatigue crack growth behavior of pipeline steel under underload-type variable amplitude loading schemes. Acta Materialia. 2015;96:159–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.049>

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-2>

Figura K.

KONSTANTIN FIGURA, Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor, ORCID: 0000-0002-0777-0089, ResearcherID: G-9221-2012,
ScopusID: 56433299000, e-mail: figura_85@mail.ru
Department of Hoisting, Transport and Road Building Machinery
Bratsk State University
Bratsk, Russia

Influence of asymmetry of the loading cycle on the fatigue strength of pipelines under corrosion damage

Abstract: The article is devoted to the fatigue characteristics of pipelines subject to corrosion damage: a pipeline operating under asymmetric load with internal pressure by the working fluid is considered. The analysis of publications related to the durability of pipelines subject to corrosion damage and variable loads is carried out; and the most relevant area of research is highlighted – assessment of changes in the effective section of the pipeline due to corrosion and ways to account for changes of stress state of the pipe walls. However, in these publications no changes in the asymmetry of the loading cycle in the process of movement of the working fluid through the pipeline are properly considered. Such oscillations of the loading cycle can be caused by hydraulic shocks, by pulse nature of the fluid motion, or by other reasons. Therefore, this article attempts to identify the degree of influence of the asymmetry of the loading cycle on the fatigue life of the pipeline. The proposed study is based on standard methods for determination of the fatigue characteristics of structures described in the respective state standards, as well as in the most common standards for strength calculation. The applied approach does not consider the process of crack formation in an explicit form, but is more universal for the purpose of engineering calculations. Based on standard methods and improved by the authors of this article, this specific technique allows the use of standard software packages to determine the fatigue characteristics of structures operating under complex loading conditions. The simulation was performed with the ANSYS software package. The respective distributions of durability of the structure, as well as the safety factor for stress amplitudes, are obtained. Dependence of the fatigue life on the asymmetry coefficient of the loading cycle is also built and displayed. It is shown that a pulse change of pressure in the pipeline can lead to a significant decrease of the fatigue life of this type of structures. The results are consistent with the known data linking non-stationary modes of movement of the working fluid with the respective decrease of pipeline's resource. Also, since there is no theoretical and experimental data in the regulatory and scientific literature linking asymmetry of the loading cycle by the in-pipe pressure with the fatigue strength of the pipeline metal, the technique used by the authors of the article can be used to estimate the resource of pipelines at the design and operation stages.

Keywords: fatigue life, cyclic loading, cycle asymmetry, corrosion damage, pipeline.

REFERENCES

1. Arabey A.B., Melekhin O.N., Ryakhovskikh I.V. et al. Studying a possibility of continuous service of pipes with minor stress-corrosion cracks. *Vesti Gazovoy Nauki*. 2016(27):4–11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vozmozhnosti-dlitelnoy-ekspluatatsii-trub-s-neznachitelnymi-stress-korroziionnymi-povrezhdeniyami> – 08.10.2019.

2. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. Strength calculation of machine parts. M., Mashinostroyeniye, 1993, 640 p. URL: <http://techlib.org/books/birger-raschet-na-prochnost-detalejj-mashin-spravochnik/> – 20.09.2019.
3. Ibragimov A.A., Podorozhnikov S.Yu., Shabarov A.B et al. Settlement model and algorithm of definition of a residual resource of the pipe duct in the conditions of periodic changes of tension and corrosion. Mining Information and Analytical Bulletin. 2014(S4):199–206. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnaya-model-i-algoritm-opredeleniya-ostatochnogo-resursa-truboprovoda-v-usloviyah-periodicheskikh-izmeneniy-napryazheniy-i> – 12.09.2019.
4. Ibragimov A.A., Shabarov A.B., Podorozhnikov S.Yu., Zemenkov Yu.D. Method of an assessment of durability of pipe ducts taking into account corrosion and variable tension. Mining Information and Analytical Bulletin. 2014(S4):284–293. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-rascheta-dolgovechnosti-truboprovodov-s-uchetom-korrozii-i-peremennyh-napryazheniy> – 29.11.2019.
5. Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. Calculations of machine parts and structures for strength and durability. M., Mashinostroyeniye, 1985, 222 p. URL: <https://www.chipmaker.ru/files/file/8276/> – 12.09.2019.
6. Kushnarenko V.M., Repyakh V.S., Kushnarenko E.V., Chirkov E.Yu. Analysis of the causes of equipment and pipeline failures. Bulletin of OSU. 2010(116):153–159. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-prichin-otkazov-oborudovaniya-i-truboprovodov> – 05.11.2019.
7. Muravyova L.V., Ovchinnikov I.G. Fatigue behavior of high-strength steel-pipe in offshore pipeline. Vestnik MGSU. 2018;13(121):1260–1268. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-ustalostnoy-prochnosti-morskogo-truboprovoda-iz-vysokoprochnoy-stali> – 10.11.2019.
8. Troshchenko V.T., Sosnovsky L.A. Fatigue resistance of metals and alloys: in 2 parts. Part 1. Kiev, Naukova Dumka, 1987, 320 p. URL: http://www.materialscience.ru/subjects/materialovedenie/-knigi/soprotivlenie_ustalosti_metallov_i_splavov_spravochnik_troshchenko_vt_sosnovskiy_la_ch1-kiev_naukova_dumka_1987_347s_07_02_2010/ – 06.12.2019.
9. ANSYS Theory Reference. Structures. SAS IP, Inc. URL: <https://ru.scribd.com/document/178100129/ANSYS-Theory-Reference-for-the-Mechanical-APDL-and-Mechanical-Applications-R13-pdf> – 11.12.2019.
10. Bin Ma, Jian Shuai, Dexu Liu, Kui Xu. Assessment on failure pressure of high strength pipeline with corrosion defects. Engineering Failure Analysis. 2013;32:209–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.03.015>
11. Cunha S.B. Comparison and Analysis of Pipeline Failure Statistics. Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference. Vol. 4: Pipelining in Northern and Offshore Environments; Strain-Based Design; Risk and Reliability; Standards and Regulations. Calgary, Alberta, Canada, Sept. 24–28. ASME, 2012, p. 521–530. DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90186>
12. Elostia H., Huang S., Incecik A. Wave loading fatigue reliability and uncertainty analyses for geotechnical pipeline models. Ships and Offshore Structures. 2014;9(4):450–463. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2013.834168>
13. Majid Z.A., Mohsin R., Yaacob Z., Hassan Z. Failure analysis of natural gas pipes. Engineering Failure Analysis. 2010;17(4):818–837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.016>
14. Xu L.Y., Cheng Y.F. Reliability and failure pressure prediction of various grades of pipeline steel in the presence of corrosion defects and pre-strain. International J. of Pressure Vessels and Piping. 2012;89:75–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2011.09.008>
15. Yu M., Xing X., Zhang H., Zhao J., Eadie R., Chen W., Been J., Boven G.V., Kania R. Corrosion fatigue crack growth behavior of pipeline steel under underload-type variable amplitude loading schemes. Acta Materialia. 2015;96:159–169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.049>