

УДК620.179.14

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА  
ОБОЛОЧКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ, ПОДВЕРЖЕННОЙ  
МАЛОЦИКЛОВОМУ НАГРУЖЕНИЮ**

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL DEFINITION  
OF LIMIT STATE OF THE MATERIAL OF SHELL STRUCTURES  
SUBJECTED TO LOW-CYCLE LOADING**

**Самигуллин А.В., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р.**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический  
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

**A.V. Samigullin, E.A. Naumkin, I.R. Kuzeev**

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,  
Ufa, the Russian Federation**

**e-mail: S\_Alecsei@mail.ru**

**Аннотация.** В работе рассматривается вопрос определения предельного состояния материала оболочковой конструкции из стали 20, подверженной малоциклового нагружению внутренним давлением, расчетным и экспериментальными методами. Расчет по определению предельного состояния материала оборудования выполнялся с применением основных критериев механики малоциклового разрушения. Было установлено, что при уровне накопленных усталостных повреждений  $N_i/N_p = 0,83$  происходит страгивание трещины. Расчетным путем установлено изменение длины трещины от уровня накопленных усталостных повреждений. Для определения предельного состояния материала оболочковой конструкции использовались результаты анализа изменения среднего напряжения отклика электрического сигнала. Изучали чувствительность изменения среднего напряжения

отклика электрического сигнала к моменту страгивания трещины. Установлено, что изменение среднего напряжения отклика электрического сигнала ( $U_{ср_i}/U_{ср_{исх}}$ ) имеет общую тенденцию снижения, а при достижении уровня накопленных усталостных повреждений  $N_i/N_p = 0,83$  обладает минимальным значением. Исследуемый параметр позволил зафиксировать момент страгивания трещины в материале оболочковой конструкции из стали 20 в условиях циклического нагружения внутренним давлением. При дальнейшей эксплуатации оборудования наблюдается устойчивое увеличение длины трещины с последующим доломом оболочковой конструкции с большой скоростью в последнем цикле нагружения. В качестве критерия наступления предельного состояния материала оборудования из стали 20 был принят момент страгивания трещины. Установленная зависимость изменения среднего напряжения отклика электрического сигнала ( $U_{ср_i}/U_{ср_{исх}}$ ) от уровня накопленных усталостных повреждений может быть использована для определения предельного состояния материала оболочковой конструкции из стали 20 в условиях малоциклового нагружения.

**Abstract.** In this paper we consider the question of determining the limit state of the material of the shell structure of steel 20 subjected to low-cycle loading by internal pressure, the calculated and experimental methods. The calculation to determine the limit state of the material equipment was carried out using basic mechanics criterion low-cycle loading. It was found that the level of fatigue damage accumulation  $N_i/N_r = 0.83$  breakaway crack occurs. Calculated by changing the length of the crack is set on the level of accumulated fatigue damage. To determine the limit state design of the shell material used in an analysis of changes in the average voltage response of the electrical signal. Set the sensitivity of changes in the average voltage response of the electrical signal at the time of the breakaway crack. The change in the medium-voltage response of the electrical signal ( $U_{sr_i}/U_{sr_{iskh}}$ ) has a general downward trend, and when the level of accumulated fatigue damage  $N_i/N_r = 0.83$  has a minimum value. The test pa-

parameter allowed to fix starting torque cracks in the material of the shell construction of 20 steel under cyclic loading by internal pressure. With the further operation of the equipment has been a steady increase in length of the crack, followed by dolomite shell design with great speed in the last cycle of loading. As a criterion of a limiting condition of the material equipment of steel 20 was adopted starting torque crack. The dependence changes in the average voltage response of the electrical signal ( $U_{sr_i}/U_{sr_{iskh}}$ ) on the level of fatigue damage accumulation can be used to determine the limit state of the material of the shell structure of steel 20 under low-cycle loading.

**Ключевые слова:** предельное состояние материала, оболочковые конструкции, малоцикловое нагружение, электрический сигнал, коэффициент интенсивности упругопластических деформаций, страгивание трещины.

**Key words:** limit state of the material, shell construction, low-cycle loading, the average voltage response of the electrical signal, intensity factor of elastic-plastic deformation, crack breakaway.

В нормативно-технической литературе существует несколько определений понятия предельного состояния, среди которых наиболее полным и четким является следующее [6,7,8]: предельное состояние – это состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности, выхода заданных параметров за установленные пределы, снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой или, наконец, необходимости проведения текущего либо капитального ремонта [8]. Различают три вида расчетных предельных состояний [12,6]:

а) первое предельное состояние – по несущей способности (прочности, устойчивости и выносливости – при переменных напряжениях);

б) второе предельное состояние – по развитию чрезмерных деформаций (прогибов, перекосов и др.);

в) третье предельное состояние – по образованию или раскрытию трещин.

Каждое из перечисленных предельных состояний характеризуется соответствующим критерием, достижение которого определяет остановку эксплуатации оборудования. По многим характерным для нефтехимического оборудования деградационным процессам (сплошной коррозии, изнашиванию, ползучести и др.) имеются критерии наступления предельного состояния. По другим видам повреждений (например, образованию трещин, межкристаллитной коррозии) критерии наступления предельного состояния не установлены [8].

Ранее были проведены исследования на стандартных плоских образцах в условиях малоциклового нагружения по достижению материалом предельного состояния [1,5,9]. Так в работе [1] установлена зависимость изменения электромагнитных свойств стали 09Г2С от степени накопления усталостных повреждений в упругопластической области деформирования, которая показывает, что значение среднего напряжения отклика электромагнитного сигнала имеет общую тенденцию снижения, а при достижении  $N_i/N_p = 0,8$  ( $N_i/N_p$  – отношение количества циклов нагружения на момент измерения к количеству циклов до разрушения) наблюдается экстремум, соответствующий предельному состоянию материала. В данной работе в качестве прибора, позволяющего измерять среднее напряжение отклика электрического сигнала, использовалось устройство, состоящее из внешнего измерительного устройства Tie Pie SCOPE HS801 (погрешность измерения составляет 1%), накладного вихретокового преобразователя трансформаторного типа с сердечником с неконцентрическим расположением обмоток и персонального компьютера.

В работе Шарипкуловой А.Т. установлено, что для стали 20 предельным состоянием является уровень накопленных повреждений, равный

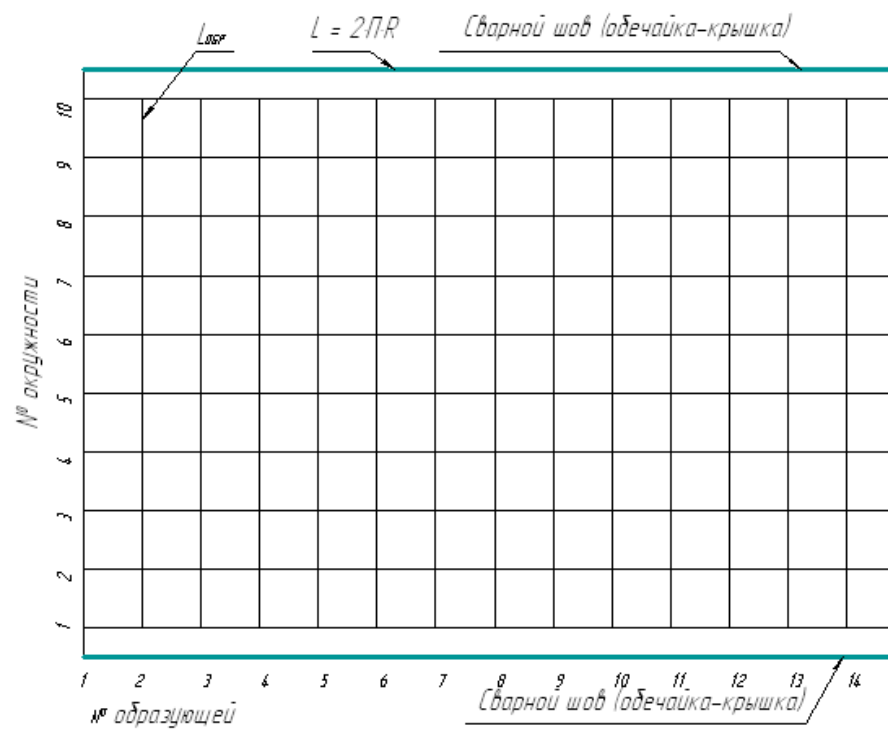
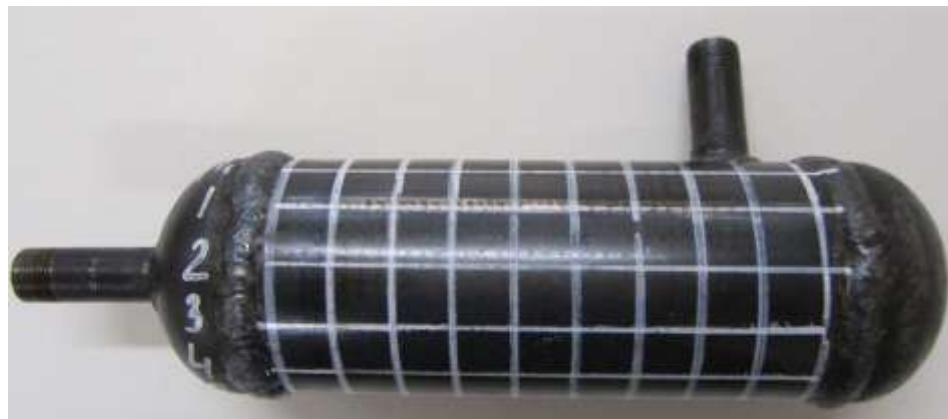
0,71. В качестве критерия предельного состояния принимается граница перехода металла в пластическую область деформирования [5]. В подтверждение чувствительности магнитных и электромагнитных полей на внешнее воздействие, следует отметить исследования Кондрашовой О.Г., где установлено, что для стали 09Г2С изменение нормальной составляющей вектора напряженности магнитного поля при уровне накопленных усталостных повреждений  $N_i/N_p = 0,77$  приобретает минимальное значение. Также в качестве отражения структурных изменений, происходящих в металле в процессе эксплуатации, проведен анализ мультифрактальных параметров материала, где установлено, что изменение скрытой упорядоченности структуры приобретает минимальное значение при уровне накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,77$  [2].

В связи с этим применительно к оболочковым конструкциям, подверженным малоцикловому нагружению, необходимо установить чувствительно ли изменение среднего напряжения отклика электрического сигнала к достижению материалом предельного состояния и определить расчетным методом уровень накопленных усталостных повреждений, соответствующий предельному состоянию материала оборудования из стали 20.

С этой целью были изготовлены цилиндрические оболочковые конструкции (диаметром 89 мм, толщиной стенки 3 мм) с эллиптическими днищами, штуцерами для подачи и выхода рабочей среды (рисунок 1).

Для выбора материала исследования был проведен анализ использования марок сталей при изготовлении сосудов и аппаратов на примере одного из объектов нефтеперерабатывающего комплекса Республики Башкортостан.

На основе анализа в качестве материала образцов была выбрана конструкционная углеродистая сталь 20.



а)

б)

Рисунок 1. Экспериментальный образец (а) и сетка измерения (б)

Образцы выполнялись из электросварной трубы стали 20 ГОСТ 10705-80 [4]. У электросварных труб имеет место локальное технологическое утонение стенки. Для установления влияния технологического утонения толщины стенки на разрушение оболочки при циклическом нагружении были использованы трубы именно с данным отклонением.

Испытания проводились на экспериментальном стенде, где оболочковые конструкции подвергались малоциклового нагружению внутренним давлением до разрушения. Схема нагружения представляла собой отнулевой цикл.

Амплитуда давления устанавливалась таким образом, чтобы возникающие в металле напряжения обеспечивали упругопластическую деформацию материала. Соответствующий вид деформации наблюдается при напряжениях  $(0,9 \div 1,1) \sigma_T$  [11]. Амплитуда напряжения эксперимента выбиралась как срединное значение из указанного интервала, т.е. равное  $\sigma_T$ . Предел текучести для данной стали определялся по результатам статического осевого растяжения стандартных плоских образцов по ГОСТ 1497 [10], изготовленных из электросварной трубы, и составил 361 МПа. Рабочее давление устанавливается по формуле [11]:

$$p = \frac{2 \cdot \varphi \cdot s}{D + s} \cdot \sigma_T, \quad (1)$$

где  $s$  – толщина стенки цилиндрической обечайки, мм;

$\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва;

$D$  – внутренний диаметр цилиндрической обечайки, мм;

$\sigma_T$  – предел текучести стали 20, МПа.

Максимальное давление эксперимента составило 25,2 МПа.

Измерение среднего напряжения отклика электрического сигнала проводилось в исходном, разрушенном состоянии и при уровне накопленных усталостных повреждений 0,2  $N_p$ , 0,4  $N_p$ , 0,6  $N_p$ , 0,8  $N_p$  ( $N_p$  – количество циклов до разрушения). Разрушение оболочковых конструкций происходило в зоне электросварного шва (образующая цилиндрической обечайки №1) в виде трещины.

Измерение среднего напряжения отклика электрического сигнала также как и в работе [1] осуществлялось внешним измерительным устройством Tie Pie SCOPE HS801 (погрешность измерения составляет 1%), накладным вихретоковым преобразователем трансформаторного типа с сердечником с неконцентрическим расположением обмоток и персональным компьютером.

Проведен анализ изменения среднего напряжения отклика электрического сигнала ( $U_{срi}/U_{срисх}$ ) по цилиндрической обечайке от уровня накопленных усталостных повреждений. Следует отметить, что при рассмотрении параметра  $U_{срi}/U_{срисх}$  непосредственно в зоне разрушения (рисунок 2) наблюдается общая тенденция снижения значения, а при достижении уровня накопленных усталостных повреждений равных  $N_i/N_p = 0,83$  наблюдается минимальное его значение. Получена зависимость изменения напряжения отклика электрического сигнала ( $U_{срi}/U_{срисх}$ ) от уровня накопленных усталостных повреждений ( $N_i/N_p$ )

$$\frac{U_{срi}}{U_{срисх}} = 6,7661 \cdot \left(\frac{N_i}{N_p}\right)^5 - 15,117 \cdot \left(\frac{N_i}{N_p}\right)^4 + 12,028 \cdot \left(\frac{N_i}{N_p}\right)^3 - 3,9265 \cdot \left(\frac{N_i}{N_p}\right)^2 + 0,2205 \cdot \left(\frac{N_i}{N_p}\right) + 1. \quad (2)$$

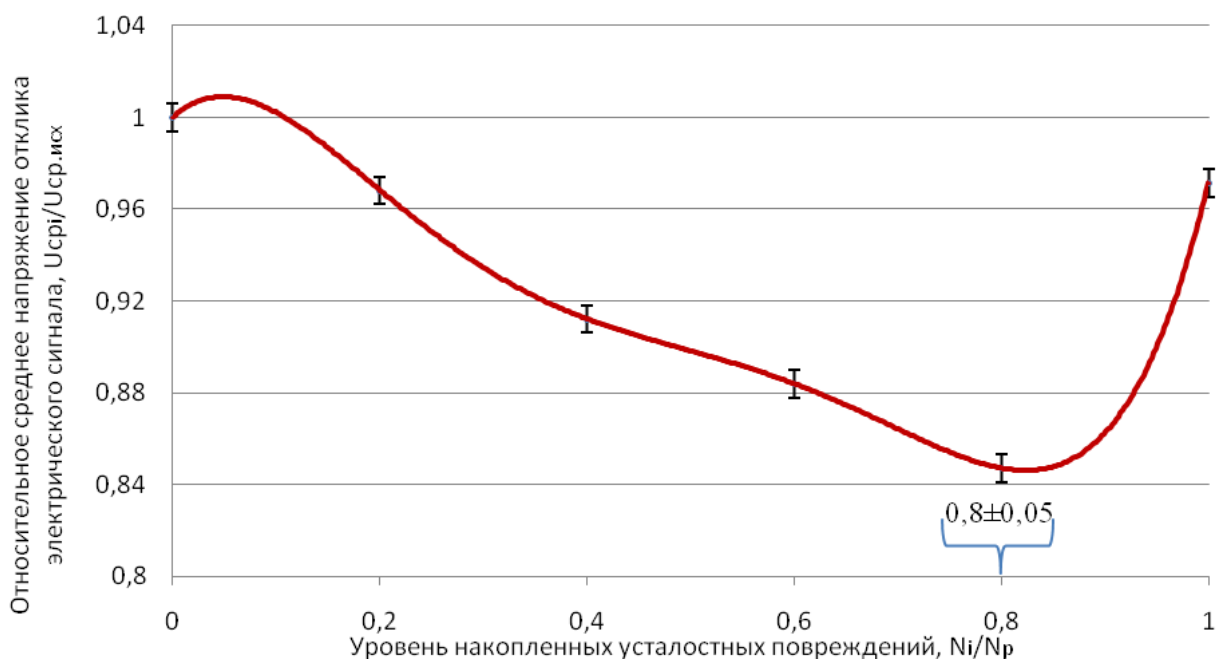


Рисунок 2. Изменение среднего напряжения отклика электрического сигнала от уровня накопленных усталостных повреждений в зоне разрушения



Рассмотрим развитие трещины и изменение основных силовых характеристик в зоне разрушения в условиях малоциклового нагружения. Основными критериями механики малоциклового разрушения являются коэффициент интенсивности напряжений (КИН)  $K_I$  и его критическое значение  $K_{IC}$  [13]. Использование коэффициента интенсивности напряжений приводит к соотношению, в котором темп роста подрастания трещины зависит от свойств материала и условий нагружения. Данное явление отражено в уравнении Париса-Эрдогана:

$$\frac{dl}{dN} = C \cdot (\Delta K_I)^n, \quad (3)$$

где  $\Delta K_I$  – размах (амплитуда) коэффициента интенсивности напряжений, МПа $\sqrt{м}$

$l$  – длина (глубина) трещины, м;

$C$  – константа стали, определяемая экспериментально;

$n$  – константа стали;

$N$  – количество циклов.

Для отнулевого цикла нагружения  $\Delta K_I = K_I$ . Размах коэффициента интенсивности напряжений определяется по формуле:

$$K_I = \sigma_a \sqrt{\pi \cdot l}, \quad (4)$$

где  $\sigma_a$  – амплитуда изменения напряжений, МПа;

При рассмотрении полной диаграммы циклического разрушения в форме S-образной кривой, представленной на рисунке 3, традиционно можно выделить 3 зоны эволюции трещины [13].

Первая зона, где  $K_I < K_{th}$ , трещина не развивается на протяжении базы испытаний [12].  $K_{th}$  называют «пороговым» коэффициентом интенсивности напряжений, т.е. такое значение КИН, которое вызывает стагнацию трещины. Значение  $K_{th}$  имеет большое практическое значение, поскольку оно позволяет устанавливать безопасные характеристики циклического нагружения и размеры трещины [12].

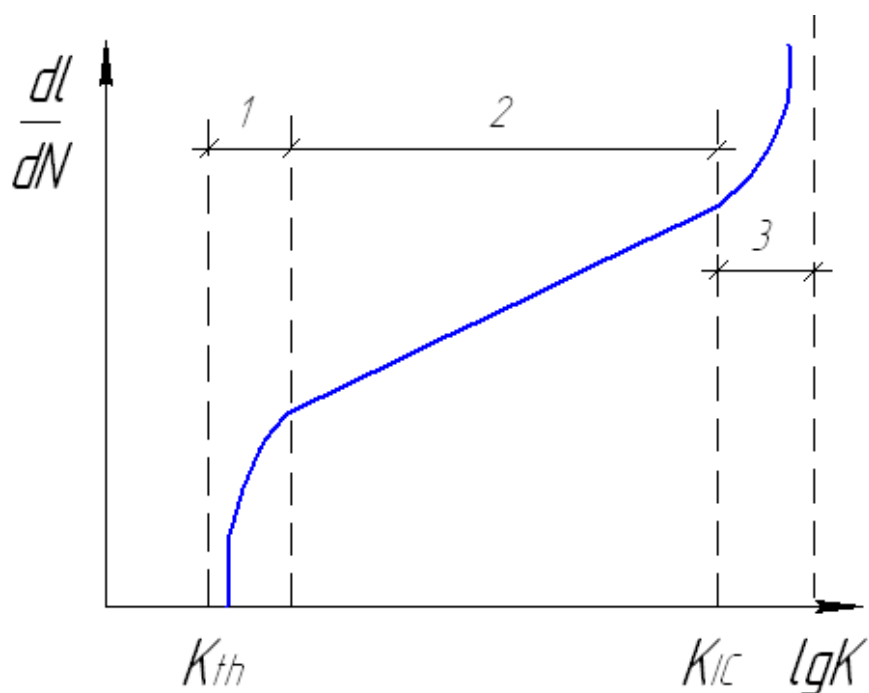


Рисунок 3. Диаграмма циклического разрушения

Условно принимается, что при  $K_I = K_{th}$  происходит переход от первой стадии развития ко второй, причем скорость роста трещины возрастает скачком.

Во второй зоне происходит устойчивый рост трещины, который характеризуется  $K_{th} < K_I < K_{IC}$ . Данный участок кривой описывается уравнением (3, 9). В третьей зоне наблюдается процесс ускоренного разрушения, при этом коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  близок по значению к  $K_{IC}$  [13].

Рассмотрим силовые критерии усталостной трещины в оболочковой конструкции, возникающие при малоцикловом нагружении внутренним давлением. Для отнулевого цикла нагружения величина  $K_{th}$  определяется по формуле [3,14]:

$$K_{th} = 12,7 - 0,006\sigma_T. \quad (5)$$

Длина трещины, при которой происходит ее страгивание, определяется для порогового КИН из формулы (4):

$$l_{th} = \frac{K_{th}^2}{\sigma_p^2 \cdot \pi},$$

где  $\sigma_p$  – рабочее давление эксперимента, мм.

Критическое значение длины (глубины) трещины  $l_c$  определяется по формуле [15]:

$$l_c = 1,835 \cdot 10^{-3} \cdot \sigma_T \cdot s, \quad (6)$$

где  $s$  – толщина стенки цилиндрической обечайки, мм.

Критический коэффициент интенсивности напряжений определяется исходя из формулы (4):

$$K_{IC} = \sigma_p \sqrt{\pi \cdot l_c}.$$

При упругопластическом деформировании средний участок диаграммы циклического разрушения описывается уравнением Н.А. Махутова [13]:

$$\frac{dl}{dN} = C_\sigma \cdot (\Delta K_{I\varepsilon})^{n_\sigma}, \quad (7)$$

где  $K_{I\varepsilon}$  – коэффициент интенсивности упругопластических деформаций, МПа $\sqrt{м}$ ;

$C_\sigma$  – константа стали, определяемая экспериментально;

$n_\sigma$  – константа стали, принимаем равной 2 [13].

Константа  $C_\sigma$  определяется по формуле [13]:

$$C_\sigma = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \varepsilon_{i_{кр}}^{-n_\sigma}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{i_{кр}}$  – предельная деформация стали.

Предельная деформация определяется по формуле [12]:

$$\varepsilon_{i_{кр}} = \frac{E}{\sigma_T} \ln \left( \frac{1}{1-\Psi} \right), \quad (9)$$

где  $E$  – модуль Юнга материала, МПа;

$\sigma_T$  – предел текучести материала, МПа;

$\Psi$  – относительное сужение.

Пороговый коэффициент интенсивности упругопластических деформаций страгивания трещины  $K_{th\varepsilon}$  и критический коэффициент интенсивности упругопластических деформаций  $K_{IC\varepsilon}$  определяются соответственно по формулам [12]:

$$K_{th\varepsilon} = \left( \frac{K_{th}}{\sigma_T} \right)^{\frac{2}{n_\sigma}}, \quad (10)$$

$$K_{IC\varepsilon} = \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_T} \right)^{\frac{2}{n_\sigma}}. \quad (11)$$

Число циклов нагружения, необходимое для подрастания трещины в области устойчивого роста, определяется интегрированием формулы (7):

$$N = \int_{l_{th}}^{l_{кр}} \frac{dl}{C_\sigma \cdot \Delta K_{I\varepsilon}^{n_\sigma}}. \quad (12)$$

Процесс устойчивого развития трещины имеет начало при 1670 циклов и длится практически до разрушения. Данное количество циклов соответствует уровню накопленных усталостных повреждений  $N_i/N_p = 0,83$ .

## Выводы

Расчетным методом установлено, что при уровне накопленных усталостных повреждений  $N_i/N_p = 0,83$  в материале оболочковой конструкции, подверженной малоцикловому нагружению, из стали 20 возникает страгивание трещины, т.е. достижение металлом предельного состояния. Параметр изменения среднего напряжения отклика электрического сигнала ( $U_{ср_i}/U_{ср_{исх}}$ ) приобретает минимальное значение при уровне накопленных повреждений  $N_i/N_p = 0,83$ , соответствующего предельному состоянию материала цилиндрической обечайки из стали 20. Следовательно, установленная зависимость может быть использована для определения предельного состояния материала оболочковой конструкции, подверженной малоцикловому нагружению.

*Исследования выполнялись при содействии Межвузовского центра коллективного пользования «Региональный научно-производственный комплекс «Недра» Уфимского государственного нефтяного технического университета.*

## Список используемых источников

1 Бикбулатов Т.Р. Оценка остаточного ресурса оборудования и предельного состояния конструкционных материалов при усталостном нагружении по результатам электромагнитных измерений. Дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2011. 100 с.

2 Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Кондрашова О.Г. Оценка адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик для определения ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования// Нефтегазовое дело: науч. техн. журн. Уфа, 2006. Т.1. №4. С. 124-133.

3 Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкции на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

4 ГОСТ 10705-80. Трубы стальные электросварные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 1980. 11 с.

5 Шарипкулова А.Т. Разработка метода оценки предельного состояния металла технологических трубопроводов по электромагнитным параметрам: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2009. 110 с.

6 Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Metallurgizdat, 2004. 408 с.

7 Халимов А.Г., Зайнуллин Р.С., Халимов А.А. Техническая диагностика и оценка ресурсов аппаратов: учеб. пособие. Уфа: УГНТУ, 2001. 408 с.

8 РД 26.260.004-91. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.// URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=ESU;n=23003> (Дата доступа 04.07.2014).

9 Наумкин Е.А. Методология прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в условиях циклического нагружения, на стадии проектирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / УГНТУ. Уфа, 2011. 48 с.

10 ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: изд-во стандартов, 1984. 28 с.

11 Лейбо А.Н. Справочник механика нефтеперерабатывающего завода: Справочное пособие. М.: Наука, 1963. 840 с.

12 Зайнуллин Р.С., Шарафиев Р.Г. Сертификация нефтегазохимического оборудования по параметрам испытаний. Под ред. Е.В. Морозова. М.: Недра, 1998. 447с.

13 Механика малоциклового разрушения / Махутов Н.А. [и др]. М.: Наука, 1986. 264 с.

14 Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

15 Иванцов О.М., Болотов А.С. О требованиях к вязкости разрушения металла труб для магистральных трубопроводов // Проблемы прочности. 1983. № 5. С. 49-52.

## References

1 Bikbulatov T.R. Otsenka ostatochnogo resursa oborudovaniya i predelnogo sostoyaniya konstruktsionnykh materialov pri ustalostnom nagruzhении po rezultatam elektromagnitnykh izmereniy. Dis. ... kand.tehn.nauk. Ufa: UGNTU, 2011. 100 s. [in Russian].

2 Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Kondrashova O.G. Otsenka adaptivnykh svoystv metalla po izmeneniyu ego magnitnykh harakteristik dlya opredeleniya resursa bezopasnoy ekspluatatsii neftegazovogo oborudovaniya// Neftegazovoe delo: nauch. tehn. zhurn. Ufa, 2006. T.1. №4. S.124-133. [in Russian].

3 Mahutov N.A. Deformatsionnyie kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsii na prochnost. M.: Mashinostroenie, 1981. 272 s. [in Russian].

4 GOST 10705-80. Truby stalnyie elektrosvarnyie. Tehnicheskie usloviya. M.: Standartinform, 1980. 11 s. [in Russian].

5 Sharipkulova A.T. Razrabotka metoda otsenki predelnogo sostoyaniya metalla tehnologicheskikh truboprovodov po elektromagnitnyim parametram: dis. ... kand. tehn. nauk. Ufa: UGNTU, 2009. 110 s. [in Russian].

6 Goritskiy V.M. Diagnostika metallov. M.: Metallurgizdat, 2004. 408 s. [in Russian].

7 Halimov A.G., Zaynullin R.S., Halimov A.A. Tehnicheskaya diagnostika i otsenka resursov apparatov: ucheb. posobie. Ufa: UGNTU, 2001. 408 s. [in Russian].

8 RD 26.260.004-91. Prognozirovanie ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tehnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii.// URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=ESU;n=23003> (Data dostupa 04.07.2014). [in Russian].

9 Naumkin E.A. Metodologiya prognozirovaniya resursa neftegazovogo oborudovaniya, ekspluatiruemogo v usloviyah tsiklicheskogo nagruzheniya, na stadii proektirovaniya: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.02.13 / UGNTU. Ufa, 2011. 48 s. [in Russian].

10 GOST 1497-84. Metallyi. Metodyi ispyitaniy na rastyazhenie. M.: izd-vo standartov, 1984. 28 s. [in Russian].

11 Leybo A.N. Spravochnik mehanika neftepererabatyivayuschego zavoda: Spravochnoe posobie. M.: Nauka, 1963. 840 s. [in Russian].

12 Zaynullin R.S., Sharafiev R.G. Sertifikatsiya neftegazohimicheskogo oborudovaniya po parametram ispyitaniy. Pod red. E.V. Morozova. M.: Nedra, 1998. 447s. [in Russian].

13 Mehanika malotsiklovogo razrusheniya / Mahutov N.A. [i dr]. M.: Nauka, 1986. 264 s. [in Russian].

14 Kogaev V.P. Raschetyi na prochnost pri napryazheniyah, peremennyih vo vremeni. M.: Mashinostroenie, 1977. 232 s. [in Russian].

15 Ivantsov O.M., Bolotov A.S. O trebovaniyah k vyazkosti razrusheniya metalla trub dlya magistralnyih truboprovodov // Problemyi prochnosti. 1983. № 5. S. 49-52. [in Russian].

## **Сведения об авторах**

### **About the authors**

Самигуллин А.В., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.V. Samigullin, Post-graduate Student of the Chair “Technological Machines and Equipment”, FSBEI NPE “Ufa State Oil Technological University”, Ufa, the Russian Federation

e-mail: S\_Alecsei@mail.ru

Наумкин Е.А., д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

E.A. Naumkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI NPE “Ufa State Oil Technological University”, Ufa, the Russian Federation

Кузеев И.Р., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

I.R. Kuzeev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Chair “Technological Machines and Equipment” FSBEI NPE “Ufa State Oil Technological University”, Ufa, the Russian Federation