

УДК 621.539.43.001.24

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.017](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.017)

## Прогнозирование остаточного ресурса материала гибкой насосно-компрессорной трубы на основе кинетической теории усталости

С.П. Ивженко, А.С. Вдовин<sup>✉</sup>, В.В. Печенкин, В.Л. Ракчеев

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Саратов, Российская Федерация  
[3d\\_projects@mail.ru](mailto:3d_projects@mail.ru)<sup>✉</sup>*

**Резюме.** Технологии колтюбинга активно применяются в процессе бурения скважин и производстве внутрискважинных работ. Во время эксплуатации колтюбинговой установки необходимо в режиме реального времени получать оценку остаточного ресурса оборудования установки, в частности, остаточного ресурса гибкой насосно-компрессорной трубы. К основным повреждающим факторам гибкой трубы можно отнести сгибающие нагрузки, действия внутреннего давления, осевые воздействия, воздействия агрессивных сред. Важнейшей задачей прогнозирования состояния гибкой насосно-компрессорной трубы является построение математической модели, позволяющей наиболее точно описать процесс накопления усталостных повреждений в условиях малоцикловых нагрузок. Анализ доступных к изучению литературных источников показал, что в данный момент времени является актуальной задача разработки методов и алгоритмов, позволяющих оценить накопленную усталость материала гибкой насосно-компрессорной трубы на сложной траектории движения, где труба подвергается изгибающим нагрузкам с различной интенсивностью. Решение данной задачи обосновывает разработку математической модели, связывающей расчет поврежденности в области малоцикловых деформаций с учетом накопленных ранее повреждений. Целью настоящей работы является разработка методов и алгоритмов построения прогнозной модели текущего состояния материала гибкой насосно-компрессорной трубы, с учетом накопленных повреждений на основе полуэмпирических моделей в рамках кинетической теории усталости. В исследовании проведен анализ серии опытов с изгибной деформацией образцов гибких труб. На основе методов построения алгоритмов обработки данных малоцикловых испытаний в рамках кинетической теории усталости и математических моделей для оценки остаточного ресурса испытуемого образца в статье предложено решение, позволяющее рассчитать параметр поврежденности образца в случае накопления повреждений на различных участках траектории движения гибкой насосно-компрессорной трубы. Материалы статьи представляют практическую ценность для исследователей, занимающихся проблемами расчета остаточного ресурса гибких труб в условиях их циклического деформирования.

**Ключевые слова:** колтюбинг, малоцикловая усталость, накопление повреждений, циклические напряжения, кинетическая теория механической усталости, эквивалентные напряжения.

**Для цитирования:** Ивженко С.П., Вдовин А.С., Печенкин В.В., Ракчеев В.Л. Прогнозирование остаточного ресурса материала гибкой насосно-компрессорной трубы на основе кинетической теории усталости. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1300> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.017

## Prediction of coiled tubing material residual life based on the kinetic theory of fatigue

S.P. Ivzhenko, A.S. Vdovin✉, V.V. Pechenkin, V.L. Rakcheev

*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation*  
*3d\_projects@mail.ru✉*

**Abstract.** Coiled tubing technologies are actively used in the process of well drilling and well intervention. During the operation of a coiled tubing unit, it is necessary to obtain a real-time assessment of the residual life of the installation equipment, in particular, the residual life of the coiled tubing. The main damaging factors of a flexible pipe include bending loads, internal pressure effects, axial impacts, exposure to aggressive media. The most important task of predicting the state of a coiled tubing is the construction of a mathematical model that allows the most accurate description of the process of fatigue damage accumulation under low-cycle loads. An analysis of the literature sources available for study showed that nowadays it is essential to develop methods and algorithms that enable assessing the knee fatigue of the flexible tubing material on a complex trajectory of movement where the pipe is subjected to bending loads with different intensities. The solution to this problem substantiates the development of a mathematical model that relates the calculation of damage in the area of low-cycle deformations, taking into account damage that has been previously kneeed. The purpose of this research is to develop methods and algorithms for constructing a predictive model of the current state of the coiled tubing material considering the accumulated damage based on semi-empirical models as part of the kinetic theory of fatigue. By means of the methods for constructing algorithms for processing data from low-cycle tests as part of the kinetic theory of fatigue and mathematical models for estimating the residual life of the test sample, the article proposes a solution that helps to calculate the damage parameter of the sample in the event of damage accumulation in various sections of the coiled tubing trajectory. The materials of the article are of practical value for researchers dealing with the problems of calculating the residual life of flexible pipes under the conditions of their cyclic deformation.

**Keywords:** coiled tubing, low-cycle fatigue, damage accumulation, cyclic stresses, kinetic theory of mechanical fatigue, equivalent stresses.

**For citation:** Ivzhenko S.P., Vdovin A.S., Pechenkin V.V., Rakcheev V.L. Prediction of coiled tubing material residual life based on the kinetic theory of fatigue. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1300> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.017 (In Russ.).

### Введение

Для эффективной и безопасной эксплуатации различных механических систем необходима достоверная оценка прочности и остаточного ресурса как всей системы, так и ее отдельных компонентов. В частности, в нефтегазовой отрасли находят свое эффективное применение различные интеллектуальные решения, направленные на минимизацию вероятности поломки оборудования, которая зачастую сопряжена с рисками получения травм обслуживающим персоналом, значительным материальным ущербом и негативными последствиями для экологии. В настоящее время широкое распространение получила технология колтюбинга. Во всем мире возросло не только количество колтюбинговых установок, но и количество видов рабочих операций, выполняемых с помощью данных установок. Основным рабочим и расходным инструментом колтюбинговой установки является гибкая насосно-компрессорная труба (ГНКТ). Эффективность работы колтюбинговой установки во многом зависит от текущего состояния ГНКТ. Без вывода из эксплуатации ГНКТ определить текущее состояние трубы только с помощью датчиков, оценивающих состояние стенок трубы, в настоящее время не представляется возможным. В этой ситуации важной задачей

является построение информационных систем, которые учитывают структуру технических объектов не только в технологических аспектах, но и с точки зрения математических методов декомпозиции и агрегации [1]. В такой информационной системе на основе доминирующих факторов и математических моделей в режиме реального времени должно оцениваться текущее состояние ГНКТ по всей длине. Реализованные в информационной системе математические модели должны в полной мере учитывать всю историю значимых нагрузок и технических аспектов эксплуатации ГНКТ [2, 3]. Одними из самых разрушительных для ГНКТ являются низкоцикловые нагрузки, которые труба испытывает в местах перегибов на барабане и гузнке колтюбинговой установки. Рассмотрим несколько решений, предполагающих построение математических моделей накопления усталостных повреждений во время циклических нагрузок.

Существует несколько решений, предполагающих построение математических моделей накопления усталостных повреждений во время циклических нагрузок. В исследовательской практике существует несколько принципиально различных подходов для получения оценки прочности исследуемого изделия: аналитический метод, численный метод и экспериментальное исследование [4]. Наиболее достоверные и значимые результаты можно получить при комбинированном использовании данных методов. Для расчета долговечности деталей, повреждаемых в условиях малоциклового нагружения, свою актуальность доказали методы, использующие соотношения Мэнсона-Коффина, Басквина-Мэнсона-Коффина и Рэмберга-Осгуда [5, 6, 7]. Результатами исследований подтверждается гипотеза о применимости соотношения Мэнсона-Коффина для получения оценки прочности изделий с необходимой точностью. Но для уточнения теоретических моделей на основе этого соотношения, необходима настройка математического аппарата, использующего достаточно большое количество экспериментальных данных, которые не всегда доступны в нужном объеме.

В рамках теории энергии формоизменения Мизес-Хенки рассматривается критерий максимального напряжения по Мизесу [8]. Предлагаемые математические модели реализованы в расчетах прочности образца методом конечных элементов. Результаты исследования позволяют сделать вывод о перспективности метода расчета прочности ГНКТ на основании теории Мизес-Хенки. Предлагаемые в этой теории математические модели реализованы в расчетах прочности образцов методом конечных элементов. Такой подход подтверждает перспективность метода расчета прочности ГНКТ на основании рассмотренной теории. Еще одним из современных подходов к оцениванию накопления усталостных повреждений в области малоцикловых нагрузок является подход, использующий модель критической плоскости [9, 10, 11]. Опыт эксплуатации различных конструктивных элементов показывает, что в расчетах сложных (многоосных) циклических деформаций для оценки усталостных повреждений необходимо использовать многоосные усталостные критерии. Современные многоосные критерии позволяют оценить усталостные повреждения с учетом ориентации так называемой критической плоскости.

Исследование и анализ работы ГНКТ в вертикальной скважине с учетом критических изгибающих нагрузок позволяет сделать выводы о зависимости критических изгибающих нагрузок и соответствующих им контактных нагрузок от различных условий работы и характеристик ГНКТ [12].

На сегодняшний день одним из широко используемых подходов к решению задачи по прогнозированию долговечности ГНКТ является метод построения математической модели в рамках кинетической теории механической усталости Е. К. Почтенного [13], в которой используется параметр поврежденности материала и реализована нелинейная природа зависимости кривой выносливости материала. Еще

одним достоинством теории механической усталости может являться необходимость нахождения сравнительно небольшого количества экспериментальных точек для построения корректной кривой выносливости. Примером практической реализации данного подхода является серия работ, выполненных под руководством профессора В. Н. Сызранцева [14-16]. Далее предлагается обобщение именно этого подхода на ситуацию с дополнительным количеством участков изгибающих деформаций ГНКТ.

### Материалы и методы

В качестве основы для дальнейшего исследования расчета накопленной поврежденности рассматривается работа [15]. Для вычисления параметра, характеризующего степень поврежденности образца  $D_1$  от числа циклов  $N_1$  для малоцикловых нагрузок, используется следующее выражение:

$$D_1 = E_{01}/(E_{01} + C_0) - D_0, \quad (1)$$

где

$$E_{01} = (\sigma_{a1})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{N_0 - N_1}{P_{01} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$P_{01} = 1 - 10^{(\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_b)/\vartheta^*};$$

$$N_0 = \left( 1 - 10^{\frac{\sigma_{a1} - \bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_0 C_0 \sigma_{a1})];$$

$$A_0 = D_0 / (1 - D_0).$$

Входящие в уравнение (1) величины  $B_0$  и  $C_0$  при известных значениях параметров кривой усталости:  $\bar{\sigma}_b$ ;  $Q_T^*$ ;  $\sigma_R^*$ ;  $\sigma_{RT}^*$ ;  $\vartheta^*$ ;  $D_0$  рассчитываются по зависимостям:

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*}{\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_b};$$

$$C_0 = - \frac{\bar{\sigma}_b}{(\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*)(\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*)}.$$

$\sigma_{a1}$  – напряжение в цикле;

$Q_T^*$  – коэффициент, характеризующий сопротивление образца росту усталостных трещин;

$\bar{\sigma}_b$  – среднее значение предела прочности материала;

$\sigma_R^*$  – предел выносливости детали при коэффициенте асимметрии цикла R;

$\sigma_{RT}^*$  – циклический предел текучести;

$\vartheta^*$  – параметр, характеризующий угол наклона кривой усталости в системе координат  $LgN - \sigma_{a1}$ ;

$D_0$  – величина, характеризующая начальную поврежденность материала образца.

Предложенный в работе [15] метод позволяет рассчитывать накопленную поврежденность ГНКТ на одном изгибающем участке после серии цикловых нагрузок с учетом накопленных повреждений. Однако во время своей эксплуатации ГНКТ испытывает неравномерные по своей длине множественные изгибающие деформации с различной интенсивностью и числом повторений. Таким образом, становится актуальной задача разработки метода подсчета накопленной поврежденности в случаях, когда происходит деформирование ГНКТ с разными цикловыми нагрузками и различным числом повторений циклов на каждом участке изгиба траектории ГНКТ. При этом в вычислении параметра поврежденности D материала выбранного элемента ГНКТ

необходимо учитывать влияние каждого технологического участка (барабан, гузнок, изгибы на траектории трубы), где происходит циклическое деформирование.

Допуская, что для одного цикла нагрузки  $N=1$  зависимость (1) также является корректной, становится возможным оценить итоговую величину накопленных повреждений после каждой серии циклов нагружений, суммируя величины поврежденности на каждом цикле. При этом полагаем, что полученная таким образом кривая зависимости поврежденности от итогового числа циклов нагружения  $N_1 > 1$  не будет качественно отличаться от кривой, сформированной с использованием выражения (1) для того же значения  $N_1$ .

Рассмотрим случай, когда ГНКТ деформируются изгибающими нагрузками на двух участках траектории своего движения (Рисунок 1). Участки изгибов ГНКТ зададим условными барабанами, радиусы которых влияют на напряжение ГНКТ в местах ее перегибов. Условные барабаны в нашем исследовании соответствуют областям изгибающего деформирования ГНКТ на катушке и гузнеку колтюбинговой установки. Кроме того, увеличив число условных барабанов и изменив соответствующие напряжения, возникающие при деформировании ГНКТ, возможно математически описать процесс накопления усталостных повреждений ГНКТ изгибающими нагрузками по всей ее длине внутри скважины. Условимся обозначать движение элементарного участка ГНКТ из точки А в точку В и обратно – глобальным циклом. Движение ГНКТ по каждому из барабанов – субциклом. Подсчитаем степень поврежденности материала, накопленную при совершении движения ГНКТ в глобальном цикле. Определим накопление повреждений  $D_i$  после прохождения каждого барабана (субцикла), исходя из условия постоянства напряжений  $\sigma_{ai}$ .

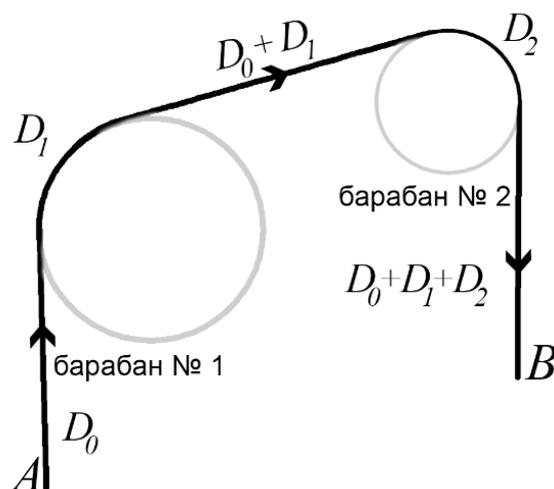


Рисунок 1 – Схема накопления повреждений при движении ГНКТ из точки А в точку В  
Figure 1 – Scheme of damage accumulation during coiled tubing transition from point A to point B

Предполагаем, что элементарный участок ГНКТ совершает путь из точки А в точку В, определим полученную величину поврежденности материала ГНКТ. Напряжение ГНКТ на участке барабана № 1 обозначим  $\sigma_{a1}$ , число циклов на барабане  $N_1 = 1$ , тогда выражение (1) будет иметь вид:

$$D_1 = E_{01}/(E_{01} + C_0) - D_0, \quad (2)$$

где

$$E_{01} = (\sigma_{a1})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{N_{01}-1}{P_{01}Q_T^*B_0} \right] \right\};$$

$$P_{01} = 1 - 10^{(\sigma_{a1}-\bar{\sigma}_b)/\vartheta^*};$$

$$N_{01} = \left( 1 - 10^{\frac{\sigma_{a1}-\bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^*B_0 \ln [1 - \exp(A_{01}C_0\sigma_{a1})];$$

$$B_0 = \frac{\ln \left\{ 1 + \left[ \exp \left( \frac{\bar{\sigma}_b - \sigma_R^*}{\sigma_R^* - \sigma_{RT}^*} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}}{\bar{\sigma}_b};$$

$$A_{01} = D_0 / (1 - D_0).$$

Напряжение ГНКТ на участке барабана № 2 обозначим  $\sigma_{a2}$ . После прохождения участка барабана № 2 определим полученные повреждения ГНКТ с учетом накопленных повреждений на предыдущем участке траектории.

$$D_2 = E_{02} / (E_{02} + C_0) - (D_0 + D_1) = E_{02} / (E_{02} + C_0) - E_{01} / (E_{01} + C_0), \quad (3)$$

где

$$E_{02} = (\sigma_{a2})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{N_{02}-1}{P_{02}Q_T^*B_0} \right] \right\};$$

$$P_{02} = 1 - 10^{(\sigma_{a2}-\bar{\sigma}_b)/\vartheta^*};$$

$$N_{02} = \left( 1 - 10^{\frac{\sigma_{a2}-\bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^*B_0 \ln [1 - \exp(A_{02}C_0\sigma_{a2})];$$

$$A_{02} = (D_0 + D_1) / (1 - (D_0 + D_1)) = E_{01} / C_0.$$

Определим накопленные повреждения при движении элементарного участка ГНКТ в обратном направлении: из точки В в точку А (Рисунок 2).

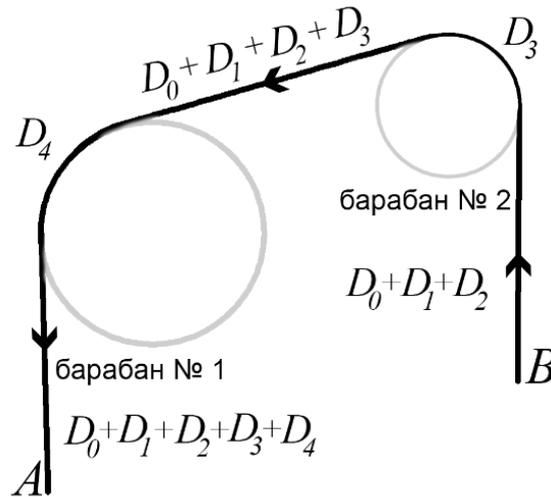


Рисунок 2 – Схема накапливания повреждений при движении ГНКТ из точки В в точку А  
Figure 2 – Scheme of damage accumulation during coiled tubing transition from point B to point A

Определим полученные повреждения ГНКТ при переходе барабана №2 в обратном направлении с учетом накопленных ранее повреждений.

$$D_3 = E_{03} / (E_{03} + C_0) - (D_0 + D_1 + D_2) = E_{03} / (E_{03} + C_0) - E_{02} / (E_{02} + C_0), \quad (4)$$

где

$$E_{03} = (\sigma_{a2})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{N_{03}-1}{P_{02} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$N_{03} = \left( 1 - 10^{\frac{\sigma_{a2}-\bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_{03} C_0 \sigma_{a2})];$$

$$A_{03} = (D_0 + D_1 + D_2) / (1 - (D_0 + D_1 + D_2)) = E_{02} / C_0.$$

Определим полученные повреждения ГНКТ при переходе барабана № 1 в обратном направлении с учетом накопленных ранее повреждений.

$$D_4 = E_{04} / (E_{04} + C_0) - (D_0 + D_1 + D_2 + D_3) = E_{04} / (E_{04} + C_0) - E_{03} / (E_{03} + C_0), \quad (5)$$

где

$$E_{04} = (\sigma_{a1})^{-1} \ln \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{N_{04}-1}{P_{01} Q_T^* B_0} \right] \right\};$$

$$N_{04} = \left( 1 - 10^{\frac{\sigma_{a1}-\bar{\sigma}_b}{\vartheta^*}} \right) Q_T^* B_0 \ln [1 - \exp(A_{04} C_0 \sigma_{a1})];$$

$$A_{04} = (D_0 + D_1 + D_2 + D_3) / (1 - (D_0 + D_1 + D_2 + D_3)) = E_{03} / C_0.$$

Таким образом, при завершении цикла движения ГНКТ по траектории:  $A \rightarrow B \rightarrow A$  накопленные повреждения будут характеризоваться величиной  $D_4$ .

Рассчитаем величину поврежденности материала ГНКТ для  $N$ -го числа циклов на барабане № 1. Для этого перепишем выражение (5) следующим образом:

$$D_4 = \frac{E_{04}}{E_{04} + C_0} - \sum_{i=0}^3 D_i; \quad (6)$$

Перейдем к общему случаю, получив выражение для  $N$  циклов на барабане № 1:

$$D_N = E'_N - \sum_{i=0}^{N-1} D_i, \quad (7)$$

где

$$E'_N = \frac{E_{0N}}{E_{0N} + C_0}.$$

Для вычисления суммарных повреждений  $\sum_{i=0}^N D_i$  в глобальном цикле ( $N=4$ ) используем замену  $E'_i = \frac{E_{0i}}{E_{0i} + C_0}$  и перепишем выражения (2), (3), (4), (5) следующим образом:

$$\left( \begin{array}{l} D_0; \\ D_1 = E'_1 - D_0 \rightarrow D_0 + D_1 = E'_1; \\ D_2 = E'_2 - (D_0 + D_1) \rightarrow D_0 + D_1 + D_2 = E'_2; \\ D_3 = E'_3 - (D_0 + D_1 + D_2) \rightarrow D_0 + D_1 + D_2 + D_3 = E'_3; \\ D_4 = E'_4 - (D_0 + D_1 + D_2 + D_3) \rightarrow D_0 + D_1 + D_2 + D_3 + D_4 = E'_4. \end{array} \right) \quad (8)$$

Просуммировав соответствующие части выражений (8), получим выражение для  $N=4$ :

$$\sum_{i=0}^N D_i = \sum_{i=1}^N E'_i - (-D_0 + ND_0 + (N-1)D_1 + (N-2)D_2 + (N-3)D_3); \quad (9)$$

Преобразуем выражение (9) для произвольного  $N$ :

$$\sum_{i=0}^N D_i = \sum_{i=1}^N E'_i - \sum_{i=1}^N [N - (i-1)] D_{i-1} + D_0; \quad (10)$$

Таким образом, согласно выражению (10), становится возможным использовать суммирование повреждений, полученных на каждом субцикле внутри глобального цикла для определения значения накопленных повреждений ГНКТ.

Произведем сравнение прогнозируемых результатов накопления усталостных повреждений ГНКТ двумя методами: методом, предложенным в работе [15] и методом суммирования усталостных повреждений, предложенным в данной работе. Очевидно, что глобальному циклу, состоящему из двух одинаковых по напряжениям субциклов, можно поставить в соответствие по повреждающему фактору 4 цикла вида: согнуть-разогнуть с таким же напряжением. Составим алгоритм вычисления накопленных усталостных повреждений  $D$  для  $N$  глобальных циклов и  $M$  барабанов согласно предложенным выше выражениям (Рисунок 3).

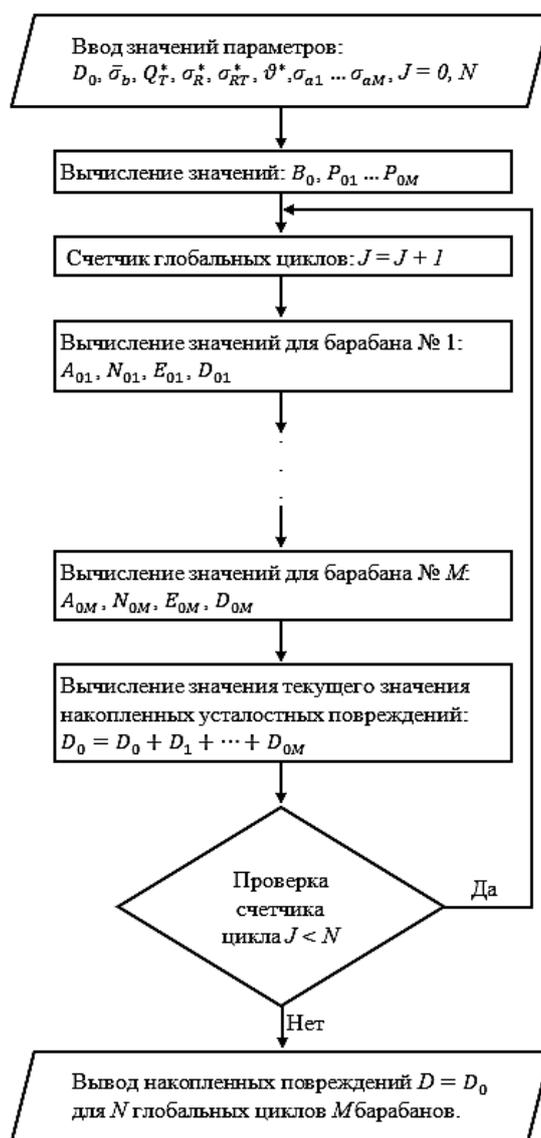


Рисунок 3 – Схема вычисления накопленных усталостных повреждений  $D$  для  $N$  глобальных циклов и  $M$  барабанов

Figure 3 – Scheme for calculating accumulated fatigue damage  $D$  for  $N$  global cycles and  $M$  coils

Выполним расчет с помощью выражений (1) и (10), на основании полученных результатов построим графики для разных значений  $\sigma_{a1}$ :  $\sigma_{a1} = 300$  МПа,  $\sigma_{a1} =$

350 МПа,  $\sigma_{a1} = 400$  МПа. Значения остальных параметров, необходимых для расчетов, возьмем из работы [15]:  $\bar{\sigma}_b = 602,1$  МПа;  $Q_T^* = 1,53 \cdot 10^6$ ;  $\sigma_R^* = 263,621$  МПа;  $\sigma_{RT}^* = 201,914$  МПа;  $\vartheta^* = -121,811$ ;  $D_0 = 6,006 \cdot 10^{-11}$ . Чтобы иметь возможность для выражений (1) и (10) сравнить процесс накопления повреждений за одинаковое число циклов вида «согнуть-разогнуть», в своих расчетах будем полагать, что для метода, предложенного в данной работе, в деформировании образца участвуют два одинаковых барабана, где  $\sigma_{a1} = \sigma_{a2}$ . Зависимость накопленных повреждений  $D$  материала образца ГНКТ от числа циклов нагружения  $N$  представим в виде графиков в двойных логарифмических координатах (Рисунок 4 и Рисунок 5).

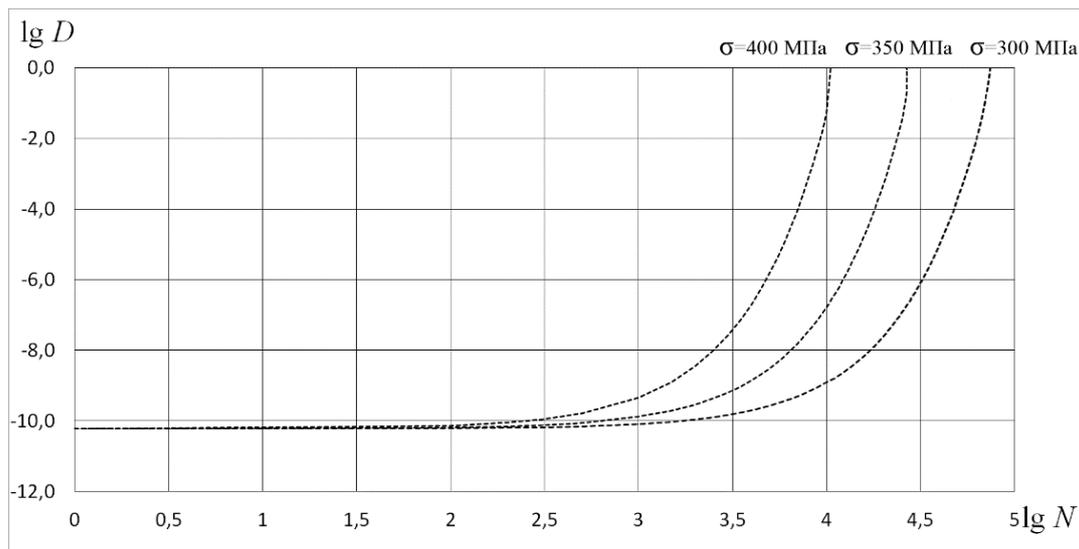


Рисунок 4 – Графики накопленных повреждений материала образца ГНКТ для различных  $\sigma$ , полученные с помощью выражения (1)

Figure 4 – Graphs of accumulated damage to the material of the coiled tubing sample for various  $\sigma$  obtained using expression (1)

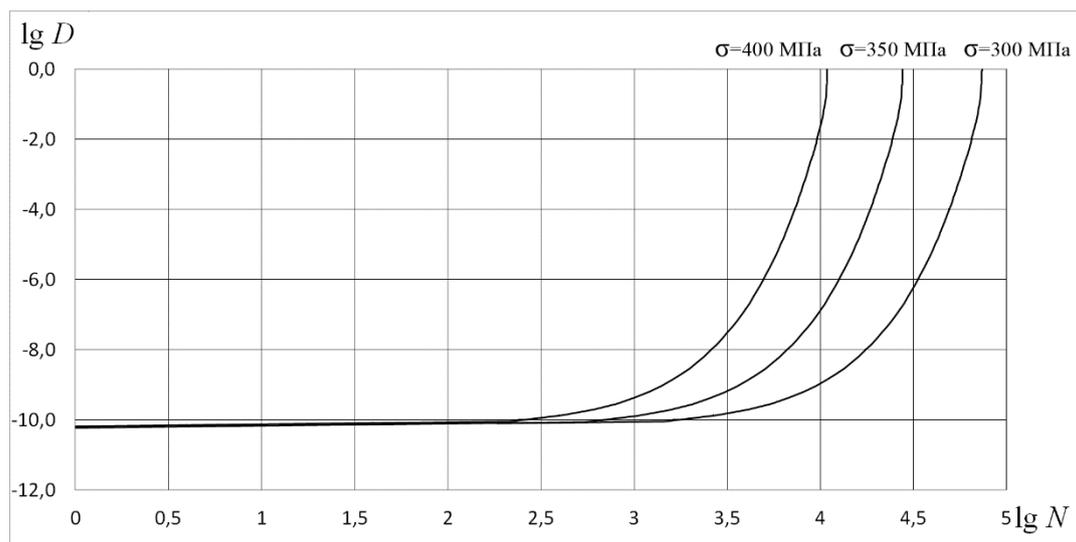


Рисунок 5 – Графики накопленных повреждений материала образца ГНКТ для различных  $\sigma$ , полученные с помощью выражения (10)

Figure 5 – Graphs of accumulated damage to the material of the coiled tubing sample for various  $\sigma$  obtained using expression (10)

## Результаты

Разницу результатов предлагаемого метода относительно исходных соотношений определения повреждений, представленных в работе [15] можно оценить, сравнив величину накопленных повреждений, полученную после  $N$  циклов для одного участка, используя соотношения (1) и величину накопленных повреждений, полученную суммированием «элементарных» повреждений после каждого изгиба, вычисленных с помощью предлагаемого алгоритма.

Результаты вычислительного эксперимента показывают одинаковую природу развития процессов в рассматриваемых моделях. Координаты точек соответствующих графиков (Рисунок 4 и Рисунок 5) имеют близкие значения. Если барабаны будут иметь разные диаметры ( $\sigma_{a1} \neq \sigma_{a2}$ ), то выражение (1) не применимо, поскольку полагает напряжение  $\sigma_{a1}$  постоянным для рассмотренного глобального цикла на протяжении одной серии циклических деформаций. В предлагаемом методе допускаются разные уровни напряжений в каждом изгибном цикле (проход участка трубы с одного барабана на другой) для одной серии циклических деформаций.

Если радиусы изгиба на протяжении всей трубы одинаковые, то можно применить выражение (1) с постоянным  $\sigma_{a1}$  для подсчета накопленных повреждений, тогда количество изгибных циклов соответствует числу участков изгиба. В реальных условиях каждый участок изгиба имеет свой радиус, и ГНКТ испытывает соответственно разные напряжения в каждом изгибном цикле. Таким образом, выражение (1) не применимо, поскольку в каждом цикле параметр поврежденности  $D$  подсчитывается по-разному. Для этого случая находит свое применение предлагаемый в данной статье метод подсчета параметров  $D$  для каждого цикла, и в результате – нахождение по соотношению (10) итоговой поврежденности материала ГНКТ.

## Обсуждение

Адекватность предлагаемой математической модели подтверждается сравнением результатов, полученных с помощью выражений (1) и (10) на графиках (Рисунок 4 и Рисунок 5) в случае  $\sigma_{a1} = \sigma_{a2}$ .

Накопленную поврежденность  $\sum_{i=0}^N D_i$  можно корректировать, например, путем введения поправочного коэффициента  $k(N)$  перед вычисленным значением суммарного повреждения в каждом глобальном цикле. Значения функции  $k(N)$  необходимо определить экспериментальным путем для каждого профиля и материала ГНКТ и провести подстановку:  $\sum_{i=0}^N D_i \Rightarrow k(N)(\sum_{i=1}^N D_i)$ .

Рассмотренный метод вычисления накопленных повреждений материала ГНКТ позволяет найти свое применение в случаях, когда исследуемая ГНКТ при своем движении изгибается на нескольких участках не только на барабане и гузке колтюбинговой установки, но и внутри скважины.

В данной работе рассмотрен вариант полного глобального цикла, т. е. участок ГНКТ проходит последовательно по всем барабанам, затем возвращается в исходную точку перед первым барабаном и процесс повторяется. В дальнейшем планируется, исходя из технологии производимых работ, рассмотреть случаи, когда элемент ГНКТ проходит не одинаковое число раз по каждому из барабанов внутри глобального цикла, для выявления наиболее нагруженного участка трубы.

## Заключение

Проведен анализ различных подходов для оценки усталостного повреждения материала изделия в условиях малоциклового нагружения.

Выбран за основу метод, реализованный в работах под руководством профессора В. Н. Сызранцева в рамках кинетической теории механической усталости Е. К. Почтенного.

Предложена новая модель, позволяющая рассчитать накопленные усталостные повреждения ГНКТ в условиях, повторяющихся с различным напряжением участков ГНКТ по траектории движения.

В связи с тем, что результирующее повреждение является результатом сложения элементарных повреждений, вычисляемых в явном виде, в данной работе за основу принята аддитивная модель накопления повреждений, где имеется возможность ввести корректирующие коэффициенты  $k(N)$ , для уточнения зависимости  $D(N)$ . Такой подход позволяет уточнять найденную кривую зависимости  $Lg D - Lg N$  для реальных случаев.

Подтверждена корректность предлагаемого подхода сравнением результатов вычислительного эксперимента с результатами исследования в работе [15].

Работа представляет интерес с методической точки зрения и требует дополнительных исследований, как теоретических, так и экспериментальных, например, для нахождения функции  $k(N)$ .

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Львович Я.Е., Питолин А.В., Сорокин С.О. Оптимизация проектирования многоаспектной цифровой среды системы однородных объектов на основе процедур декомпозиции и агрегации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(2).
2. Вдовин А.С., Ивженко С.П. Разработка информационной системы прогнозирования состояния оборудования для бурения скважин методом колтюбинга. *Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Сборник научных статей. Материалы XV Международной научно-практической конференции*. 2019:69–75.
3. Вдовин А.С. Разработка методов и алгоритмов прогнозирования состояния оборудования для повышения эффективности системы управления бурением скважин методом колтюбинга. *Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: Материалы XVII Международной научно-практической конференции*. 2021:117–119.
4. Львович Я.Е. О подходах, связанных с оценками прочности объектов. *За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: Сборник научных статей 2-й Всероссийской молодежной научной конференции*. 2021;4:254–257.
5. Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Кочерова Е.Е. Оценка малоциклового усталости на основе использования зависимости Мэнсона-Коффина при отнулевом цикле "мягкого" нагружения. *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2017;16(1):129–136.
6. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Малоцикловая усталость при высоких температурах жаропрочного никелевого сплава, полученного селективным лазерным сплавлением. *Авиационные материалы и технологии*. 2019;(4):65–73.
7. Kima S.-J., Pil H.C., Dewa R.T., Kim W.-G., Kim M.-H. Low cycle fatigue properties of Alloy 617 base metal and weld joint at room temperature. *Procedia Materials Science*. 2014;(3):2201–2206.
8. Григорьев В.В., Зарубина Е.В., Репин Д.С. Разработка модели исследования эксплуатационных характеристик трубопровода. *Трибология и проблемы МЧС*

- России: Сборник материалов международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию образования гражданской обороны. Иваново. 2022:11–14.
9. Cruces A., Lopez-Crespo P., Moreno B., Antunes F. Multiaxial Fatigue Life Prediction on S355 Structural and Offshore Steel Using the SKS Critical Plane Model. *Metals.[Internet]* 2018;8(12):1060. Доступно по: <https://doi.org/10.3390/met8121060> (дата обращения: 20.12.2022).
  10. Liu K.C., Wang J.A. An energy method for predicting fatigue life, crack orientation, and crack growth under multiaxial loading conditions. *Int. J. Fatigue.* 2001;23:129–134. Доступно по: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112301001694> (дата обращения: 21.12.2022).
  11. Branco R., Costa J.D.M., Antunes F.V. Fatigue behaviour and life prediction of lateral notched round bars under bending-torsion loading. *Engineering Fracture Mechanics.* 2014;119(1):66–84.
  12. Хоу Сюэцзунь, Хе Цзя, Сунь Тэньфэй Анализ критических изгибающих и контактных нагрузок, действующих на колтюбинг при работах в вертикальной скважине малого диаметра. *Химия и технология топлив и масел.* 2015;(3):44–50.
  13. Почтенный Е.К. *Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин.* Мн.: Наука и техника; 1983. 246 с.
  14. Сызранцев В.Н., Черная Л.А., Сызранцева К.В. Расчет эквивалентных по повреждающему воздействию напряжений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2013;(10):30–35.
  15. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Определение напряжений и остаточного ресурса по показаниям датчика деформаций интегрального типа переменной чувствительности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2017;328(9):82–93.
  16. Сызранцев В.Н. Обработка данных тарирования датчиков усталости. *Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании: Материалы IX Международной научно-практической конференции-конкурса, Тюмень.* 2022:148–151.

## REFERENCES

1. L'vovich Ja.E., Pitolin A.V., Sorokin S.O. Multi-aspect digital environment design optimization of homogeneous objects based on the procedures of decomposition and aggregation. *Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii = Modeling, optimization and information technology.* 2019;7(2). (In Russ.).
2. Vdovin A.S., Ivzhenko S.P. Development of an information system for predicting the state of equipment for drilling wells using coiled tubing. *Problemy upravlenija v social'no-jekonomicheskikh i tehniceskikh sistemah: Sbornik nauchnyh statej Materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Management problems in socio-economic and technical systems: Collection of scientific articles Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference.* 2019:69–75. (In Russ.).
3. Vdovin A.S. Development of methods and algorithms for predicting the state of equipment to improve the efficiency of the coiled tubing well drilling control system. *Problemy upravlenija v social'no-jekonomicheskikh i tehniceskikh sistemah: Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Management problems in socio-economic and technical systems: Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference.* 2021:117–119. (In Russ.).
4. L'vovich Ja.E. On approaches related to the assessment of the strength of objects. *Za nami budushhee: vzgljad molodyh uchenyh na innovacionnoe razvitie obshhestva: Sbornik*

- nauchnyh statej 2-j Vserossijskoj molodezhnoj nauchnoj konferencii = The future is behind us: a view of young scientists on the innovative development of society: Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian Youth Scientific Conference. 2021;4:254–257. (In Russ.).*
5. Pavlov V.F., Kirpichyov V.A., Kocherova E.E. Evaluation of low cycle fatigue based on the use of Coffin-Manson dependence under zero-to-"soft" loading cycle. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, tehnologii i mashinostroenie = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2017;16(1):129–136. (In Russ.).*
  6. Gorbovets M.A., Hodinev I.A., Ryzhkov P.V., Low-cycle fatigue at high temperatures of heat-resistant nickel-based alloy manufactured by selective laser melting. *Aviacionnye materialy i tehnologii = Aviation materials and technologies. 2019;(4):65–73. (In Russ.).*
  7. Kima S.-J., Pil H.C., Dewa R.T., Kim W.-G., Kim M.-H. Low cycle fatigue properties of Alloy 617 base metal and weld joint at room temperature. *Procedia Materials Science. 2014;(3):2201–2206.*
  8. Grigoriev V.V., Zarubina E.V., Repin D.S. Development of a pipeline performance research model. *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj 90-letiju obrazovanija grazhdanskoj oborony. Ivanovo. = Collection of materials of the international scientific-practical conference dedicated to the 90th anniversary of the formation of civil defense. Ivanovo. 2022:11–14. (In Russ.).*
  9. Cruces A., Lopez-Crespo P., Moreno B., Antunes F. Multiaxial Fatigue Life Prediction on S355 Structural and Offshore Steel Using the SKS Critical Plane Model. *Metals. [Internet] 2018;8(12):1060. Available from: <https://doi.org/10.3390/met8121060> (accessed on 20.12.2022).*
  10. Liu K.C., Wang J.A. An energy method for predicting fatigue life, crack orientation, and crack growth under multiaxial loading conditions. *Int. J. Fatigue. 2001;23:129–134. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142112301001694> (accessed on 21.12.2022).*
  11. Branco R., Costa J.D.M., Antunes F.V. Fatigue behaviour and life prediction of lateral notched round bars under bending-torsion loading. *Engineering Fracture Mechanics. 2014;119(1):66–84.*
  12. Hou Xuejun, He Jia, Sun Tenfei Analysis of Critical Buckling and Contact Loads on Coiled Tubing String in Vertical Microhole. *Himija i tehnologija topliv i masel = Chemistry and technology of fuels and oils. 2015;(3):44–50. (In Russ.).*
  13. Pochtennyj E.K. *Life prediction and fatigue diagnostics of machine parts.* Mn.: Science and technology; 1983. 246 p. (In Russ.).
  14. Syzrantsev V.N., Chernaya L.A., Syzrantseva K.V. The calculation of equivalent fatigue stresses. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2013;(10):30–35. (In Russ.).*
  15. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V. Determination of stresses and residual life in accordance with indications of variable-sensitivity integral strain gauge. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2017;328(9):82–93. (In Russ.).*
  16. Syzrantsev V.N. Data processing for calibration of fatigue sensors. *Novye informacionnye tehnologii v neftegazovoj otrasli i obrazovanii: Materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii-konkursa = New Information Technologies in the Oil and Gas Industry and Education: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference-Competition. 2022:148–151. (In Russ.).*

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ивженко Сергей Петрович**, кандидат физико-математических наук, кафедра информационно-коммуникативных систем и программной инженерии, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

*e-mail:* [sarvizir@mail.ru](mailto:sarvizir@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-9531-5536](https://orcid.org/0000-0002-9531-5536)

**Sergey Petrovich Ivzhenko**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Information and Communication Systems and Software Engineering Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation.

**Вдовин Александр Сергеевич**, аспирант, кафедра прикладных информационных технологий, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

*e-mail:* [3d\\_projects@mail.ru](mailto:3d_projects@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-3015-6116](https://orcid.org/0000-0002-3015-6116)

**Aleksandr Sergeevich Vdovin**, Postgraduate Student, Applied Information Technologies Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation.

**Печенкин Виталий Владимирович**, кандидат физико-математических наук, кафедра прикладных информационных технологий, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

*e-mail:* [pechenkinvv@mail.ru](mailto:pechenkinvv@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-5043-1891](https://orcid.org/0000-0002-5043-1891)

**Vitaly Vladimirovich Pechenkin**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Applied Information Technologies Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation.

**Ракчев Виктор Леонидович**, аспирант, кафедра прикладных информационных технологий, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация.

*e-mail:* [v.rakcheev@fj-volga.com](mailto:v.rakcheev@fj-volga.com)

ORCID: [0000-0003-1731-2775](https://orcid.org/0000-0003-1731-2775)

**Viktor Leonidovich Rakcheev**, Postgraduate Student, Applied Information Technologies Department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 29.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 03.03.2023.*

*The article was submitted 29.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 03.03.2023.*