

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОЛОННЫ ГИБКИХ ТРУБ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАБОРАТОРНЫХ И СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

В.Б. Порошин¹, В.Б. Буксбаум², П.С. Дружинин³

Предлагается методика прогнозирования долговечности колонны гибких труб, которая, в отличие от известных, способна отразить полную историю неупругого деформирования и накопления повреждения конкретным объектом, необходимую для его мониторинга. Методика опирается на систему лабораторных и стендовых механических испытаний. Также ее элементами являются разработанные в пакете ANSYS Mechanical специализированные программные модули для расчета кинетики неупругого деформирования фрагмента гибкой трубы в стендовых испытаниях и участка гибкой трубы при выполнении типовой спуско-подъемной операции.

Ключевые слова: колтюбинг; длинномерная гибкая труба; прогноз долговечности; циклические характеристики прочности и пластичности; накопление повреждения; лабораторные и стендовые испытания; расчет кинетики неупругого деформирования и накопления повреждения трубчатого образца и колонны гибких труб в среде ANSYS Mechanical.

Технология колтюбинга (*coiled tubing*) с использованием длинномерных гибких труб все шире применяется как в процессе бурения скважин, так и при проведении геофизических исследований, ремонтных и других работ. Возможные аварии в ходе таких операций сопряжены с серьезными экономическими и материальными потерями. В этих условиях как для изготовителя колтюбинга, так и для его потребителя немаловажным является вопрос – с какой вероятностью может быть дана оценка долговечности конкретного изделия.

В течение одного типового технологического цикла (спускоподъемной операции – СПО – по терминологии эксплуатирующих организаций) отдельные области трубы несколько раз подвергаются неупругому знакопеременному деформированию: во время спуска – при размотке трубы с барабана, изгибе на направляющей дуге, выпрямлении в инжекторе и далее при погружении в скважину и подаче давления; во время подъема – при прохождении через направляющую, выпрямлении после направляющей и, наконец, при намотке на барабан. При этом в опасном сечении трубы реализуется как «жесткое» (ограниченное по деформации), так и «мягкое» (ограниченное по напряжению) нагружение, которое может сопровождаться односторонним накоплением деформации. Характер изменения деформации в одной из точек такого сечения для одного технологического цикла показан на рис. 1. Отметим, что при эксплуатации одного и того же бунта гибкой трубы на одной подвижной колтюбинговой установке, обслуживающей несколько скважин, могут изменяться как длина размотки трубы, так и давление продувки, таким образом, в общем случае нагружение объекта носит нестационарный характер. В этих условиях наиболее вероятным предельным состоянием конструкции

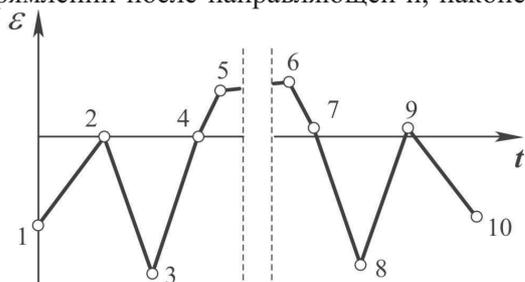


Рис. 1. Схема деформирования материала в опасной точке опасного сечения трубы в типичном технологическом цикле (СПО): 1-2 – размотка с барабана; 2-3 – изгиб на направляющей; 3-4 – выпрямление после схода с направляющей; 4-5 – приложение эксплуатационных нагрузок; 5-6 – технологический процесс; 6-7 – снятие нагрузок; 7-8 – изгиб на направляющей; 8-9 – выпрямление после направляющей; 9-10 – намотка на барабан

трубы реализуется как «жесткое» (ограниченное по деформации), так и «мягкое» (ограниченное по напряжению) нагружение, которое может сопровождаться односторонним накоплением деформации. Характер изменения деформации в одной из точек такого сечения для одного технологического цикла показан на рис. 1. Отметим, что при эксплуатации одного и того же бунта гибкой трубы на одной подвижной колтюбинговой установке, обслуживающей несколько скважин, могут изменяться как длина размотки трубы, так и давление продувки, таким образом, в общем случае нагружение объекта носит нестационарный характер. В этих условиях наиболее вероятным предельным состоянием конструкции

¹ Порошин Вадим Борисович – кандидат технических наук, доцент, кафедра прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет.

E-mail: poroshin2816@mail.ru

² Буксбаум Виктор Борисович – кандидат технических наук, начальник технического отдела, ОАО «Уралтрубмаш», г. Челябинск.

E-mail: vbuksbaum@utbm.ru

³ Дружинин Павел Сергеевич – инженер отдела технической поддержки по направлению «Динамика и прочность машин», ГК Делкам-Урал, г. Екатеринбург.

E-mail: kriegler44@yandex.ru

является образование трещин малоциклового усталости (МЦУ), приводящих к разгерметизации трубы, и, в итоге, к ее разделению на части.

Анализ доступных литературных источников показал, что в этой области практика, к сожалению, значительно обгоняет теорию, так как не существует не только соответствующих отраслевых нормативных документов, но и единой методики оценки остаточного ресурса и долговечности колонны гибких труб (КГТ). Отечественные разработки (ведущиеся, в частности, в Тюменском нефтегазовом государственном университете) отличаются недостаточной, на наш взгляд, адекватностью используемых математических моделей деформационных и прочностных свойств металлических материалов в условиях повторно-переменного нагружения. Коммерческие программные комплексы (как правило, зарубежные – *CTLIFE*, *FACT*, *CERBERUS* и другие), хоть и обещают решение многих проблем, носят закрытый характер, поэтому анализ используемых в них подходов затруднителен. В показанном на рис. 2 примере (окно *Inputs* модуля *Achilles*) свойства материала определяются маркой стали, механические характеристики которой «защиты» в соответствующей базе данных пакета. Следовательно, если нужная марка стали, скажем, отечественного производства, в библиотеке отсутствует, такой пакет оказывается бесполезен.

К тому же в большинстве известных нам зарубежных программных продуктов в качестве

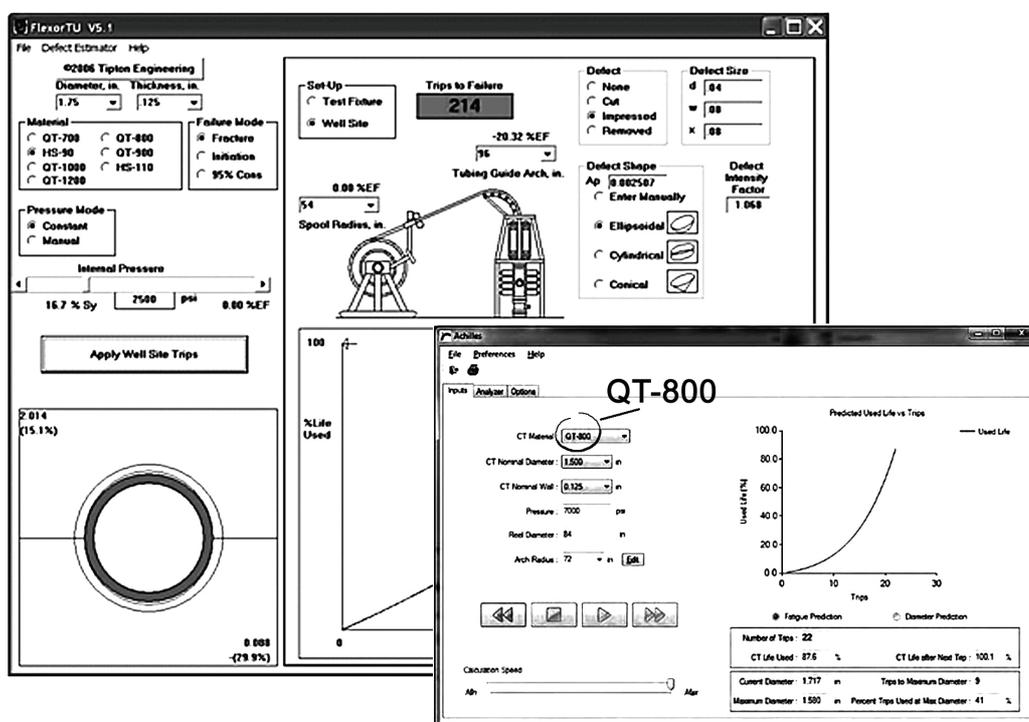


Рис. 2. Окна задания исходных данных в одном из зарубежных программных комплексов

механических характеристик материала используются показатели прочности и пластичности, отвечающие *монотонному однократному* статическому нагружению, а сопротивление малоциклового усталости описывается уравнениями типа Мэнсона–Лэнджера вида

$$\varepsilon_a = \frac{A\bar{\sigma}_f}{E} (N)^{-\alpha} + B\bar{\varepsilon}_f (N)^{-\beta},$$

где A , B , α , β – постоянные материала (или группы материалов); ε_a – амплитуда полной деформации; N – число циклов до разрушения; $\bar{\sigma}_f$ – истинное сопротивление разрыву; $\bar{\varepsilon}_f$ – ресурс пластичности материала. Последние характеристики также соответствуют однократному нагружению, поэтому подобные соотношения носят весьма приближенный характер.

Исходя из сказанного актуальным становится разработка методики прогнозирования долговечности колонны гибких труб, способной, в отличие от известных, отразить полную историю неупругого деформирования объекта, в том числе, работу при различных величинах давления, длинах размотки плети, а также перенос колтюбинга с одной установки на другую и со скважины на скважину. Столь высокий ее потенциал обеспечивает использование математических моделей

деформационных и прочностных свойств [1, 2] инкрементального типа. Такой подход позволяет производить расчет кинетики неупругого деформирования и накопления повреждения с учетом особенностей деформационных и прочностных свойств материала, проявляемых при повторно-переменном нагружении, а также их естественного разброса.

Методика опирается на систему механических испытаний, предусматривающую:

- экспериментальные исследования стандартных плоских образцов, вырезанных из поступающего на завод листового проката, по результатам которых определяют деформационные и прочностные характеристики стали в условиях однократного и циклического знакопеременного нагружения;
- и стендовые испытания (с использованием установки ОАО «Уралтрубмаш») натуральных образцов, вырезанных из длинномерной трубы, под давлением и без него, по данным которых производится коррекция свойств с тем, чтобы учесть влияние геометрии и технологии производства реального объекта.

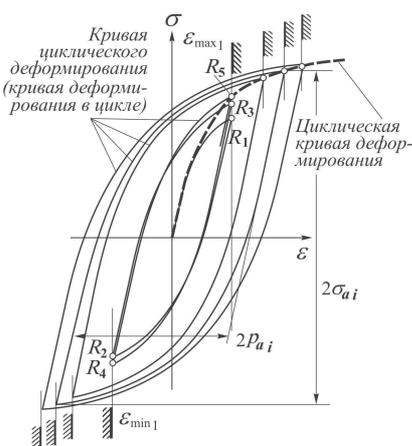


Рис. 3. Схема построения циклической кривой с помощью петель гистерезиса в стабильных циклах



Рис. 4. Сопоставление кривой циклического деформирования, циклической и статической кривых стали А606-4

Деформационные характеристики, в частности, кривую циклического деформирования (кривую деформирования в цикле), а также циклическую кривую получали в ходе лабораторных испытаний плоских образцов по программе блочно-го нагружения с увеличивающимся от блока к блоку размахом деформации. В каждом блоке испытания велись в режиме жесткого симметричного по деформациям нагружения до стабилизации процесса деформирования. На рис. 3 показаны схемы соответствующих петель неупругого гистерезиса, характерные для циклически стабилизирующегося в сторону упрочнения материала. На них отмечены кривые циклического деформирования, представляющие траекторию движения точки состояния в пространстве «напряжение ~ деформация», и циклическая кривая, которая, как видно, строится по вершинам петель гистерезиса стабильных циклов.

В результате испытаний до разрушения (образования макротрещины) таких же образцов в жестком цикле при ряде значений размаха деформации определяли характеристики модели повреждаемости, необходимые для расчета долговечности.

В соответствии с этим обработаны результаты опытов на образцах из стали А606-4 и получены требуемые механические характеристики. На рис. 4 приведено сопоставление кривой циклического деформирования, циклической кривой и кривой, отвечающей однократному нагружению (статической кривой) для этой стали. Что касается циклической кривой, то в данных условиях она отражает изотропное упрочнение материала в процессе циклического деформирования. Ее вид зависит от материала (т.е. химсостава), начального состояния объекта

(термообработки, наклепа, наличия остаточных напряжений и т.п.), коэффициента асимметрии цикла и, как видно на графике, от амплитуды пластической деформации. Наибольшее отличие, особенно при значительных величинах пластической деформации, наблюдается между статической кривой и диаграммой циклического деформирования. Таким образом, распространенная в расчетах практика – использование характеристик материала, снятых со статической диаграммы – может привести к существенным погрешностям. В условиях «мягкого» нагружения – к ошибке «в запас» по неупругой деформации, что может повлечь неоправданно заниженную оценку долговечности и снятие с эксплуатации вполне работоспособного изделия. При «жестком» нагружении – к ошибке «не в запас» по действующим напряжениям.

Второй составляющей системы механических испытаний является комплекс стендовых ресурсных испытаний натуральных образцов, вырезанных из длинномерной трубы, в условиях знако-

переменного изгиба. С этой целью на предприятии «Уралтрубмаш» спроектирован и изготовлен специальный стенд [3]. Нагружение образца носит кинематический характер и осуществляется синхронным движением круговых секторов, жесткость которых значительно превосходит жесткость испытуемого объекта. Условия закрепления образца соответствуют с одной стороны жесткой, с другой – скользящей заделкам. Испытания могут проводиться как под давлением, так и без него. К сожалению, в ходе подобных опытов фиксируются лишь величина давления и число циклов до разрушения, но этих данных недостаточно для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния образца.

В связи с этим для расчета процесса деформирования трубчатого образца на стенде в пакете *ANSYS Mechanical* разработан соответствующий программный модуль. В результате анализа моделей материала из библиотеки *ANSYS* применительно к рассматриваемым условиям была выбрана модель Бесселинга с мультилинейным кинематическим упрочнением. Конечно-элементной моделью системы «образец–стенд» воспроизводятся радиусы кривизны оправок испытательной установки, предусмотрена возможность задания внутреннего давления, закрепление модели соответствует указанным ранее граничным условиям. Нагружение образца осуществляется синхронным возвратно-вращательным движением оправок.

Результаты расчета кинетики неупругого деформирования материала в опасной точке трубчатого образца диаметром 38,1 и толщиной стенки 3 мм под давлением 22 МПа представлены в виде петли гистерезиса на рис. 5. На ее основе с привлечением характеристик малоциклового усталости, полученных при испытании плоских образцов, подсчитано число циклов до разрушения (образования макротрещины).

Вместе с тем в результате систематизации и статистической обработки данных стендовых испытаний натурных образцов получены параметры нормального закона распределения долговечности. Сравнение матожидания и расчетного числа циклов до разрушения указывает на необходимость корректировки изначальных параметров кривой МЦУ (рис. 6). Тем самым предполагается исключить систематические ошибки, связанные с погрешностью определения деформационных и прочностных свойств материала по результатам лабораторных испытаний вырезанных из листового проката образцов, для которых учет геометрии трубы и технологии производства затруднителен. Там же показана схема поверхности, отражающая изменение распределения плотности вероятности долговечности с ростом внутреннего давления p для определенного типоразмера трубчатого образца, и одно из ее сечений.

В качестве примера применения методики проанализирована работа колтюбинга на установке с заданными конструктивными параметрами в типичном эксплуатационном цикле (СПО). Для расчета кинетики деформирования гибкой трубы в пакете *ANSYS Mechanical* была разработана соответствующая программа. Разбиение на конечные элементы фрагмента трубы выполнено с помощью объемных элементов типа *SOLID 186*. Изгиб и распрямление объекта в различные моменты времени имитировали путем задания сечениям трубы соответствующих углов поворота. Программа изменения угла поворота в течение одной СПО представлена на схеме (рис. 7).

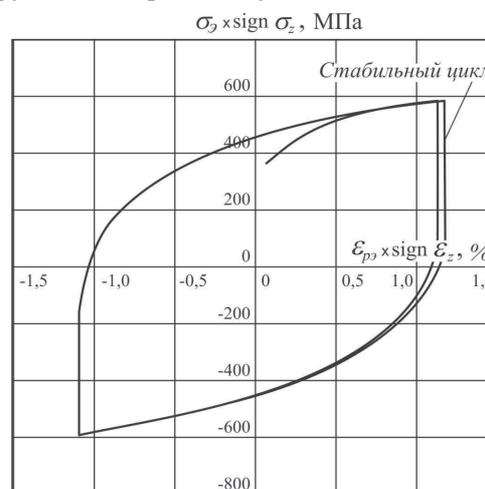


Рис. 5. Диаграмма циклического деформирования стали А606-4 в опасной точке трубчатого образца размером 38,1×3,0 мм под давлением 22 МПа в условиях стендовых испытаний

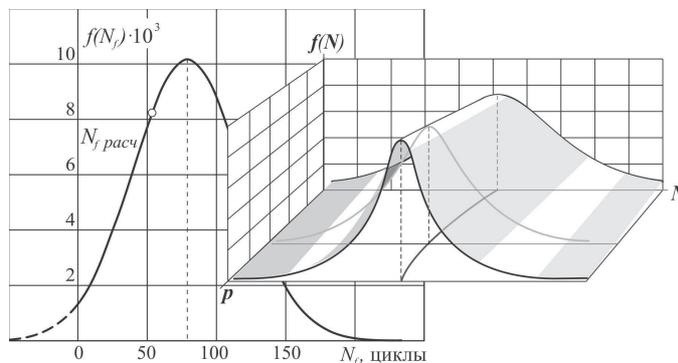


Рис. 6. Схема поверхности, описывающей распределения плотности вероятности долговечности, и сопоставление расчетного значения числа циклов до разрушения с одним из ее сечений (образец – 38,1×3,0 мм; давление 22 МПа)

Там же показана полученная расчетом кинетики диаграмма деформирования в представительной точке элемента трубы. Буквенными индексами отмечены участки кривой, отвечающие тем или иным этапам программы изменения угла. На этой основе рассчитано изменение усталостного и квазистатического повреждений в течение одной СПО, а затем, в предположении повторения данного цикла вплоть до исчерпания ресурса, с использованием гипотезы линейного суммирования повреждений определена долговечность гибкой трубы. Подсчет усталостного повреждения с помощью кинетической модели повреждаемости [2] в данных условиях близок к соответствующей процедуре метода «дождевого потока» (*rainflow counting*), рекомендованного *ASTM* в качестве метода схематизации программ нагружения с переменной амплитудой напряжения для подсчета повреждения, вносимого каждым циклом, и последующей оценке долговечности [4]. Квазистатическое повреждение определяется вполне традиционно: отношением односторонне накопленной деформации к ресурсу пластичности материала с учетом вида напряженного состояния.

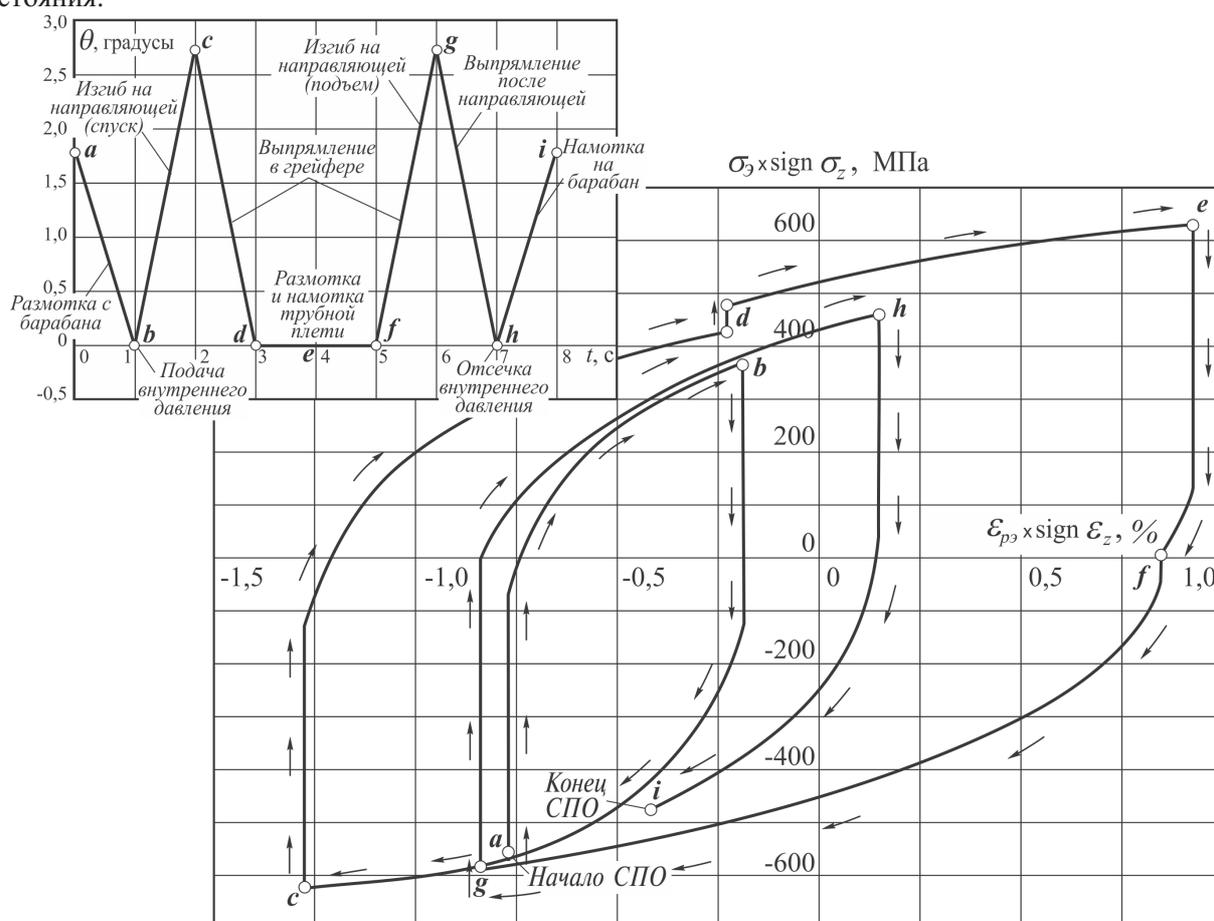


Рис. 7. Диаграмма циклического деформирования в опасной точке фрагмента трубы из стали А606-4 в типичном эксплуатационном цикле (диаметр барабана – 3,6 м, радиус кривизны направляющей – 1,2 м, длина трубной плети в скважине – 4000 м, давление 22 МПа)

Таким образом, показано, что предлагаемая расчетно-экспериментальная методика прогнозирования долговечности колонны гибких труб отражает индивидуальную историю неупругого деформирования и накопления повреждения конкретным объектом. Такой подход позволяет учесть особенности работы колтбунга при различных величинах давления, длинах размотки плети и его эксплуатации на разных мобильных базах и скважинах, что совершенно необходимо для адекватного мониторинга объекта.

Литература

1. Гохфельд, Д.А. Пластичность и ползучесть элементов конструкций при повторных нагружениях / Д.А. Гохфельд, О.С. Садаков. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.

2. Gokhfel'd, D.A. Plasticity and Creep, LCF and Crack Propagation Processes: Related State Equation / D.A. Gokhfel'd, V.B. Poroshin, O.S. Sadakov // SMiRT 11 Transactions. – Tokyo, Japan, August 1991. – Vol. L. – P. 283–288.

3. К оценке долговечности длинномерных гибких труб / А.В. Брылкин, В.Б. Буксбаум, К.И. Колесников и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2012. – Вып. 7. – № 34(293). – С. 75–80.

4. E 1049-85. (Reapproved 2005). Standard practices for cycle counting in fatigue analysis. ASTM International.

Поступила в редакцию 9 июня 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2014, vol. 6, no. 3, pp. 72–77

TECHNIQUE FOR FORECASTING THE OPERATING LIFE OF COIL TUBING ON THE BASIS OF LABORATORY AND BENCH TESTS

V.B. Poroshin¹, V.B. Buksbaum², P.S. Druzhinin³

A technique for forecasting the operating life of coil tubing, as opposed to the known methods can reflect a full history of inelastic deformation and accumulation of the damage by a specified object is proposed in the paper. This technique is based on laboratory and bench mechanical tests. Also, authors rely on special software modules developed in the ANSYS Mechanical package for the calculation of kinetics of inelastic deformation of a coil tubing fragment in bench tests and a section of coil tubing when a standard operating procedure is carried out.

Keywords: coil tubing; coil tubing unit; operating life forecasting; cyclic strength and plasticity characteristics; damage accumulation; laboratory and bench tests; calculation of kinetics of inelastic deformation and damage accumulation of tubular model and coil tubing in the system of ANSYS Mechanical.

References

1. Gokhfel'd D.A., Sadakov O.S. *Plastichnost' i polzuchest' ehlementov konstrukcij pri povtornykh nagruzenijakh* (Plasticity and creep of the structural components under repeated loading). Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 256 p. (in Russ.).

2. Gokhfel'd D.A., Poroshin V.B., Sadakov O.S. Plasticity and Creep, LCF and Crack Propagation Processes: Related State Equation. *SMiRT 11 Transactions*. Tokyo, Japan, August 1991. Vol. L. pp. 283–288.

3. Brylkin A.V., Buksbaum V.B., Kolesnikov K.I., Poroshin V.B., Usova M.V. K otsenke dolgochnosti dlinnomernykh gibkikh trub (Estimation of long Coiled Tubing Durability). *Vestnik YuUrGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Fizika»*. 2012. Issue 7. no. 34(293). pp. 75–80. (in Russ.).

4. E 1049-85. (Reapproved 2005). *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis*. ASTM International.

Received 9 June 2014

¹ Poroshin Vadim Borisovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Applied Mechanics, Dynamics and Strength of Machines Department, South Ural State University.

E-mail: poroshin2816@mail.ru

² Buksbaum Victor Borisovich is Cand. Sc. (Engineering), Chief of Technical Department of JSC "Uraltrubmash", Chelyabinsk.

E-mail: vbuksbaum@utbm.ru

³ Druzhinin Pavel Sergeevich is Engineer, Technical Support Department (Dynamics and Strength of Machines), Delcam-Ural, LLC, Ekaterinburg.

E-mail: kriegler44@yandex.ru