

# Высокотехнологичный стенд для испытания гибких труб

## High-End Testing Frame for Coiled Tubings

Нельсон ПЕРОЗО, Карлос ПАЗ, Хавьер ХОЛЬЦМАН, Йоахим ОППЕЛТ, Институт технологий нефтегазодобычи, Клаустальский технический университет

Nelson PEROZO, Carlos PAZ, Javier HOLZMANN, Joachim OPPELT, ITE – Clausthal University of Technology

### АННОТАЦИЯ

Трубная продукция используется при большинстве работ, относящихся к нефтегазовой индустрии. Надежность любой операции может быть улучшена путем прогнозирования жизненного цикла трубных изделий. Это также позволит снизить непродуктивное время и избежать дополнительных расходов.

Благодаря разработке новых материалов и совершенствованию колтюбинговых технологий эти трубные изделия в последнее время начали использоваться для более сложных операций, включая бурение. Поскольку для прогнозирования требуется очень точное воспроизведение реальных нагрузок на гибкие трубы (ГТ), возникающих в процессе их использования, был спроектирован и построен уникальный стенд для воспроизведения всевозможных процессов, которые способствуют выходу из строя колтюбинга.

К основным нагрузкам на ГТ можно отнести сгибающие нагрузки, действие внутреннего давления и осевые/растягивающие воздействия. В отличие от других трубных изделий, используемых в нефтегазовой индустрии, ГТ подвергаются пластической деформации из-за регулярных циклов изгиба, которые обусловлены прохождением колтюбинга через вертлюг и наматыванием на барабан. Внутреннее давление вкупе с меняющимися сгибающими нагрузками приводит к оваллизации ГТ (потере первоначального круглого состояния). Овальность труб сильно влияет на способность колтюбинга сопротивляться действию внутреннего или внешнего давления. Поскольку ГТ представляют собой неразрывную колонну длиной до нескольких тысяч метров, очень частым явлением, свойственным колтюбингу, является его удлинение из-за осевых нагрузок, обусловленных воздействием собственного веса при нахождении в вертикальной части скважины. Важно принять во внимание трение о стенки ствола скважины, которое присутствует при спуске ГТ. Трение может быть представлено как индуцированный крутящий момент. Идея использования колтюбинга для бурения делает необходимым точное изучение скручивающих нагрузок на гибкие трубы. Последние обусловлены

### ABSTRACT

Tubulars are involved in most of the activities related to the oil and gas industry. The reliability of any operation can be enhanced by predicting the lifetime of these tubulars and thus avoiding non-productive time and excessive costs.

Thanks to the development of new materials and improvements of the coiled tubing technology with the years, these tubulars have been lately used in more challenging operations, such as drilling. With the need of accurately replicate the actual service loads acting on coiled tubings during its operation in the field, a unique testing facility was designed and built to replicate all the different processes promoting the failure of these kind of pipes.

The main loads acting on coiled tubings are the bending, internal pressure and axial load. Unlike the rest of the tubulars used in the oil and gas industry, coiled tubings work under plastic deformation because of the bending cycles encountered while passing through the reel and gooseneck. The internal pressure, altogether with the alternating bending loads are responsible for the ovality of the pipe, an effect representing the loss of roundness in the coiled tubing. The ovality strongly affects the capacity of the tubing to resist the presence of internal or external pressures. Since the coiled tubing is one piece of pipe which can measure even thousands of meters, it is very common for this tubular to suffer elongation because of the high axial tension load represented by its own buoyed weight when it hangs in the vertical section of a well. Finally, it is important to take into account the friction with the walls of the wellbore as the tubing is deployed. This friction can be represented as an induced torque in the pipe. The idea of using the coiled tubing for drilling applications makes necessary the accurate study of torsion loads in coiled tubings, effect taking place due to the induced torque in the string coming from the drill bit.

The new test facility is able to replicate all these possible loads either separately or at the same time by means of hydraulic cylinders acting directly on the test sample. The results of the first tests applied on coiled tubings are shown and compared with other available results. All these first tests were run with high internal pressure in order to simulate the loads acting in high pressure wells.

индуцированным крутящим моментом, исходящим от бурового долота.

Новый стенд для испытаний способен воспроизводить все возможные нагрузки, действующие на гибкую трубу, как по отдельности, так и одновременно при помощи гидравлических цилиндров, воздействующих непосредственно на тестовый образец. В статье показаны результаты первых тестов, проведенных на колтюбинге, а также произведено сравнение этих результатов с другими доступными данными. Все тесты проведены под действием высокого внутреннего давления для того, чтобы симулировать условия высоконапорных скважин.

## ВВЕДЕНИЕ

Руководствуясь идеей снижения расходов путем проведения тестов трубных изделий в лабораторных условиях, мы пришли к выводу о необходимости проектирования и создания нового стенда для испытаний, который смог бы воспроизводить различные нагрузки, действующие на колтюбинг. Путем проведения испытаний в лабораторных условиях, где такие нагрузки можно легко контролировать, можно достичь экономии во времени, трубных материалах, рабочем времени и усилиях, потраченных на обеспечение безопасности.

С начала испытаний гибких труб около 25 лет назад все стенды, которые создавались, могли воспроизводить только циклические изгибающие нагрузки при воздействии внутреннего давления и лишь в некоторых случаях также и осевые нагрузки.

Использование колтюбингового бурения в последние годы становится все более распространенным благодаря развитию новых трубных материалов и технологий, которые делают возможными такие сложные работы. А в некоторых регионах, таких как Аляска, Канада и Ближний Восток, колтюбинговое бурение уже стало стандартной операцией.

В данном контексте рассмотрение нагрузок на гибкие трубы при их использовании в процессе буровых работ обрело новую степень важности. Неизбежное присутствие крутящего момента, исходящего от долота, при проведении буровых работ негативно влияет на общее сопротивление колтюбинга нагрузкам и, как следствие, снижает усталостную долговечность гибких труб.

В данной работе представлен новый лабораторный стенд, который способен воспроизводить нагрузки, требующиеся для точного моделирования процесса бурения, который, как правило, подвергает гибкую трубу предельным нагрузкам. Новый сценарий нагрузочных испытаний делает неактуальными существующие математические модели, ▶

## INTRODUCTION

With the original idea of reducing costs by testing tubulars in labs it was found necessary to design and build a new test frame, where the different loads acting on the coiled tubing are replicated. Savings in time, pipe material, man power and safety procedures can be achieved when testing in labs where the loads can be easily controlled.

Since the beginning of coiled tubing testing about 25 years ago, all test facilities built only consider the application of the cyclic bending load while the pipe is internally pressurized, and in few cases, it was found possible the application of axial loads.

The implementation of coiled tubing drilling has been continuously growing in the last years thanks to the development of new materials and technologies which make this high demanding operation possible, and even standard in different places worldwide, such like Alaska, Canada and in the middle east.

It has become really important to consider the loads

Использование колтюбингового бурения в последние годы становится все более распространенным благодаря развитию новых трубных материалов и технологий, которые делают возможными такие сложные работы.

The implementation of coiled tubing drilling has been continuously growing in the last years thanks to the development of new materials and technologies which make this high demanding operation possible.

acting on coiled tubings when they are used in drilling applications. The presence of torque is imminent in this kind of operations, load that negatively affects the combined load resistance of the coiled tubing, and hence, the fatigue lifetime of the tubular.

In this paper a new test facility is

presented which is able to replicate the loads necessary to accurately simulate this challenging operation, which generally take coiled tubings to their load limits. This new load scenario makes obsolete the existing mathematical prediction models for determining the fatigue lifetime of coiled tubings, reason why it is necessary to establish a comparison between the test results with these existing models.

The experimental results of the first tests are presented in this document as comparison to the existing mathematical prediction models.

## REVIEW OF EXISTING TEST FACILITIES

To start, it is reviewed how the coiled tubing testing has been performed worldwide during the last two decades.

Figure 1.a shows a test facility built as an intent to standardize coiled tubing fatigue testing, being designed as simple as possible with the goal to be easily available to every company and also to make the rigging of the sample as fast as possible (Newman and Brown, 1993). In this facility, which is used to test pipe samples with diameters between 1 1/4" and 1 3/4", can be only applied bending cycles with internal pressure since the main target has been always focused in analyzing the main components affecting the plasticity of the coiled tubing.

The figure 1.b shows a newer test facility built to test coiled tubings with different induced surface defects ▶

прогнозирующие усталостную долговечность колтюбинга. Поэтому необходимо провести сравнение тестовых результатов с результатами, прогнозируемыми этими моделями.

Данные первых экспериментов представлены в настоящей статье в форме сравнения с прогнозами существующих математических моделей.

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ

Для начала будет дан обзор того, как проводилось тестирование гибких труб в лабораториях по всему миру на протяжении последних двадцати лет.

На рисунке 1a показана испытательная установка, построенная с намерением стандартизировать процесс усталостных тестов для гибких труб. Она была спроектирована таким образом, чтобы ее приобретение могла позволить себе любая компания. Данная установка имеет простой дизайн, легко собирается, а процесс монтажа тестового образца очень быстр (Newman, Brown, 1993). В этой установке, которая способна тестировать образцы труб диаметром от 31,75 мм до 44,45 мм, можно имитировать только сгибающиеся циклические нагрузки и воздействие внутреннего давления, поскольку основной ее целью всегда был анализ основных компонентов, влияющих на пластичность колтюбинга.

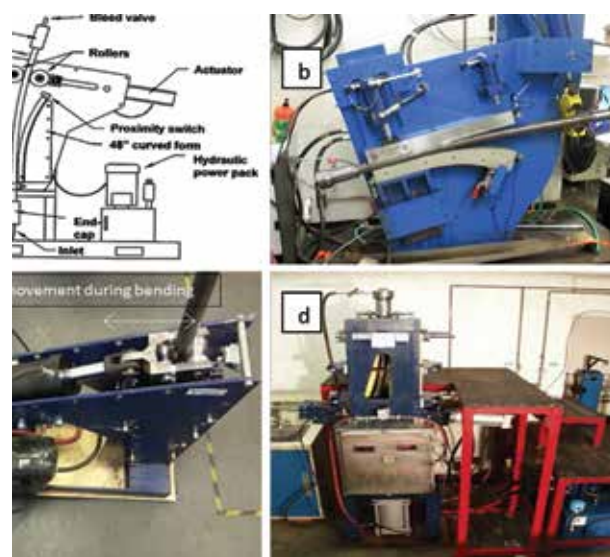
На рисунке 1b показан испытательный стенд, который был создан для испытаний гибких труб с различными индуцированными поверхностными дефектами под воздействием внутреннего давления и циклических сгибающих нагрузок. Также этот стенд способен тестировать под воздействием растворов  $H_2S$  гибкие трубы, созданные из новых марок стали (CTMRC, 2016).

Установка, показанная на рис. 1c, была построена в единственном экземпляре для тестирования образцов труб диаметром от 38,1 мм до 76,2 мм под воздействием циклических сгибающих нагрузок и внутреннего давления вплоть до разрушения трубы. На этой установке были проведены испытания образцов, изготовленных из углеволокна, для сравнения их усталостной прочности и таковой, имеющейся у стандартных стальных труб (DETCRC, 2016).

Стенд для испытаний, продемонстрированный на рис. 1d, был создан в рамках проекта, именуемого «Совместный исследовательский проект по изучению удлинения и увеличения диаметра гибких труб» (CTMRC, 2016). Проект призван изучить механику колтюбинга с целью создания модели пластичности гибких труб. На этом стенде можно проводить испытания гибких труб диаметром от 31,75 мм до 60,33 мм под воздействием осевых и циклических сгибающих нагрузок, а также внутреннего давления.

Путем проведения экспериментов по тестированию гибких труб ученые разработали набор существующих сегодня математических моделей, прогнозирующих усталостную долговечность колтюбинга. О них будет вкратце изложено ниже.

Математические модели Achilles (CTES, 2003),



**Рисунок 1 – Существующие установки для проведения испытаний колтюбинга**  
**Figure 1 – Existing coiled tubing test facilities**

against bending cycles with internal pressure. This machine is also built to test new CT grades under exposure of  $H_2S$  solutions. (CTMRC, 2016)

The machine shown in the figure 1.c was exclusively built to test pipe samples with OD between 1<sup>1/2</sup>” and 3” to bending cycles with internal pressure to failure. CT samples made of carbon fibre were tested in this machine to compare their fatigue performance to the ones of normal steel pipes. (DETCRC, 2016)

The test facility shown in 1.d was built as part of a project called “The elongation and diametral Growth JIP” (CTMRC, 2016) to study the coiled tubing mechanics with the idea to develop a coiled tubing plasticity model. This machine was designed to apply bending cycling and axial load to pressurized coiled tubings with outer diameters between 1<sup>1/2</sup>” and 2<sup>3/8</sup>”.

By means of experimental coiled tubing testing, it was able for different investigators to develop today s existing mathematical models to predict the fatigue life time of coiled tubings, which will be shortly explained below.

The mathematical models Achilles (CTES, 2003), CoilLIFE and Cycle have been developed after thousands of pipes tested in labs, being the most used prediction models worldwide. The Achilles model is an algorithm belonging to the Cerberus package which has been developed by Prof. Steven Tipton of the University of Tulsa (Tipton, 1996, 1999)). This model is based on the plasticity theory which relates the shear and the stress or strain suffered, continuously updating the capacity of the coiled tubing to resist additional forces. CoilLIFE was developed for Dowell Schlumberger (CTMRC, 2016) and it calculates the damage occurring during each bending cycle suffered depending on the internal pressure, accumulating the total damage, predicting by this way when the first crack will appear. During this investigation, the strains were always measured in hoop and axial directions in order to compare the accumulated plastic deformation under different internal pressure values. In the case of the software Cycle, it was developed

CoilLIFE и Cycle были разработаны на основе анализа лабораторных испытаний тысяч образцов труб. Это наиболее часто используемые прогностические модели. Модель Achilles представляет собой алгоритм, присутствующий в пакете программного обеспечения Cerberus, разработанном профессором Стивеном Типтоном из Университета Талсы (Tipton, 1996, 1999). Эта модель основана на теории пластичности, которая соотносит сдвигающее усилие с индуцированным механическим напряжением/деформацией, непрерывно обновляя данные о способности колтюбинга сопротивляться дополнительным нагрузкам. Модель CoilLIFE была разработана для компании Dowell Schlumberger (CTMRC, 2016). Она рассчитывает повреждения, наносимые гибкой трубе каждым циклом сгибающих нагрузок, в зависимости от значений внутреннего давления. При этом производится расчет общего количества повреждений и на основе этого делается прогноз о том, когда должна появиться первая трещина в трубе. В процессе расчетов деформации всегда измерялись в кольцевом и осевом направлениях для сравнения аккумулированной пластической деформации, получаемой при различных значениях внутреннего давления. Программное обеспечение Cycle было разработано в 90-х годах прошлого столетия компанией Newsco и использовалось исключительно компанией Baker Hughes Inc (TCC210, 2005).

Все эти модели принимают в качестве входных параметров следующие величины: внешний диаметр гибкой трубы, толщину ее стенок и марку прочности стали, из которой она сделана, а также радиусы искривления барабана и вертлюга, внутреннее давление в трубе при ее сгибании/разгибании. Имея в своем распоряжении все вышеперечисленные параметры, программы способны рассчитать напряжения, возникающие в осевом, радиальном и кольцевом направлениях после каждого эпизода сгибания/разгибания. Затем делается оценка постепенно нарастающих усталостных повреждений гибкой трубы.

### **ИСПЫТАНИЯ ГИБКОЙ ТРУБЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ БУРЕНИЯ**

При использовании в буровых приложениях гибкая труба подвергается аксиальным и торсионным нагрузкам в дополнение к сгибающим, которые обусловлены прохождением через вертлюг и наматыванием на барабан. Для точного воспроизведения такого типа работ образцы трубы должны подвергаться всем этим нагрузкам. Воспроизведение осевой нагрузки необходимо в форме растяжения для симуляции аксиальной нагрузки, которой труба подвергается, будучи подвешенной при спуске в скважину/подъеме из скважины. Также возможно воспроизведение осевой нагрузки в форме сжатия для симуляции нагрузки, которой гибкая труба подвергается в случае использования сразу за КНБК. Такое сжатие обусловлено созданием трубой нагрузки на долото в процессе бурения. ►

during the 1990's by the Newsco and it is exclusively used by Baker Hughes Inc (TCC210, 2005).

All these models have in common the next input variables: outer diameter, wall thickness, and material grade, bending radii of the reel and gooseneck, and the internal pressure present during the bending and straightening of the CT. Once having these variables, the programs calculate the axial, hoop and radial stresses after each bending event, having an estimation of the incremental fatigue damage added to the CT.

### **COILED TUBING TESTING FOR DRILLING APPLICATIONS**

For drilling applications, the coiled tubing is subjected to axial load and torsion additional to the bending loads taking place at the well head as running through the reel and gooseneck. To accurately replicate this kind of operation the pipe samples have to be subjected to all these existing loads. The axial load is important to the applied in form of tension in order to simulate the axial load this pipe suffers as it hangs in the well during RIH or POOH and also, if this is the case, in compression if the CT is used directly after the BHA to simulate the WOB present during the drilling operation.

Torsion loads have to be applied as well to simulate the torque induced by the drilling bit, which is represented during the test as an alternating torsion, oscillating between a minimum and a maximum value. This simulation is performed using a novel test facility able to apply all these possible loads on the coiled tubing samples. This machine is presented in the next section.

### **NOVEL TEST FACILITY FOR COILED TUBINGS**

A new test facility which is able to replicate the loads involved during drilling operations, especially in deep drilling, must be capable to apply axial load and torque to the test sample. This new test machine can perform not only the standard bending cycles with internal pressure but also as a new test approach is presented the intervention simulation test, in which the specimen is fixed at both ends with the goal of being tested against axial load and torque, also in the presence of internal pressure. By this way, a complete coiled tubing intervention can be reproduced, beginning with the RIH, replicated by bending cycles with internal pressure, followed by the intervention itself which is represented by the axial load and torque, also under the presence of the internal pressure, and ending with the POOH which is represented once again by the bending cycles with internal pressure.

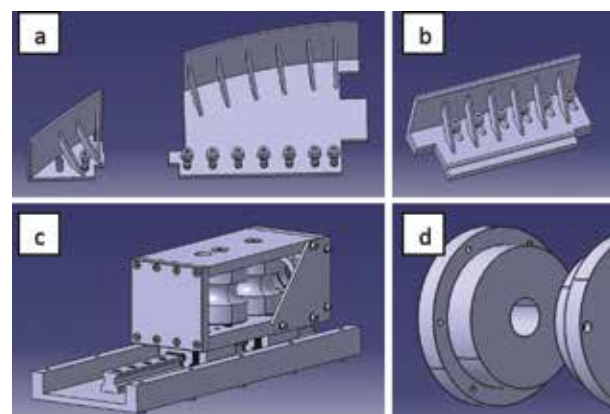
All components of this new machine were designed to make the load application as similar as possible to the reality. The most critical part was to properly reproduce the bending process. In the figure 2.a is shown the arc support which replicates the path of the coiled tubing through the reel and gooseneck, being this part where the bending of the pipe takes place during the test. This arc support has a curvature radius of 83", and it was built for the tests to be performed on coiled tubings having an outer diameter of 2 3/8". In the figure 2.b is shown the straight support, which is placed on the other side of the tube in order to avoid undesirable deformation ►

Торсионные нагрузки также должны воспроизводиться, так как симулируют наличие крутящего момента, индуцируемого долотом. В процессе тестов такие нагрузки реализуются в виде знакопеременного кручения, осциллирующего между минимальным и максимальным значениями. Все вышеперечисленные симуляции производятся с использованием новейшей испытательной установки, которая способна подвергать тестовые образцы гибких труб всем подобным нагрузкам (по отдельности или одновременно). Описание такой установки будет дано ниже.

### НОВЕЙШАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГИБКОЙ ТРУБЫ

Новая испытательная установка, которая способна воспроизводить нагрузки, генерируемые при буровых работах, особенно при глубоком бурении, должна быть способна подвергать тестовые образцы аксиальным и торсионным нагрузкам. Описываемая в статье новая установка может не только проводить стандартные испытания под воздействием циклических сгибающих нагрузок и внутреннего давления, но также способна использовать новый подход к проведению тестов. Эта методика предусматривает фиксацию образца трубы с обоих концов и применение осевых и торсионных нагрузок в присутствии внутреннего давления. Таким образом, можно полностью воспроизвести процесс внутрискважинных работ с применением колтюбинга, начиная от спуска в скважину (сгибающие нагрузки + внутреннее давление), самой внутрискважинной операции (осевые и торсионные нагрузки + внутреннее давление) и заканчивая поднятием из скважины (опять сгибающие нагрузки + внутреннее давление).

Все компоненты новой установки были спроектированы таким образом, чтобы приблизить процесс лабораторных испытаний к реальным скважинным условиям. Самой важной частью было правильное воспроизведение процесса сгибания колтюбинга. На рисунке 2a показан дуговой держатель, который воспроизводит путь гибкой трубы через барабан и вертлюг. Именно в данной части выполняется сгибание трубы в процессе испытаний. Держатель имеет радиус кривизны в 2,1 м и предназначен для испытания колтюбинга внешним диаметром 60,33 мм. На рисунке 2b показан прямой держатель, который располагается с другой стороны трубы. Он нужен для того, чтобы избежать нежелательной деформации трубы, включая сужение диаметра, в процессе ее распрямления. Рисунок 2c демонстрирует механизм для сгибания, который непосредственно осуществляет сгибание и распрямление трубы путем передачи усилия. Гибкая труба располагается между двумя роликами, имеющими форму тестируемой трубы, что помогает избежать ненужной деформации образца в точках контакта. Наконец, на рис. 2d продемонстрированы две пластины, которые располагаются в середине стенда для фиксации трубы. Это позволяет избежать любого смещения относительно осевой позиции.



**Рисунок 2 – Компоненты устройства для сгибания**

**Figure 2 – Components of the bending setup**

of the pipe, such as necking, as it is straightened back to its original position. Figure 2.c shows the bending mechanism, which is the one transmitting the force to bend and straighten the pipe. The coiled tubing is placed between two pulleys having the form of the pipe to be tested, helping to avoid unnecessary deformation of the specimen in the contact points. Finally, the figure 2.d shows two plates which are placed in the middle of the frame to keep the pipe fixed avoiding any offset from its axial position. One of the plates has a rounded form to avoid stress concentrations in the specimen since this is the place where the bending process begins.

In this frame, axial, torsion and bending loads are applied by means of hydraulic cylinders. Figure 3 shows the final test facility including these three cylinders.

### PREPARATION FOR THE TESTS

For the first tests performed in this new facility, coiled tubings with 2 3/8" of outer diameter were the biggest pipes found, having a wall thickness of 0,224" and HS-80 as material grade. Before proceeding with the tests, the outer diameter and wall thickness were measured in several sections of the pipes to determine their ovality and eccentricity and by this way confirm that the coiled tubings had a proper manufacturing process and are in good shape, avoiding the experimental tests to deliver wrong results. Material and residual stress tests were also performed on each specimen to confirm the material had not suffered any previous deformation and that the heat treatment during their manufacture was properly performed. The material tests were done following the ASTM E8-11 (2011) and the residual stress evaluation is in accordance with the ASTM E1928-13 (2013) and CEN ISO/TR 10400:2011(2011).

In order to determine and control the strain during the test, strain gauges were positioned on the pipe samples. A maximum strain ranging in the 2% to 3% was present during the application of the bending. A total of 4 sets of strain gauges were positioned on each specimen.

Three of these sets were placed in the bending section close to the area expected to failure. Each of these three sets are formed by four strain gauges located in the same transversal section and placed 90° from each other. The last set of strain gauges was placed where no bending is

Одна из пластин имеет закругленную форму для предотвращения концентрации напряжений в образце, поскольку именно в этом месте начинается процесс сгибания колтюбинга.

В данном стенде осевая, торсионная и сгибающая нагрузки оказываются при помощи гидравлических цилиндров. На рисунке 3 показана испытательная установка, включающая три вышеупомянутых цилиндра.

### ПОДГОТОВКА ИСПЫТАНИЙ

Для первых испытаний были выбраны образцы гибких труб диаметром 60,33 мм. Толщина их стенок составляла 5,7 мм, а марка стали – HS-80. Перед началом испытаний толщина стенок всех образцов и их внешний диаметр были измерены для различных частей труб. Это было сделано для определения овальности и эксцентриситета труб, что, в свою очередь, необходимо было для подтверждения их соответствия заводским данным. В противном случае эксперименты могли дать неверные результаты. Испытания материала и тесты на остаточное напряжение также были проведены для каждого образца, чтобы удостовериться в том, что они не были прежде подвержены деформации, а тепловая обработка в процессе их изготовления была выполнена должным образом. Испытания материала колтюбинга были выполнены по стандартным методикам ASTM E8-11 (2011), а оценки остаточных напряжений – по методикам ASTM E1928-13 (2013) и CEN ISO/TR 10400:2011(2011).

Для измерений и мониторинга механических напряжений образцов в процессе испытаний на трубах устанавливались деформационные манометры. Максимальная величина механических напряжений колебалась в районе 2–3% при сгибании образцов. Всего на каждом образце устанавливалось четыре (4) набора деформационных манометров.

Три (3) из них размещались в той части образца, которая подвергалась сгибанию в области, где больше всего ожидалось появление трещины. В каждый из этих трех (3) наборов входило по четыре (4) деформационных манометра, расположенных в пределах одного поперечного сечения образца, под углом в 90° друг от друга. Последний набор деформационных манометров располагался в части образца, где не происходило сгибания. Этот набор использовался для измерения осевых механических напряжений, влияния внутреннего давления, а также деформации сдвига, обусловленной наличием знакопеременного кручения.

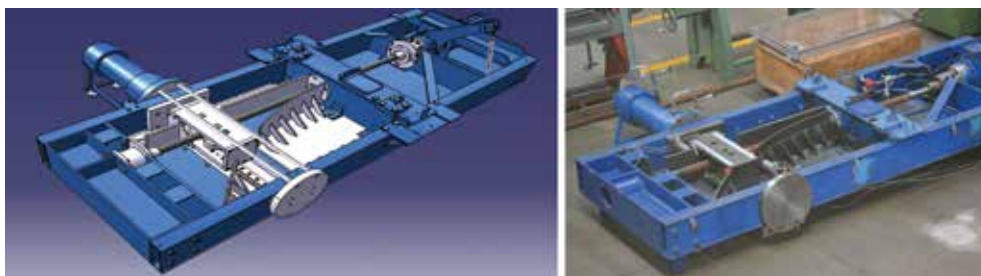
### ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе статьи будут представлены результаты, полученные в процессе испытаний образцов колтюбинга.

taking place for measuring the axial strain, the effect of the internal pressure and the shear strain caused by the alternating torque.

### EXPERIMENTAL TESTS AND RESULTS

In the following section of this paper the obtained experimental results are presented.



**Рисунок 3 – Новая установка для испытания гибкой трубы**  
**Figure 3 – The new coiled tubing test facility**

### Bending test with internal pressure

Before beginning with the new tests it was important to guarantee that the machine is delivering reliable results, reason why it was started with the standard bending test with internal pressure to validate the test results by comparing them with the existing prediction models. For the bending tests, the coiled tubing samples were subjected to 650 bar of internal pressure and they were posteriorly cycled under cyclic bending forces until failure. The tests stopped once leakage appeared and the internal pressure was lost. Figure 4 shows the moment after one of the specimens broke. The section of maximum shear stress can be observed, product of the combined loads: axial tension induced by the bending cycles and high internal pressure.

In table 1 the experimental results of the first 5 bending tests with internal pressure are shown.

**Table 1 – Bending test results**

Pipe Number	CT1	CT2	CT3	CT4	CT5
Bending cycles to failure	55	52	49	50	50

An average of 51 cycles to failure were obtained, value located between the existing mathematical models. The existing models considered are Achilles with predicts 48 cycles to failure, Flexor-TU model with 52 cycles and finally the Cycle model which predicts 54 cycles to failure.

As shown in the figure 5, all pipes tested under bending forces with internal pressure had a similar final state, plastic deformation expected for this kind of test. In the figures “5.a” and “5.b” is shown the increased ovality in the pipe, which for these tests was around 10%. Picture “5.c” shows the pipe plastically bent. Picture “5.d” shows the ballooning effect in the pipe, where the diameter increase close to the failure section can be observed.

After having determined that the machine is providing reliable results, the intervention simulation tests taking into account the additional loads (axial tension and torsion) were performed.

## Тест на сгибание в присутствии внутреннего давления

Перед началом новых испытаний важно было гарантировать, что установка дает надежные результаты. Поэтому было решено начать со стандартных тестов на сгибание в присутствии внутреннего давления, так как такие результаты можно сравнить с уже имеющимися для существующих прогностических моделей. Образцы гибких труб в рамках тестов подвергались воздействию внутреннего давления в 65 МПа, а также циклических сгибающих нагрузок вплоть до начала усталостного разрушения образцов. То есть тесты прекращались, как только появлялась течь из образца колтюбинга и внутреннее давление падало. На рисунке 4 показан момент, когда в одном из образцов появилась сквозная трещина. Область максимального сдвигающего напряжения образуется в той части, где генерируется осевое растяжение из-за циклов сгибания/разгибания, а также действует высокое внутреннее давление.

В таблице 1 показаны результаты первых пяти (5) тестов на сгибание в присутствии внутреннего давления.

**Таблица 1 – Результаты тестов на сгибание**

Номер образца	СТ1	СТ2	СТ3	СТ4	СТ5
Число циклов сгибания до разрушения образца	55	52	49	50	50

В среднем число циклов до усталостного разрушения равнялось 51, что хорошо согласуется с существующими математическими моделями. Например, модель Achilles прогнозировала 48 циклов до усталостного разрушения образца, модель Flexor-TU – 52 цикла и модель Cycle – 54 цикла.

Как показано на рис. 5, все образцы гибких труб, тестирувавшиеся на сгибание в присутствии внутреннего давления, имеют похожее состояние после испытаний. А именно: у всех образцов наблюдается ожидаемая пластическая деформация, свойственная такому типу испытаний. На рисунках 5а и 5b показано увеличение овальности труб, которое для данных испытаний составило около 10%. Рисунок 5с демонстрирует пластично деформированную трубу. Рисунок 5d показывает эффект «вздутия» трубы, когда можно наблюдать увеличение диаметра образца в области близкой усталостного разрушения.

После того как было получено подтверждение надежности результатов испытаний, проводимых с помощью новой установки, были проведены испытания, симулирующие внутрискважинные операции, при воздействии дополнительных нагрузок (осевое растяжение и торсионные нагрузки).

## Испытания при воздействии осевых и торсионных нагрузок

В процессе данных испытаний образцы



**Рисунок 4 – Влияние растяжения и высокого внутреннего давления на образец**

**Figure 4 – Tension and high internal pressure effect on the failure section**

## Intervention simulation test with axial load and torsion

For these tests the coiled tubing samples were subjected to a critical combined load state corresponding to the 95% of their VME, simulating a demanding drilling operation for the drillstring, in which the presence of axial forces and torque with internal pressure are added, alternated with the normal bending forces suffered while RIH and POOH.

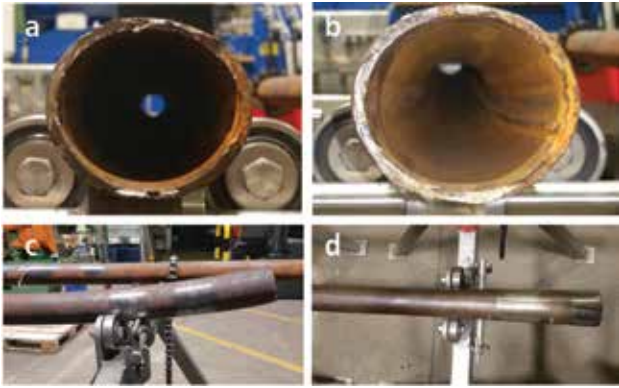
The internal pressure used for the tests was the same 650 bar used for the bending tests. The axial load was set to 240 kN in tension, to simulate the tension suffered by the pipe. A cyclic torque between 2000 N-m and 3000 N-m was continuously applied to simulate the induced torque in the pipe coming from the drill bit.

Figure 6 shows the location of the combined loads in the specimen s VME during the test.

Rotation of the coiled tubing was not allowed in any of the tests. Before each set of bending cycles it was checked that the specimen had not suffered circumferential offset from its initial position, making sure that the fibers initially located at the maximum tension and maximum compression positions staid in their places. If rotation occurred during the torsion test, the specimen was always brought back to its original position.

The results of these tests show a decrease of the fatigue lifetime of the coiled tubing, where in average a total of 41 bending cycles were applied before failure took place. Figure 7 shows the failure section of a specimen tested under this load state. Additional deformation forms are seen, having parts of the inner wall of the pipe twisted forms on the maximum shear stress plane, showing how the torsion has its share in the failure of the coiled tubing.

As well as for the bending tests, the crack spreads from the inner wall up to the outer wall until the fracture of the specimen, despite that the maximum shear stress is located at the outer walls. This means that the influence of the hoop and radial stresses are more determining in how the failure takes place. This effect can be seen in the figure 7.



**Рисунок 5 – Конечное состояние тестируемых образцов гибкой трубы**  
**Figure 5 – Final state of the tested coiled tubings**

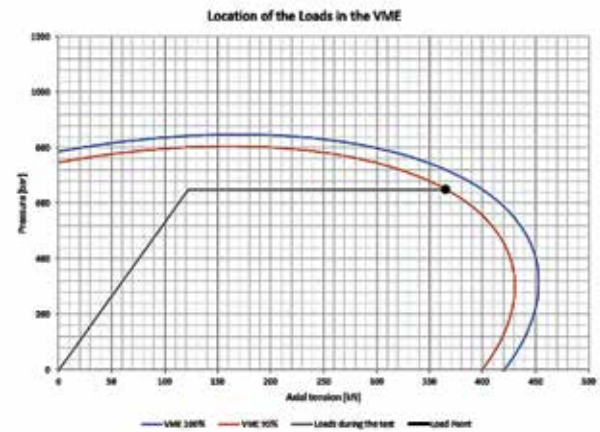
колтюбинга подвергались критическим комбинированным нагрузкам, которые соответствовали 95% от их огибающей по Мизесу. Таким образом, моделировалась требовательная к колонне труб операция по бурению, которая сопровождалась воздействием осевых и торсионных нагрузок, внутреннего давления, а также стандартных сгибающих/разгибающих нагрузок, появляющихся при спуске/подъеме трубы.

Значение внутреннего давления в процессе испытаний не отличалось от такового, применявшегося для стандартных тестов на сгибание, и составляло 65 МПа. Осевая нагрузка присутствовала в виде растяжения с силой 240 кН, симулируя тем самым растяжение, которому подвергается гибкая труба в процессе колтюбингового бурения. Циклическая торсионная нагрузка со значением крутящего момента в 2000–3000 Н\*м постоянно воздействовала на образцы для того, чтобы имитировать крутящий момент, действующий на трубу со стороны бурового долота.

На рисунке 6 показано местоположение комбинированных нагрузок на образцы в терминах огибающей по Мизесу.

Вращение колтюбинга не допускалось ни в одном из тестов. Перед каждым набором из циклов сгибания проверялось, что образец не сдвинут относительно своего первоначального положения. Таким образом, гарантировалось, что волокна, первоначально расположенные в точках максимального растяжения и сжатия, оставались в тех же позициях. Если в процессе воздействия торсионной нагрузки происходил поворот образца, гибкая труба всегда возвращалась в первоначальное положение.

Результаты данных испытаний показывают снижение усталостной долговечности колтюбинга до среднего значения в 41 цикл до начала усталостных разрушений. Рисунок 7 демонстрирует образец, подвергшийся усталостным разрушениям в процессе испытаний. Налицо наличие дополнительных видов деформации. Части внутренней стенки трубы имеют скрученные формы в плоскости максимального сдвигающего



**Рисунок 6 – Комбинированные нагрузки в процессе испытаний**  
**Figure 6 – Combined loads during the tests**



**Рисунок 7 – Конечное состояние образца после проведения испытаний**  
**Figure 7 – Final state of the CT after the test**

In figure 8 is shown the fatigue life of a coiled tubing affected by the torsion compared to the test results of the standard bending cycling with internal pressure for a CT with an OD of 23/8". It can be seen in the tests performed how the torsion significantly affects the fatigue life time of the coiled tubing in around 10%.

## CONCLUSIONS

A unique test facility was designed and built to increase the accuracy for the prediction of the fatigue lifetime of coiled tubings. The analysis of additional forces like axial load and torque acting on the specimens can provide a more realistic combined load state suffered by tubulars when subjected to different operations within the oil and gas industry.

It is proven that the existing models are not appropriate to predict the fatigue lifetime of coiled tubings for demanding operations like deep drilling, since it is a must to take into account the effect of the axial load and the torsion on the pipe.

The fatigue life time of the coiled tubing is reduced in around 10% due to the influence of torsional forces.

## RECOMMENDATIONS

An extensive test program can be performed in which coiled tubings of several sizes and material grades are tested to create a new algorithm based on experimental tests with the goal of creating a new mathematical model which determines with high accuracy how the fatigue life of coiled tubings is consumed under all the contemplated loads.



напряжения, что демонстрирует влияние торсионных нагрузок на снижение усталостной долговечности колтюбинга.

Так же как и для тестов на сгибание, трещина, как правило, распространяется от внутренней до внешней стенки трубы (является сквозной). Область максимального сдвигающего напряжения расположена у внешних стенок трубы. Это означает, что влияние кольцевых и радиальных напряжений является более определяющим в плане образования усталостных разрушений. Этот эффект можно наблюдать на рис. 7.

На рисунке 8 показано сравнение усталостной долговечности гибкой трубы при воздействии торсионных нагрузок с результатами стандартных тестов на сгибание в присутствии внутреннего давления для гибкой трубы диаметром 60,33 мм. По результатам испытаний видно, что торсионные нагрузки значительно влияют на усталостную долговечность колтюбинга, снижая ее примерно на 10%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уникальная испытательная установка была спроектирована и построена для повышения точности прогнозов усталостной долговечности колтюбинга. Был проведен анализ влияния дополнительных нагрузок, включая осевые и торсионные, на тестовые образцы. Это позволит более реалистично оценивать комбинированные нагрузки, которым подвергаются гибкие трубы при проведении различных операций в нефтегазовой индустрии.

Доказано, что существующие модели не подходят для прогнозирования усталостной долговечности гибкой трубы при ее использовании в таких операциях, как глубокое бурение, так как необходимо принимать во внимание осевое растяжение трубы и торсионные нагрузки на нее.

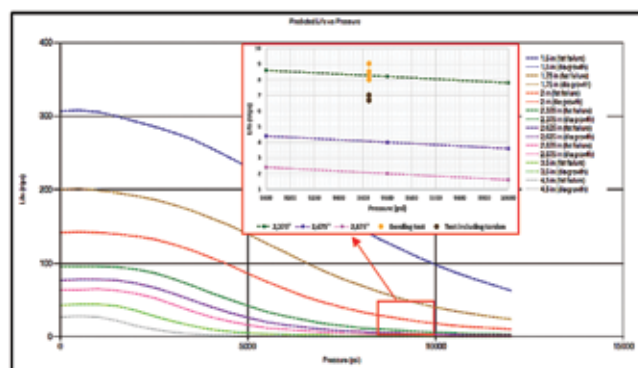
Показано, что из-за влияния торсионных нагрузок усталостная долговечность колтюбинга снижается примерно на 10%.

### РЕКОМЕНДАЦИИ

Можно провести обширную программу испытаний, в процессе которых гибкие трубы различных размеров, изготовленные из различных марок стали, будут тестироваться с целью создания нового алгоритма на основе экспериментальных данных. Такая новая математическая модель сможет с высокой точностью определять снижение усталостной долговечности колтюбинга под воздействием всех предполагаемых нагрузок.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Создание настоящей статьи стало возможным благодаря финансовой поддержке Министерства науки и культуры земли Нижняя Саксония, Германия, а также поддержке компании Baker Hughes в рамках программы GEBO («Геотермальная энергия и высокопроизводительное бурение»). ©



**Рисунок 8 – Влияние внешнего диаметра гибкой трубы на ее усталостную долговечность**

**Figure 8 – Effect of the OD on the CT fatigue life**

### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was possible thanks to the financial support of the Ministry of Science and Culture of the state of Lower Saxony (MWK) in Germany and Baker Hughes within the research program “gebo” (Geothermal Energy and High Performance Drilling).

### NOMENCLATURE

- CT: Coiled tubing
- OD: Outer diameter
- BHA: Bottom hole assembly
- RIH: Running in hole
- POOH: Putting out of hole
- WOB: Weight on bit
- VME: Von Mises envelope ©

### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Newman, K.R., Brown, P.A. Schlumberger Dowell. 1993. Development of a Standard Coiled Tubing Fatigue Test. Presented at the 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE. Houston, Texas. USA. 3–6 October. SPE 26539.
2. Tipton, Steven M. University of Tulsa. 1996. Multiaxial Plasticity and Fatigue Life Prediction in Coiled Tubing. Fatigue Lifetime Predictive Techniques: 3rd Volume, ASTM STP 1292, M.R. Mitchell and R.W. Landgraf, Eds., American Society for Testing and Materials. USA. pp. 283–304
3. CTES, L.P. Achilles 4.0. CT Fatigue Life Prediction Algorithm. 2003
4. Coiled Tubing Mechanics Research Consortium. [www.coiledtubingutulsa.org](http://www.coiledtubingutulsa.org)
5. DETCRC Bending Machine. Deep Exploration Technologies Cooperative Research Centre. Perth, Australia
6. Tipton, S.M. University of Tulsa. 1999. The Achilles fatigue model. CTES Tech Note.
7. TCC210 Coiled Tubing equipment correspondence course. 2005. BJ EDC-Tomball, Version 1.01.
8. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM E8-11. 2011. ASTM International. PA, USA.
9. Standard practice for estimating the approximate residual circumferential stress in straight thin-walled tubing. ASTM E1928-13. 2013. ASTM International. PA, USA.
10. Technical report. Equations and calculations for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe as casing or tubing (CEN ISO/TR 10400:2011). 2011. European committee for standardization. Bruxelles, Belgium.