

Применение усовершенствованных средств анализа методом конечных элементов для расчета и моделирования подводных нефте- и газопроводов и их узлов

The use of Advanced Finite Element Analysis Tools for the Design and Simulation of Subsea Oil and Gas Pipelines and Components

Пол Джукс, доктор философии, серт. инженер, сотрудник Научно-исследовательского и проектного института морских сооружений

Айман Элтахер, доктор философии, проф. инженер

Джеймс Вонг, магистр наук

Билли Дюрон, бакалавр наук

Компания «Джей-Пи Кенни»

Хьюстон, шт. Техас, США

Paul Jukes PhD CEng FIMarEST

Ayman Eltaher PhD PE

James Wang MSc

Billy Duron BSc

J P Kenny, Inc.

Houston, TX USA

ЧЕМ ВЫЗВАНА НЕОБХОДИМОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ?

Темпы потребления нефти и газа в мире постоянно растут и, как следствие, возникает потребность в использовании новых возможностей и реализации проектов, которые ранее были неосуществимыми по техническим или коммерческим соображениям, но сегодня стали экономически целесообразными.

Технические проблемы

В ряде случаев отсутствие необходимых технологий либо их дороговизна может приводить к тому, что проекты остаются «замороженными» в течение многих лет. В литературе определены технические проблемы и отсутствующие (недоступные) технологии, оказывающие существенное воздействие на проектирование нефте- и газопроводов и подводного оборудования [1]. Основные технические проблемы связаны со следующими факторами: большая глубина,

WHY USE ADVANCED FINITE ELEMENT ANALYSIS?

The world is consuming oil and gas at an ever increasing rate and, as a result, there is demand to exploit new opportunities and make projects that were once not technically or commercially feasible, now viable in a cost-effective manner.

Technical Challenges

Technology gaps exist and the inability to bridge that gap, due to technology either being unavailable or just too expensive to implement, has put some projects 'on-hold' for many years. A number of engineering challenges, or technology gaps, have been identified that has a significant impact on the design of oil and gas pipelines, and subsea equipment [Ref. 1]. The main technical challenges that exist are identified as; deep water, high pressure/high temperature, flow assurance, and thermal buckle management. It is now common place for subsea systems and pipelines to be installed in water depths in excess of 1,000 meters (3,300ft).

высокие давление и температура, обеспечение бесперебойного потока продукции и борьба с термическими деформациями. В настоящее время подводное оборудование и трубопроводы часто монтируются на глубинах более 1000 м (3300 футов). Крупные компании-операторы рассматривают проекты сооружения промысловых трубопроводов в Мексиканском заливе на глубинах вплоть до 3 тыс. м (10 тыс. футов). Расчетное эксплуатационное давление нередко доходит до 700 бар (10 тыс. фунт/дюйм₂) и более при температурах 160 °C (320 °F). В настоящее время специалистами крупного оператора месторождения в Мексиканском заливе ведется проектирование объекта с расчетной температурой 177 °C (350 °F). Такие условия создают ряд трудностей при выборе материалов и методов проектирования. При столь высоких температурах нормативы проектирования, основанные на нагрузках, становятся неприменимыми, поэтому для проектирования таких трубопроводов необходимо применять методы предельных состояний.

Прокладка трасс и изыскания

Прокладка трасс подводных нефте- и газопроводов и промысловых трубопроводов сопряжена с дополнительными трудностями. Эффективный импорт трехмерных данных изысканий представляет собой сложную математическую задачу, и выполнение соответствующих расчетов может оказаться дорогостоящим процессом. Оптимальный выбор трассы может дать существенную экономию средств за счет сокращения протяженности трубопровода, а также свести к минимуму изгибы и нагрузки на трубопровод, если его трасса прокладывается в обход неблагоприятных участков неровного морского дна, камней и других препятствий. Залогом успеха является быстрый и эффективный импорт данных изысканий в программное средство для их трехмерного представления. Как правило, выбор трассы осуществляется путем интеграции программного обеспечения, разработанного сторонней организацией, со средствами для анализа методом конечных элементов, как представлено в настоящем докладе.

Целесообразное решение

В последнее время к компаниям, занимающимся проектированием трубопроводов и подводных сооружений, предъявляются более высокие требования в отношении поиска экономически эффективных решений для подобных проблем. Одним из путей является применение усовершенствованных средств расчета, в частности, анализа методом конечных элементов, при моделировании, расчете и проектировании трубопроводов и подводных сооружений. Эти средства дают возможность оптимизировать проект за счет получения большего объема технической информации без выполнения

Flowline designs are presently being considered, for a major operator, in the Gulf of Mexico (GoM) for water depths down to 3,000 meters (10,000ft). High Pressure and High Temperature (HP/HT) with pressures in the order 700bar (10,000PSI) or more, and temperatures being considered up to 160°C (320°F) are not uncommon. For a major operator in the GoM, temperatures up to 177°C (350°F) are presently being considered. This can present real design challenges in the choice of materials and in the design methodology. Stress based design codes are no longer applicable at these high temperatures, and the solution is to design such pipelines using a limit state methodology.

Routing and Survey

The routing of subsea oil and gas pipelines and flowlines pose particular challenges. The importing of 3-D survey data efficiently is a numerical challenge and can be computationally expensive to undertake. Routing can have significant financial benefits if the length of the pipeline is reduced, and it can also minimize undue bending and stress on the pipeline if the pipeline is re-routed around onerous undulating seabed, rocks, or imperfections. Importing survey data into a 3-D visualization tool quickly, and efficiently, is key to success. Generally, routing is undertaken by integrating third party software with FE analysis tools, as will be demonstrated within this article.

Viable Solution

In recent times, there has been a greater requirement for pipeline and subsea design companies to tackle these engineering challenges in a cost-effective manner. One such way is to use more advanced analysis tools, such as finite element analysis to model, simulate, and design both pipelines and subsea components. This will allow designs to be optimized with a greater understanding of the Engineering complexities, without having to undertake expensive large scale tests, and hence a viable, workable, solution can then be obtained.

Cost Savings

An optimized design will provide 'added-value', and ultimately provide capital cost savings to a project. The detailed factors for a successful project have been identified [Ref. 1] as the following:

- » **Innovation:** Novel ideas, lateral thinking, and original ideas;
- » **Advanced Numerical Tools:** 'Bespoke' software, path dependent, highly non-linear;
- » **Competency:** Range of backgrounds, highly qualified, years of experience.

These factors allow you to drive down to an optimised solution, and experience from a project is then feedback into the next one, and this allows projects to deliver and evolve. By knowing what you are doing, through the use of analysis tools and experience, 'added-value' can then

дорогостоящих крупномасштабных испытаний, позволяя получить целесообразное и выполнимое решение.

Экономия затрат

Оптимизированный проект обеспечивает повышение эффективности и, в конечном итоге, экономию капитальных затрат на реализацию проекта.

Основные факторы успешной реализации проекта [1] перечислены ниже:

- » **Инновации:** новые идеи, распространение идей в новые области, оригинальные идеи;
- » **Усовершенствованные вычислительные средства:** «заказное» программное обеспечение, с учетом последовательности вычислений, с большой степенью нелинейности;
- » **Компетенция:** широкий профиль, высокая квалификация, большой опыт.

Эти факторы позволяют получить оптимальное решение, при этом опыт реализации одного проекта учитывается при разработке следующего, обеспечивая возможность развития. Оптимизация процесса наряду с применением средств и опыта расчетов позволяет повысить эффективность проекта. Сочетание всех трех перечисленных элементов обеспечивает разработку и оптимизацию проектных решений и экономию затрат.

Усовершенствованные средства анализа методом конечных элементов могут применяться при общем моделировании трубопроводов, позволяя получить данные по модели и реакциям. Этот процесс отличается высокой степенью нелинейности, необходимой из-за нелинейности свойств материалов, больших деформаций и взаимодействий труба-грунт. Данный тип анализа может применяться для расчета провисающих участков, смятия в горизонтальной плоскости и укладки с барабана. Примеры таких расчетов приведены в последующих разделах настоящего доклада. Нелинейность привлекает особое внимание, в первую очередь, при проектировании трубопроводов для работы в условиях высоких температур, когда расчеты по нагрузкам становятся неприменимыми и принимаются расчеты методом предельных состояний.

Во-вторых, анализ методом конечных элементов применяется для выполнения «локального» объемного моделирования сложных компонентов подводных сооружений, таких как перегородки, фланцы, соединения на объектах и спиральные трубы. Быстрое и эффективное создание моделей методом конечных элементов является важнейшей задачей, решение которой позволяет эффективно выполнить обсчет различных вариантов проекта и найти оптимальное проектное решение.

В третьих, важным моментом является комплексный подход к выбору маршрута трассы (на основе трехмерного программного обеспечения и расчета

be given to a project. It is the combination of all three elements that allows design solutions to be developed, optimised, and then achieve cost savings.

Advanced Finite Element Analysis can be used to undertake global modeling of pipelines, and this allows the simulation and response to be obtained. This is a highly non-linear process, due to material non-linearity, large displacements, and pipe/soil interaction. This type of analysis can be used to undertake span analysis, lateral buckling and reeling analysis. Examples of these are described within the following sections of this paper.

Non-linearities can be a particular issue when designing pipelines at high temperatures, stress based design can no longer be used, and a limit state based design is adopted. Secondly, Finite Element Analysis can be used to undertake 'local' solid modeling of complex subsea components such as; bulkheads, flanges, field joints and spiral pipe. Constructing FE models efficiently, and quickly, is key and it allows design iterations to be efficiently undertaken to allow an optimized design to be achieved.

Thirdly, an 'integrated' approach to route selection, using 3-D software and stress analysis, to reduce pipeline length and minimise intervention is important. If the survey data, route selection and stress analysis can be undertaken quickly and efficiently, this will allow design iterations to take place in a cost effective manner. Time spent at this iterative design stage, when undertaken efficiently, could then have a significant financial saving in terms of the Engineering.

Through advanced analysis tools, the challenges of deepwater and HP/HT can be addressed by integrating analysis tools with pipeline design methods, such as Limit State Based Design (LSBD). Pipelines are designed using this approach, and optimised wall thicknesses can be obtained, and this then allows significant financial savings, in linepipe costs, if undertaken correctly.

To accurately model and predict the ultimate failure of a pipeline requires looking at the limit states so as to gain an adequate margin of safety between the design loads and ultimate failure. The major target is to investigate the ultimate limit states, and a FE model is used to provide all of the pipeline response data as input for each limit state.

ADVANCED PIPELINE ANALYSIS AND DESIGN TOOLS

The key to undertaking complex designs of pipeline systems is to use advanced analysis tools. These analysis tools can undertake global modeling of pipelines, local modeling of subsea components, and micro modeling of pipeline welds. Examples of these different types of FE modeling is described in the following sections.

нагрузок), при котором сокращается протяженность трубопровода и сводятся к минимуму воздействия. Быстрая и эффективная обработка данных изысканий, выбор трассы и расчет нагрузок позволяют сэкономить средства при обсчете различных вариантов проекта. Эффективное использование времени на этапе рассмотрения различных вариантов может дать существенную экономию затрат на проектно-конструкторские работы.

Применение усовершенствованных средств анализа позволяет рассматривать проблемы, связанные с условиями больших глубин, высоких значений давления и температуры, путем интеграции средств анализа с методами проектирования трубопровода, такими как расчеты методом предельных состояний. Проектирование трубопроводов с применением данного подхода и расчетом оптимальных толщин стенки труб, при правильном выполнении, может дать значительную экономию средств.

Для точного моделирования и прогнозирования разрушения трубопровода необходимо рассмотрение предельных состояний, чтобы обеспечить достаточный запас прочности – от расчетных нагрузок до разрушения. Основная цель – изучить предельные состояния; при этом модель на основе метода конечных элементов позволяет получить исходные

1. Global Modelling

The wide range of proprietary advanced FEA tools that allow the accurate prediction of pipeline responses, which has been developed, is called 'Simulator'. The FE engine is the commercial software ABAQUS [Ref. 2]. The models include elasto-plastic materials, 3-D route geometry, peak, and residual modeling of axial and lateral soil pipe forces. Pipe-in-Pipe (PIP) and single pipe models have been developed. Each model is fully checked and validated. Many of the models have been benchmarked against observed pipeline behavior. The 'Simulator' analysis is a static large deflection analysis and includes all relevant non-linearities such as large deflection and large rotations, elasto-plastic pipe materials interpolated over relevant temperature ranges, and non-linear pipe-soil interactions.

Tools have been developed that undertake the following design activities;

- » Upheaval Buckling;
- » Lateral Buckling;
- » Single pipe and PIP response;
- » Reeling Analysis;
- » Pipe/Soil interaction;
- » Expansion/Span Analysis;
- » Ice Scour/Pipe/Soil interaction.

These tools allow the simulation of the pipeline response and the prediction of possible buckles in the pipelines, as

ARMAPIPE®

B BETA FENCE



Специальная арматурная сетка, обеспечивающая долговечность защитных железобетонных покрытий трубопроводов

Арматурная сетка ARMAPIPE® обеспечивает надежную защиту морских и наземных трубопроводов, подвергающихся воздействию ударных нагрузок, усадки и сдвигающих нагрузок в суровых условиях эксплуатации. Позволяет создавать защитные покрытия, отличающиеся уникальными показателями по следующим параметрам:

- целостность, однородность и прочность, гарантирующие повышенную устойчивость к ударным нагрузкам;
- высокая эластичность, позволяющая свести к минимуму образование трещин при монтаже трубопроводов;
- выдержанные однородные значения предела прочности на сжатие;
- долговечность защитного покрытия, армированного горячеоцинкованной сеткой.

Возможность поставки изделий серии Armapipe с четырех заводов в разных странах мира позволяет компании Betafence находить гибкие решения для нужд любого проекта.

Betafence NV, Belgium
Тел. +32 (0)56 73 45 30
Факс +32 (0)56 73 45 97
armapipe@betafence.com
www.betafence.com

данные о реакции трубопровода для всех предельных состояний.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ СРЕДСТВА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ

Применение усовершенствованных средств анализа является залогом успеха при проектировании сложных трубопроводных систем. Такие средства позволяют выполнять глобальное моделирование трубопроводов, локальное моделирование элементов подводных систем и микромоделирование сварных швов трубопровода. Примеры этих типов моделирования методом конечных элементов приведены в следующих разделах.

1. Глобальное моделирование

Существует широкий спектр патентованных усовершенствованных средств анализа методом конечных элементов, позволяющих точно прогнозировать реакции трубопровода, объединенных в программу Simulator, работающую на базе программного обеспечения ABAQUS [2]. В моделях производится моделирование гибко-пластичных материалов, трехмерное моделирование трассы, моделирование пиковых и остаточных воздействий грунта на трубу вдоль ее оси и в поперечном направлении. Разработаны модели «труба в трубе» и модели для одиночной трубы. Каждая модель полностью проверяется и оценивается. Многие из них сопоставлялись с наблюдаемым поведением трубопровода.

Анализ с помощью программы Simulator представляет собой статический анализ отклонений большой амплитуды, охватывающий все соответствующие нелинейные сценарии: смещения и крутильные деформации большой амплитуды, интерполяция поведения гибко-пластичных материалов в соответствующих диапазонах температуры, нелинейные взаимодействия грунт-труба.

Разработаны средства для выполнения следующих расчетов:

- » смятие в вертикальной плоскости;
- » смятие в горизонтальной плоскости;
- » реакции одной трубы и системы «труба в трубе»;
- » расчет укладки с барабана;
- » взаимодействия грунт-труба;
- » расчет расширения и провисающих участков;
- » ледовое выпавивание и взаимодействия грунт-труба.

Упомянутые средства дают возможность моделирования реакций трубопровода с прогнозированием возможных участков смятия, как показано на Рис. 1. Это особенно важно для трубопроводов, работающих в условиях высоких температур.

Применение программы Simulator на этапе

shown in Figure 1. This is particularly important for high temperature pipelines.

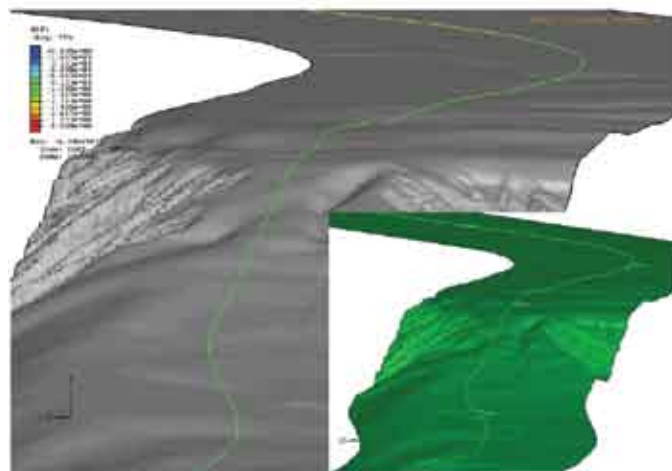


Рис. 1 : Моделирование изгиба трубопровода в горизонтальной плоскости

Fig. 1 : Simulation of Pipeline Lateral Buckling

The use of 'Simulator' during the design stage allows Limit State Based Designs, and allows the following to be undertaken;

- » Change and optimize the design;
- » Undertake a range of sensitivities;
- » Simulate Pipeline response, displacements & expansion;
- » Obtain forces, moments and stress/strain.

The design can be iterated and, through the adoption of limit states, the design can be optimized resulting in possibly significant financial savings.

Detailed Description of 'Simulator'

The model runs using ABAQUS [Ref.2] and is designed to analyse the initial, prior to the moment of instability, and post lateral buckling behaviour, and expansion behaviour of straight, single pipe-in-pipe system flowline lying on a flat seabed. This model is applicable for shallow or deepwater condition and/or a HTHP PIP system. The modules can perform parametric studies if required, by simply changing the input parameters of the input script code.

Upon completion of a single analysis, the following results can be presented:

- » Submerged Weight;
- » DNV Load Controlled Utilization (if required);
- » Axial, Lateral Movement;
- » Effective Axial Force;
- » Axial and Hoop Stress;
- » Von Mises Stress;
- » Bending Moment;
- » Plastic Strain, Buckling Curvature.

The FE elements used are PIPE31H, which are the hybrid formulation pipe elements within ABAQUS/Standard.

проектирования позволяет выполнять расчеты методом предельных состояний и решать следующие задачи:

- » изменение и оптимизация проекта;
- » расчет диапазонов чувствительности;
- » моделирование реакций, смещений и расширений трубопровода;
- » расчет сил, моментов и соотношений напряжение-деформация.

Можно выполнять повторные циклы расчетов, а учет предельных состояний позволяет оптимизировать проект, что может дать существенную экономию средств.

Подробное описание программы Simulator

Модель работает на базе ПО ABAQUS [2]. Она предназначена для расчета поведения трубы на начальной фазе смятия, фазе после смятия в горизонтальной плоскости, а также параметров расширения одиночного прямого промыслового трубопровода типа «труба в трубе», лежащего на ровном дне. Модель применима к мелководным и глубоководным условиям, а также к системе «труба в трубе» работающей в условиях высокого давления и температуры. При необходимости модули могут выполнять параметрические расчеты – для этого достаточно изменить параметры в программном коде исходного скрипта.

По выполнении одного расчета выдаются следующие результаты:

- » масса в погруженном состоянии;
- » применение регулируемой нагрузки согласно DNV (если требуется);
- » смещения по оси и в горизонтальной плоскости;
- » эффективные силы, действующие вдоль оси;
- » напряжения по оси и по окружности;
- » нагрузки по Мизесу;
- » изгибающий момент;

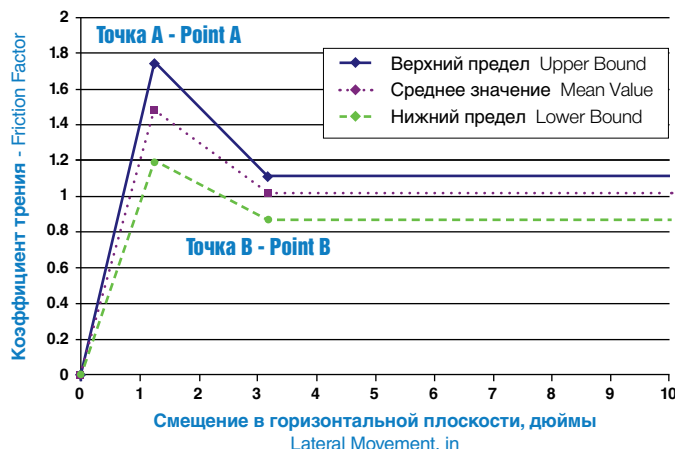


Рис. 2 : Пример принимаемой модели трения

Fig. 2 : An Example of a Friction Model Adopted

These elements are selected, as they are particularly well suited to modeling long, slender pipelines with better convergence behaviour than the standard pipe elements. The friction between the pipeline and the seabed is one of the factors affecting the buckling performance. A friction model, that uses an ABAQUS user subroutine has been developed, and enables non-linear axial and lateral friction to be defined, as shown in Figure 2.

The form of the friction-slip subroutine is similar in both axial and lateral directions. Starting at the origin O, the friction value starts to increase until a peak is reached at point A. Further slip is undertaken with decreasing friction values until a residual value of friction is reached at point B.

The seabed friction dominates the boundary conditions to the pipeline. However, connectors aligned with the pipeline at either end of the pipe are specified to simulate weak springs to remove any potential singularities before friction begins to act.



Лаборатория калибровки расходомеров

Выпускаемая компанией SPSE система калибровки расходомеров предназначена для калибровки любых типов расходомеров на основе измерения расхода жидких углеводородов в диапазоне от 150 до 4000 м³/ч. Для этого компания SPSE использует различные виды жидких углеводородов с вязкостью от 0,5 до 130 мм²/с в стандартном варианте. Могут рассматриваться и другие возможности (повышение вязкости до 500 мм²/с по согласованию).

Стандартные диаметры от 6 до 24 дюймов
(номинальные диаметры в метрических единицах от DN 150 до DN 600).

Прверный контур объемом 15 м³ используется для калибровки при расходе до 3000 м³/ч. Контрольные расходомеры применяются для калибровки при расходе до 4000 м³/ч.

Аккредитация Комитетом Франции по вопросам аккредитации (COFRAC) гарантирует соответствие результатов государственным стандартам и учет факторов неопределенности лабораторных измерений. Комитет Франции по вопросам аккредитации заключил многосторонние соглашения с метрологическими ведомствами разных стран мира.

Мартин Матье

Тел.: 33-(0)442 477 875

Факс: 33-(0)442 050 775

Эл. почта: martine.mathieu@spse.fr

Мишель Фье

Тел.: 33-(0)442 477 829

Факс: 33-(0)442 050 775

Эл. почта: michel.fieu@spse.fr

» пластическая деформация, кривизна смятия.

Применяются конечные элементы PIPE31H, являющиеся гибридными трубными элементами в программе ABAQUS/Standard. Данные элементы выбираются по той причине, что они особенно хорошо подходят для моделирования длинных тонких трубопроводов и обнаруживают лучшую сходимость параметров, чем стандартные трубные элементы. Одним из факторов, влияющих на характер смятия, является трение между трубопроводом и дном моря. Разработана модель трения, в которой применяется подпрограмма ABAQUS, позволяющая рассчитать нелинейные силы трения по оси и в поперечном направлении, как показано на Рис. 2.

Формы подпрограмм, использующихся для расчета зависимости «трение-соскальзывание» вдоль оси и в поперечном направлении, аналогичны. От начала координат (О) величина трения возрастает, пока не достигнет пика в точке А. Затем происходит соскальзывание с уменьшением величины трения, пока в точке В не достигается остаточная величина трения.

Граничные условия трубопровода определяются главным образом трением между трубопроводом и дном. В то же время соединения трубопровода на обоих концах трубы определяются в модели как слабые пружины, с тем, чтобы устранить все возможные дополнительные факторы до проявления трения.

Глобальное моделирование трубопроводов выполнялось в рамках ряда проектов, а также использовалось для выполнения рабочих расчетов. К таким расчетам относятся «локализация напряжений» [9] и расчет элементов распределения нагрузок [11]. Некоторые примеры глобальных моделей представлены в следующих разделах.

Пример глобальной модели: отход трубопровода

Для расчета традиционной реакции расширения короткого промыслового трубопровода принимается одна закрепленная точка у середины трубопровода с расширением от этой точки к его концам. После пуска и останова на начальном этапе циклическое расширение имеет постоянную амплитуду. Отход трубопровода может возникать на коротких промысловых трубопроводах с незакрепленным концом в результате интенсивных циклических термических нагрузок. Если циклы пуска и останова вызывают значительные перепады температуры, может возникнуть прерывистое движение трубопровода со смещением в сторону более холодного конца. Через определенное число циклов такое движение может привести к очень значительной осевой деформации и вызвать перегрузку компенсирующей трубной секции

The global modeling of pipelines has been used on a number of Projects, and also used for undertaking detailed studies. Such studies include an investigation into 'Strain Localisation' [Ref. 9] and the analysis of 'Loadshare' components [Ref. 11]. Some global model examples are presented in the following sections.

Global Model Example: Pipeline Walking

The conventional expansion response of a short flowline involves a virtual anchor point close to the centre of the line and expansion from this anchor towards the ends of the flowline. After early start-up/shut-down, the cyclic expansion is of constant amplitude.

Flowline walking can occur for short free-ended flowlines subject to a high thermal cyclic loading. If startup/shut-down cycles involve significant thermal gradients then axial ratcheting of the flowline can occur, with displacements toward the cold end. Over a number of cycles this movement can lead to very large global axial displacement with associated overload of the spool piece or jumper if any. This cumulative axial displacement is described as 'Pipeline Walking'.

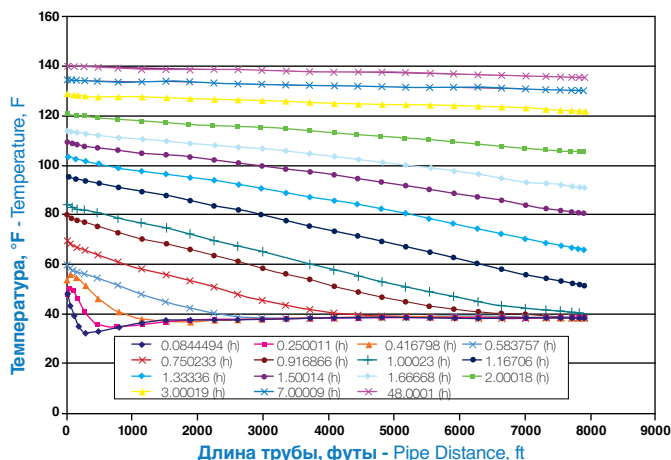


Рис. 3 : Нестационарные температурные режимы
Fig. 3 : Thermal Transients

The key to this phenomenon is the transient thermal profile developed during heat-up, as shown in Figure 3.

In high pressure flowlines the internal pressure is almost enough to mobilize the friction force over the whole flowline. For this reason the pressure in the analysis is kept constant.

A typical pipeline walking response, for a number of start-up and shut-down cycles, is shown in Figure 4. The result of pipeline walking is that the flowline can ratchet across the seabed, and hence overstress any connecting jumper, or structure, at the end of the flowline. The FE analysis tool allows the adequate simulation and prediction of this phenomenon so that design remediations can take place. The modeling of

или переходника, если они предусмотрены. Такая кумулятивная осевая деформация называется «отход трубопровода».

Ключом к пониманию этого явления является нестационарный температурный режим при прогреве, как показано на Рис. 3.

В промышленных трубопроводах высокого давления внутреннее давление становится почти достаточным для того, чтобы компенсировать силы трения по всей длине трубопровода. В связи с этим давление при расчете принимается постоянным.

Типичная реакция с отходом трубопровода в течение ряда циклов пуска и останова показана на Рис. 4.

Результатом отхода промышленного трубопровода

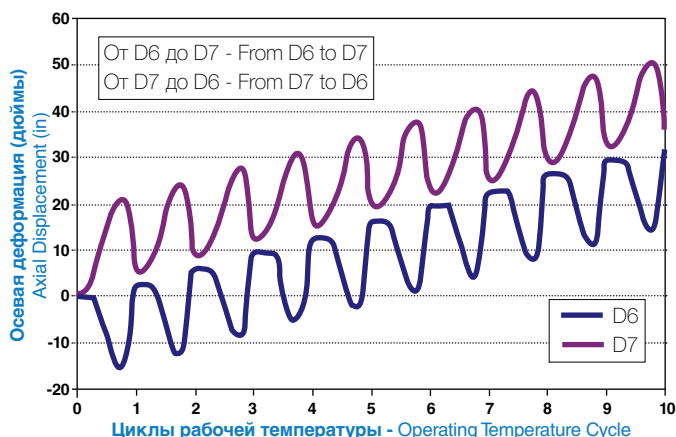


Рис. 4 : Циклический отход трубопровода

Fig. 4 : Pipeline Walking Displacement Ratchetting

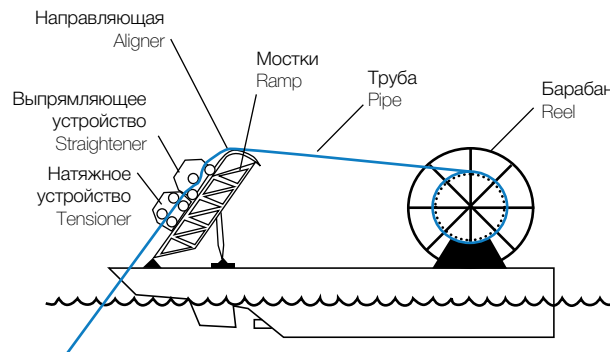


Рис. 5 : Основные элементы процесса укладки с барабана

Fig. 5 : Key Components of the Reeling Process

this pipeline walking effect would not be easily possible without such FE models.

Global Model Example: Integrated Reeling and Lateral Buckling Response

The reeling installation process of PIP systems, see Figure 5, produces residual loading in both the inner and outer pipes which need to be taken into account in any subsequent lateral buckling analysis. The residual loads could have a subsequent effect on the ultimate limit state capacity of the inner pipe, when temperature and pressure is applied, during the operational phase.

A recent model has been developed that is a sequential integrated reeling and lateral buckling PIP FEA, which captures the full reeling history, and is then included in the operational analysis for lateral buckling [Ref. 3]. Figure 6 shows a typical PIP reeling response.



Компания **TECPESA** - ведущее испанское предприятие, предоставляющее услуги по врезке в работающие нефте- и газопроводы и установке на них заглушек с обводными линиями, которое в 2008 г. стало третьей международной компанией в данной области.

Два основных направления деятельности компании:

Предоставление услуг по врезке в работающие трубопроводы и услуг по установке заглушек с обводными линиями без остановки трубопроводов на транспортных и распределительных газо- и нефтепроводах. Мы используем особые технологии для подсоединения, ремонта или замены трубопроводов без их остановки.

Изготовление фитингов по индивидуальным проектам: изготовление фитингов для ВРЕЗКИ В РАБОТАЮЩИЕ ТРУБОПРОВОДЫ и для установки заглушек с обводными линиями (включая тройники, шарообразные тройники, выпускные трубы с типоразмерами от 2 до 56 дюймов, классы 150 - 900), узлов запуска и приема скребков, а также комплектующих деталей (специальных труборезов со съемными зубьями, держателей труборезов, держателей заглушек, переходников, корпусов, уплотняющих элементов, индикаторов прохождения скребков и т. д.).

Агрегаты для врезки и установки заглушек с обводными линиями без остановки трубопроводов: оборудование для различных типоразмеров - от 2 до 48 дюймов, классы 150 - 600. Вся продукция и оборудование, предлагаемые нашей компанией, полностью совместимы с изделиями компаний TD Williamson и IPSCO.

является его циклическое смещение по морскому дну с превышением допустимых нагрузок на соединительную перемычку или конструкцию у конца трубопровода. Анализ методом конечных элементов дает возможность адекватно смоделировать и спрогнозировать это явление, чтобы предусмотреть соответствующие решения для его предотвращения. Моделирование эффекта отхода трубопровода без привлечения метода конечных элементов является гораздо более трудной задачей.

Пример глобальной модели: комплексный расчет реакций при укладке с барабана и смятия в горизонтальной плоскости

Процесс укладки систем «труба в трубе» с барабана (см. Рис. 5) приводит к образованию во внешней и внутренней трубах остаточных нагрузок, которые следует учитывать при всех последующих расчетах смятия в горизонтальной плоскости. Остаточные нагрузки могут иметь дальнейший эффект на итоговую прочность внутренней трубы в предельном состоянии, под воздействием рабочей температуры и давления, на этапе эксплуатации.

Недавно разработана модель для осуществления последовательного расчета укладки с барабана и смятия в горизонтальной плоскости систем «труба в трубе» методом конечных элементов, с регистрацией всего процесса укладки с барабана, а затем учетом этих данных в расчетах на смятие в горизонтальной плоскости при эксплуатации [3]. На Рис. 6 показана типовая реакция системы «труба в трубе» при укладке с барабана.

Полный анализ процесса укладки с барабана является особенно трудной задачей из-за проблем схождения, однако данные проблемы были учтены. Результаты, полученные с помощью данной модели, показывают, что при расчете высокотемпературных трубопроводов должны учитываться эффекты процесса укладки с барабана, поскольку они могут снижать общую итоговую устойчивость к нагрузкам. Типовая реакция на смятие в горизонтальной плоскости показана на Рис. 7.

Пример глобальной модели: оценка провисающих участков трубопровода, вибраций вызванных вихревыми потоками, расчет нескольких провисающих участков

Разработано средство для моделирования провисающих участков трубопровода методом конечных элементов согласно требованиям последней редакции норматива DNV-RP-F105, 2006 [4], принимающее во внимание сложный сценарий взаимодействующих провисающих участков. Выполняется начальная оценка провисающих участков по данным изысканий, за которой следуют статические и динамические расчеты методом предельных состояний. После этого выполняется контрольный расчет вибраций, вызванных вихревыми потоками. На основе расчета таких вибраций определяется максимальная допустимая

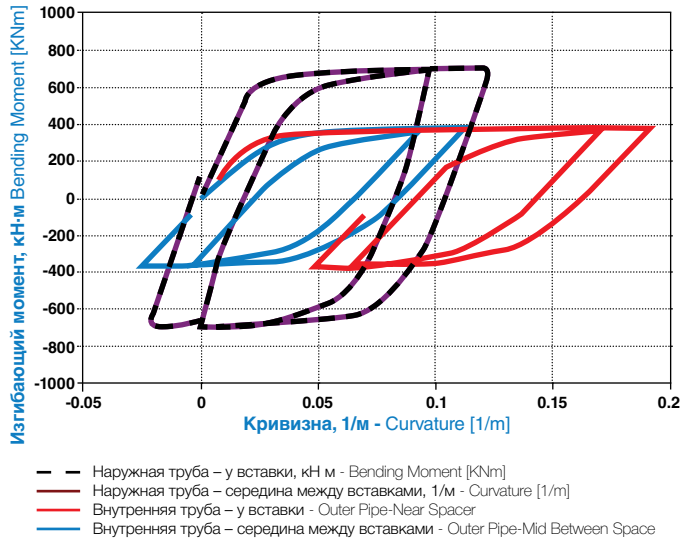


Рис. 6 : Реакция системы «труба в трубе» при укладке с барабана

Fig. 6 : PIP Reeling Response

A full reeling analysis is particularly complex to undertake, due to convergence issues, but these issues have been addressed. Using this reeling module, results show that the effects of reeling should be taken into account for high temperature pipelines as it can reduce the ultimate loading capacity. A typical lateral buckling response is shown in Figure 7.



Рис. 7 : Смещение трубопровода при смятии в горизонтальной плоскости

Fig. 7 : Pipeline Displacement under Lateral Buckle

Global Model Example: Assessing Free Spans / Vortex Induced Vibrations (VIV) / Multi-Span Analysis

A FE model has been developed to undertake span analysis, in accordance with the latest version of DNV-RP-F105, 2006 [Ref. 4], which takes into account the complicated scenario of interacting spans. An initial assessment of the spans from the survey data is performed, followed by static and dynamic Ultimate Limit State (ULS) checks. A Vortex Induced

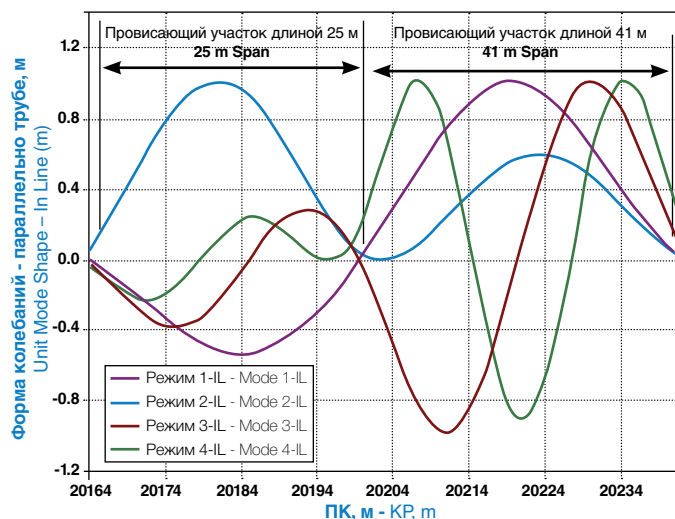


Рис. 8 : Форма колебаний – параллельно трубе

Fig. 8 : Mode Shape – In-line

длина провисающих участков с учетом потоков, вызываемых течениями и волнением, направленных вдоль и поперек трубы. Наконец, выполняется расчет усталостных напряжений на провисающих участках, превышающих допустимые пределы длины. В расчетах применяется модель конечных элементов с целью определения частот собственных колебаний, единичных нагрузок и формы колебаний. На Рис. 8 показана типовая форма колебаний вибраций, вызванных вихревыми потоками, направленными вдоль трубы. Результаты расчетов дают эффективные решения для смягчения таких воздействий как на существующие трубопроводы, так и при проектировании новых трубопроводов.

При контрольных расчетах вводятся начальный контрольный критерий и контрольный критерий усталостных напряжений в соответствии с действующими нормативными требованиями согласно критериям приемки по нормативу DNV-RP-F105, 2006 [4].

При расчете усталостных напряжений усталостная долговечность определяется на основе моделей реакций и сил, как предусмотрено нормативом. Разработана рекомендованная методика [5], состоящая из пяти основных элементов: оценка данных по объекту, проверка методом предельных напряжений, контрольный расчет, расчет усталостных напряжений и моделирование методом конечных элементов. Данная методика уже применялась при реализации проектов по различным сценариям и позволила сделать следующие основные выводы:

- » принятие норматива DNV RP-F105, 2006 [4] в качестве основных принципов проектирования и применение соответствующего программного обеспечения для расчета усталостных напряжений является основой оценки прочности и усталостной долговечности трубопроводов с провисающими участками;

Vibration (VIV) screening analysis is then conducted to determine maximum allowable span length limits for in-line and cross-flow directions under both current and wave conditions. Finally, a fatigue analysis is performed on the spans that exceed the allowable span length limits. A Finite Element Analysis (FEA) model is used in the analysis to determine natural frequencies, unit stresses and mode shapes. Figure 8 shows a typical mode shape for interacting in-line VIV. The results of the analyses provide efficient solutions to the field in terms of mitigation management for existing pipeline or new pipeline design.

In the screening analysis, the onset screening criterion and fatigue screening criterion are used to applicable code requirements regarding acceptance criteria from DNV-RP-F105, 2006 [Ref. 4]. In the fatigue analysis, the fatigue life is determined using equations for both response and force models as defined in the Code. A proposed methodology [Ref. 5], that has been developed, includes the following key areas: assessment of the field data, ULS check, screening analysis, fatigue analysis, and FEA modeling. The methodology has been used on real projects in various scenarios, yielding the following main conclusions:

- » The adoption of DNV RP-F105, 2006 [Ref. 4] as a design principle and appropriate fatigue calculation software as an analysis tool is the evaluation basis of the strength and the fatigue life of free span pipelines.
- » Advanced numerical FE tools can adequately simulate the span of pipelines in static and dynamic phases. With these tools, accurate results of natural frequency, unit stress, and mode shapes can be computed.
- » Through the appropriate methodology, the fatigue life of complex free span pipelines can be accurately evaluated and a confident decision can be made regarding any repair services that are required. It is believed that this methodology could be used as a starting point for projects with complicated interacting spans.

- » усовершенствованные цифровые средства для анализа методом конечных элементов способны адекватно модулировать провисающие участки трубопроводов в статическом и динамическом режиме. Данные средства позволяют выполнить точный расчет частот собственных колебаний, единичных нагрузок и формы колебаний;

- » путем применения соответствующих методик можно точно оценить усталостную долговечность сложных трубопроводов с провисающими участками и принять обоснованное решение относительно требуемых ремонтных работ. Считается, что рассмотренная методика может служить отправной точкой при разработке проектов со сложными взаимодействующими провисающими участками.