



УДК 622.691.4.07:539.4.014.1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ МЕТОДОМ СПЛАЙНОВ

PROCESSING THE RESULTS OF INCLINOMETRIC MEASUREMENTS OF THE MAIN PARAMETERS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF GAS AND OIL PIPELINES BY THE SPLINES METHOD

Буторин Андрей Игоревич

магистрант кафедры проектирования
и эксплуатации магистральных газонефтепроводов,
Ухтинский государственный технический университет
butolin_sv@mail.ru

Сальников Александр Викторович

кандидат технических наук,
доцент кафедры проектирования
и эксплуатации магистральных газонефтепроводов,
Ухтинский государственный технический университет
ugtusovet@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена обзору автоматизированной системы мониторинга на базе высокоточной цифровой инклинометрии. Рассмотрен вопрос обработки результатов инклинометрических измерений с целью последующего определения напряженно-деформированного состояния трубопровода.

Ключевые слова: инклинометрия, сплайн, интерполяция, напряженно-деформированное состояние.

Butorin Andrey Igorevich

Student of design and operation
of gas and oil pipelines,
Ukhta State Technical University
butolin_sv@mail.ru

Salnikov Alexander Viktorovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Design
and Operation of Gas and Oil Pipelines,
Ukhta State Technical University
ugtusovet@yandex.ru

Annotation. This article is devoted to the reviews of an automated monitoring system based on high-precision digital inclinometry. The question of processing the results of inclinometric measurements with the aim of the subsequent determination of the stress-strain state of the pipeline is considered.

Keywords: inclinometry, spline, interpolation, stress-strain state.

Инклинометрия – определение пространственного положения объекта, выполняющаяся специальным прибором – инклинометром, с помощью которого фиксируют угол отклонения объекта от его первоначального положения, горизонта, или отвесного направления (рис. 1).

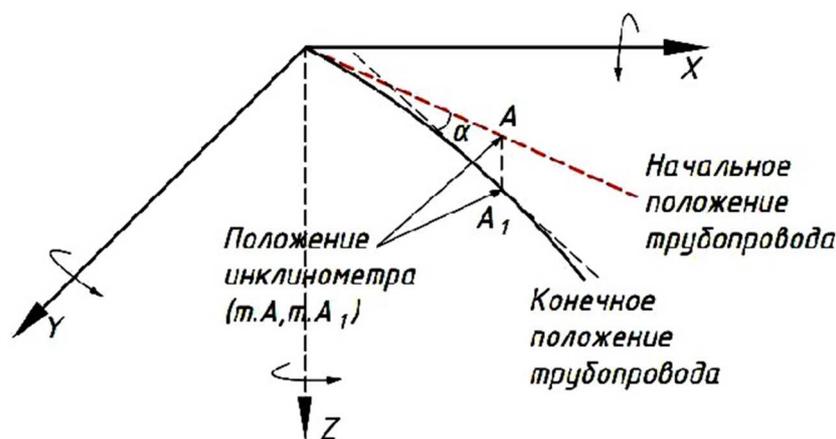


Рисунок 1 – Определение пространственного положения трубопровода методом инклинометрии

Основная задача автоматизированной системы мониторинга на базе высокоточной цифровой инклинометрии состоит в своевременном выявлении деформаций, недопустимых для магистральных газонефтепроводов. Результаты, полученные с помощью такой системы мониторинга, служат основой для принятия соответствующих решений, например, о проведении капитального ремонта, остановке производства или эксплуатации сооружения, эвакуации людей.



Ранее и практически до сих пор понятие «инклинометрия» чаще всего используется в связи с контролем пространственного положения стволов скважин при бурении. На самом деле понятие «инклинометрия» с развитием новых технологий имеет более широкое значение и применение.

Инклинометрические измерения предполагается проводить в целях получения основных параметров напряженно-деформированного состояния трубопровода. Такими параметрами являются напряжения от изгиба, радиус изгиба, кривизна и положение трубопровода в пространстве.

За последние годы активно осваивается и пополняется рынок высокоточных цифровых инклинометров для мониторинга деформаций. Примером таких приборов служат инклинометры на основе MEMS (Micro-ElectroMechanical Systems) – технологии микроэлектромеханических систем. Основой инклинометра данного типа, как правило, является аналоговый микромеханический 3-х осевой акселерометр емкостного типа. На выходе акселерометра присутствует сигнал, пропорциональный проекции силы гравитации на чувствительную ось (рис. 2).

Инклинометр с электрическим сигналом выхода, имеет очень высокую точность, относительно небольшие размеры и полное отсутствие подвижных механических узлов [1].

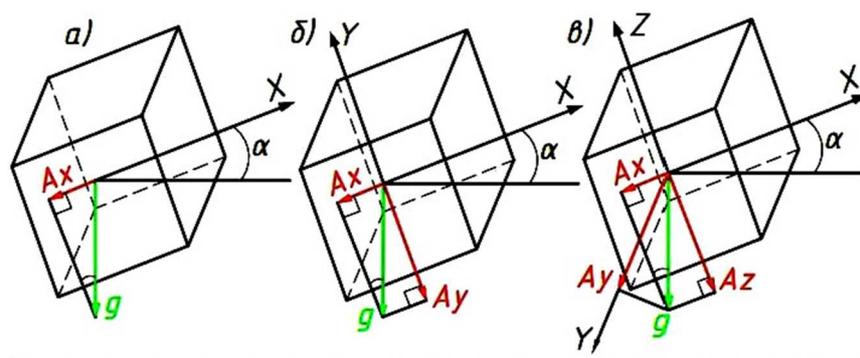


Рисунок 2 – Положение MEMS-акселерометра относительно вектора силы гравитации:
 а – для одной чувствительной оси; б – для двух осей; в – для трех осей

На первом этапе по данным измерений инклинометров в нескольких точках необходимо получить кривую $y'(z)$ как производную его оси.

Данная задача решается известным методом сплайнов. Сплайн представляет собой кусочно-заданную интерполяционную формулу, обеспечивающую самую высокую для данного класса функций степень гладкости. Получение искомых кривых реализовано в системе «MathCad» компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования.

Если у нас достаточно много данных, то интерполяционный многочлен будет иметь слишком высокую степень. Интерполяционная формула будет слишком громоздкой, её вычисление будет долгим, а кроме того, на концах интервала погрешность интерполяции будет недопустимо велика из-за накопления ошибок округления, т.е. формула будет неустойчивой. Чтобы этого избежать, задают на каждом участке свой многочлен невысокой (обычно второй или третьей) степени [2].

Кубическая сплайн интерполяция позволяет провести кривую через набор точек таким образом, что первые и вторые производные кривой непрерывны в каждой точке. Эта кривая образуется путем создания ряда кубических полиномов, проходящих через наборы из трёх смежных точек. Затем кубические полиномы состыковываются друг с другом, чтобы образовать одну кривую.

Для мониторинга изменения положения трубопровода применяются инклинометры на основе MEMS. В местах установки датчиков снимаются показания приборов (рис. 3).

На втором этапе определяется кривизна в опасных точках на рассматриваемом участке. С этой целью определяется кривая $y''(z)$, как производная функции $y'(z)$. Кривая $y''(z)$ характеризует кривизну трубопровода в различных точках расчетного участка (рис. 4).

На завершающем этапе после получения кривой $y'(z)$ по измеренным наклонам нефтепровода в характерных точках можно получить кривую прогиба оси нефтепровода $y(z)$ и напряжение $\sigma(z)$ металла (рис. 5).

На основе расчетного анализа обосновывается вывод о прочности деформируемого участка трубопровода.

Анализ достоверности предложенного метода расчёта выполнен путем сопоставления полученных значений с результатами в программной среде САПР «Solidworks». Смоделированный участок трубопровода представляет собой трубу $D_n = 219$ мм, с толщиной стенки 5 мм, с параметрами $\sigma_t = 250$ МПа, $\sigma_v = 410$ МПа. Труба нагружена до величины, соответствующей принятым углам наклона (рис. 6).

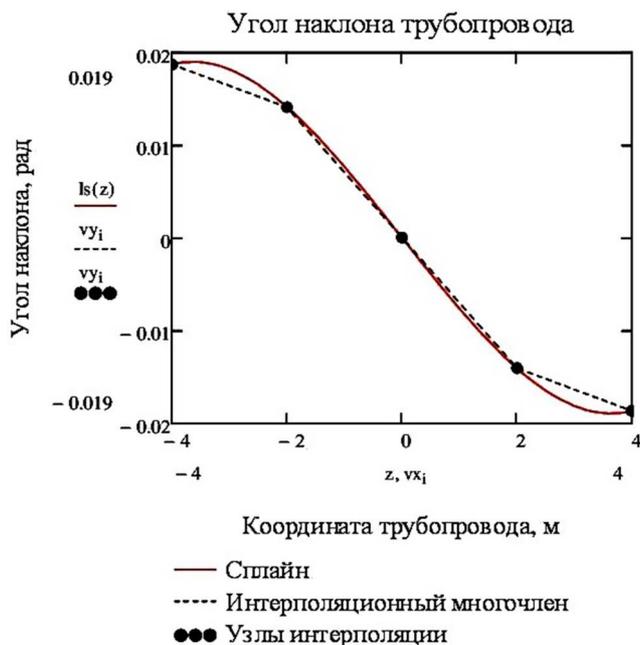


Рисунок 3 – Тангенс угла наклона трубопровода



Рисунок 4 – Прогиб трубопровода

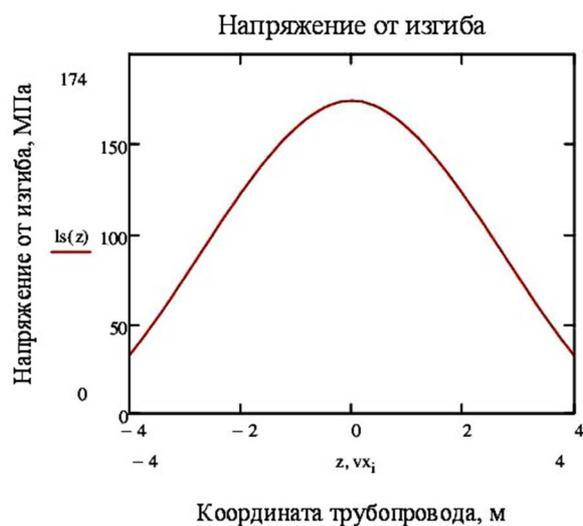


Рисунок 5 – Напряжение от изгиба

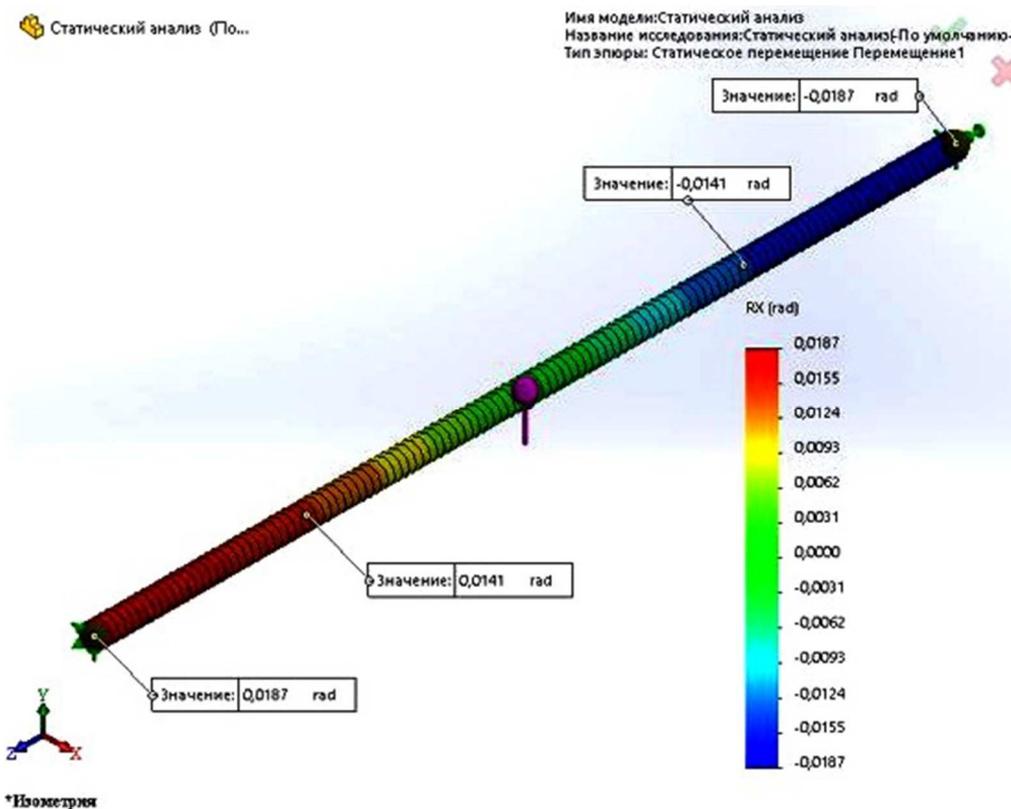


Рисунок 6 – Эпюра углов наклона

Сравнение результатов расчёта представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов расчёта основных параметров НДС

№	Координата	Угол наклона трубы	Напряжение от изгиба, МПа		Прогиб, мм	
		φ, радианы	Инклином-я	Solidworks	Инклином-я	Solidworks
1	-4	0.0187	37	3	0	0
2	-2	0.0141	123	107	35	34
3	0	0	177	210	50	50
4	2	-0.0141	123	107	35	34
5	4	-0.0187	37	3	0	0

Достоверность полученных результатов обеспечивается. Положение трубопровода предложенным методом определено с погрешностью ±2,9 %. Напряжения от изгиба варьируются в пределах значений ±34 МПа.

Литература:

1. Грязнев Д.Ю. Технология автоматизированного мониторинга геологических процессов в зоне прокладки магистральных трубопроводов / Д.Ю. Грязнев, А.А. Александров, С.П. Сущев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2013. – № 2(91). – С. 58–65.
2. Иткин В.Ю. Интерполяция и сглаживание данных в пакете MATLAB : учеб. пособие / В.Ю. Иткин, О.Н. Кочуева. – М. : Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2019. – 135 с.

References:

1. Gryaznev D.Yu. Technology of automated monitoring of geological processes in the zone of laying pipelines / D.Yu. Gryaznev, A.A. Alexandrov, S.P. Sushev // Vestnik MGTU named after N.E. Bauman. Ser.: Instrument making. – 2013. – № 2(91). – P. 58–65.
2. Itkin V.Yu. Interpolation and data smoothing in MATLAB package : Tutorial / V.Yu. Itkin, O.N. Kochueva. – M. : Publishing Center of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina, 2019. – 135 p.