

## ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 624.078.1/2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПОЯСОВ ПРИ УСТАНОВКЕ БАЛЛАСТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НЕФТЕПРОВОДЕ ПОД УГЛОМ В 30°

*канд. техн. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, А.Н. ЯНУШОНОК, Н.А. БОГДАНОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Использование в процессе балластировки инвентарных утяжелителей, предназначенных для магистральных нефтепроводов большего диаметра, приводит к нарушению требований нормативных документов в части обеспечения их угла установки относительно вертикали. В связи с этим возникает задача определения возможности отступления от требований норм с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации данных конструкций. В статье рассмотрен вопрос возможности использования утяжелителей типа УБО-1020 на магистральных нефтепроводах DN 800. Приведены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов системы при статическом нагружении системы с целью определения действующих напряжений в элементах конструкций, а также результаты экспериментальных исследований стойкости изоляционного покрытия на истирание и/или сдвиг в результате возможных перемещений соединительных поясов блоков, обусловленных вибрационным воздействием перекачиваемой среды и перемещением грунта в результате действия сезонных природных факторов.*

**Ключевые слова:** утяжелители (блоки), магистральный нефтепровод, соединительный пояс, математическое моделирование, экспериментальные исследования.

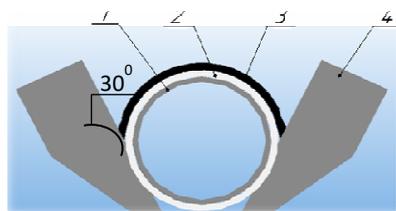
**Введение.** Одним из условий надежной и безопасной эксплуатации магистральных нефтепроводов является соблюдение их нормативной глубины залегания относительно поверхности земли. На трубопроводах, проходящих по заболоченным участкам, с целью предотвращения возможности всплывания необходимо использовать балластирующие устройства (утяжелители). По положению п. 9.6 ТКП [1] «утяжелители следует располагать на нефтепроводе без наклона в ту или другую сторону относительно вертикали. Допускается отклонение от вертикального положения не более 5°». Однако при проведении работ по установке балластирующих устройств типа УБО (устройство балластирующее охватывающее) могут быть использованы имеющиеся в наличии утяжелители, предназначенные для магистральных нефтепроводов большего диаметра, с соединительным поясом большей длины. В таком случае возникает проблема увеличения угла наклона относительно вертикали, который может превышать требования технического нормативного правового акта. Так, например, при производстве работ по установке утяжелителей на одном из магистральных нефтепроводов DN 800 ОАО «Гомельтранснефть Дружба» были использованы утяжелители типа УБО-1020. Установка данных утяжелителей привела к тому, что угол наклона от вертикального положения превысил требуемые 5° и составил 30°. Поэтому потребовалась проверка возможности использования данных утяжелителей с точки зрения обеспечения надежности и безопасности эксплуатации магистрального нефтепровода.

**Основная часть.** *Проведение математического моделирования.* При проведении анализа возможных последствий были выбраны следующие сценарии разрушения конструкции вследствие изменения угла установки утяжелителей:

- увеличение статических напряжений и разрушение соединительных поясов и/или изоляции вследствие уменьшения пятна контакта изоляция–соединительный пояс;
- смятие или истирание изоляционного покрытия магистрального нефтепровода при перемещении соединительного пояса вследствие подвижек грунта и вибрационных воздействий турбулентного потока перекачиваемой нефти.

При рассмотрении возможности реализации первого сценария разрушения было решено создать математическую модель и определить напряженно-деформированное состояние исследуемой системы нефтепровод–утяжелитель. Для создания модели на первом этапе были изучены составные элементы моделируемой системы, их геометрические параметры и характеристики используемых материалов. Для определения составных элементов данной системы использовались рабочие чертежи и технические

условия на изготовление утяжелителей типа УБО-1020 [2; 3], а также технические условия на изготовление труб с заводским антикоррозионным полимерным покрытием, используемых для магистральных нефтепроводов [4]. Основные компоненты и их взаимосвязи представлены на рисунке 1.



1 – нефтепровод; 2 – трехслойная изоляция с защитным покрытием в виде скального листа;  
3 – соединительный пояс; 4 – блоки

Рисунок 1. – Составные элементы модели нефтепровод–утяжелитель типа УБО

Для моделирования были приняты следующие параметры компонентов системы:

- характеристика трубопровода: наружный диаметр – 820 мм, толщина стенки – 10 мм, материал трубопровода – сталь 17ГС;
- характеристика изоляции: заводская трехслойная типа ЗН-1, толщина – 3 мм, защита изоляции – скальный лист;
- соединительный пояс – 1-ПС 1020;
- характеристика блоков утяжелителей ТУ 102-300-81: длина  $L$  – 1500 мм, высота  $h$  – 1100 мм, геометрический объем – 0,907 м куб., объем бетона – 0,73 м куб., вес – 1680 кг.

Моделирование напряженно-деформированного состояния в конструкции проводилось с использованием метода конечных элементов. Анализ конструкций, сборных элементов, деталей и узлов осуществлялся с помощью системы SolidWorks Simulation, которая полностью интегрирована с SolidWorks [5–8]. Такой анализ позволил прогнозировать поведение компонентов в реальной среде путем виртуального тестирования САД-моделей. Помимо всего система обеспечивает анализ напряжения в конструкции, потери устойчивости, оптимизации, частотный и термический анализ, а также позволяет производить аналитические решения задач. В процессе моделирования создавались трехмерные модели всех перечисленных компонентов с соответствующими геометрическими параметрами и характеристиками. Каждый компонент (труба, трехслойная изоляция с защитным покрытием из скального листа, соединительный пояс, блоки) сопрягались друг с другом во взаимосвязях. Подготовленная сборка трехмерной модели всех компонентов представлена на рисунке 2.

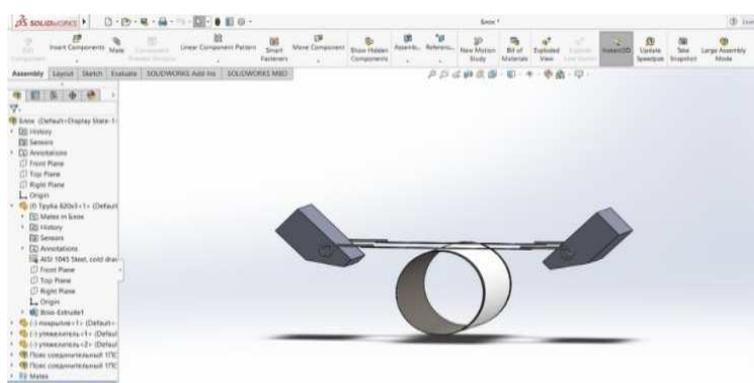


Рисунок 2. – Сборка трехмерной модели

*Процесс «симуляции» напряженно-деформированного состояния системы.* При проведении моделирования рассматривалась статическая линейно-упругая изотропная модель взаимодействия компонентов и использовался встроенный решатель FFEPlus, которому позволялось моделировать в т.ч. и при больших смещениях элементов модели. Для определения напряженно-деформированного состояния использовалось сплошное покрытие расчетной модели сеткой с размером ячейки 60 мм, как это представлено на рисунке 3.

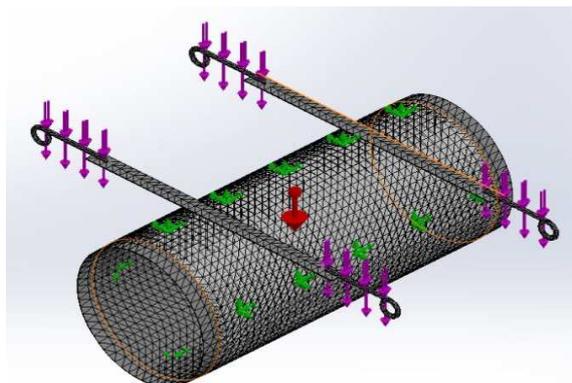


Рисунок 3. – Покрытая сеткой расчетная модель

В результате проведения расчета разработанной модели нефтепровода получено распределение напряжений и деформаций в анализируемых компонентах модели, которые визуальны представлены на рисунке 4.

В результате анализа полученных данных определена площадь пятна контакта соединительного пояса и изолированной поверхности нефтепровода (ширина которого равно 90 мм, длина дуги соприкосновения пояса и изоляции – 260 мм). Изменение угла отклонения утяжелителей в вертикальной плоскости менее  $30^\circ$  в процессе моделирования было запрещено, чтобы не увеличивать возможное пятно контакта и рассмотреть наихудший из возможных вариантов нагружения. Напряжение в металлической ленте соединительного пояса в результате воздействия нагрузки от блоков составит 238 МПа, при этом деформации пояса не наблюдалась. Изоляционное покрытие будет сжато, но его повреждения не произойдет. Дальнейшее моделирование увеличения нагрузки на нефтепровод до разрушения показало, что разрыв соединительного пояса произойдет при напряжениях 715 МПа и деформации (удлинении) пояса на 8,717 мм. При этом повреждения изоляции не наблюдается, а ее деформация (сжатие) составляет 1,38002 мм (рисунок 4).

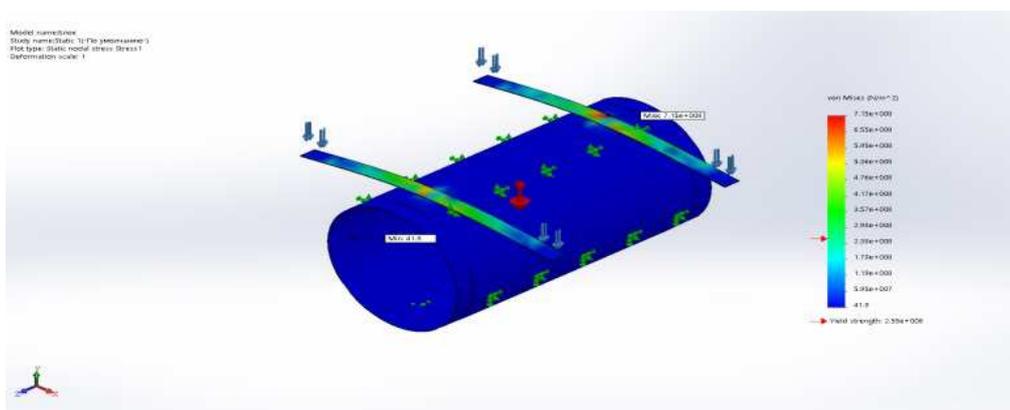


Рисунок 4. – Распределение напряжений в исследуемых компонентах

В результате проведенного расчета статической модели нефтепровода на прочность выявлено, что разрушения изоляции и соединительных элементов не произойдет. Напряжения в соединительных элементах составляют одну треть от напряжений, которые могут разрушить изоляцию. Таким образом, сделан вывод о возможности использования данных утяжелителей исходя из условий прочности при статическом нагружении.

Статическая модель нагружения нефтепровода с утяжелителями не рассматривала его возможные перемещения в результате вибраций и под действием внешних сил. При изменении пространственного положения нефтепровода возможно смещение соединительного пояса по нефтепроводу и повреждение его изоляции вследствие одновременного действия контактных напряжений от сжатия изоляции под действием веса утяжелителей и возникновения напряжений сдвига вследствие перемещения соединительного пояса по нефтепроводу. Оценку возможности повреждения изоляции вследствие трения соединительного пояса

производилась экспериментальным методом на испытательном стенде. Стенд для проведения испытаний представлял собой несущую конструкцию, собранную из элементов универсально-сборных приспособлений. Это позволило получить с одной стороны большую жесткость конструкции, а с другой – простоту монтажа, т.к. все элементы совместимы и взаимозаменяемы. Функционально стенд представлял собой переднюю и заднюю бабки, закрепленные на станине. Общий вид стенда представлен на рисунке 5.



Рисунок 5. – Общий вид испытательного стенда

Передняя бабка, закрепленная на станине слева, представляет собой узел, состоящий из двухступенчатого мотор-редуктора, обеспечивающего регулировку скорости 5–120 об/мин. На выходном валу мотор-редуктора закреплена сменная планшайба, на торце которой закреплен испытываемый образец, выполненный в виде кольца. Данная бабка может совершать только вращательное движение, осевому смещению вала препятствуют подшипники редуктора.

Задняя бабка закреплена на станине слева и представляет собой шток, закрепленный в опоре, с возможностью движения только в осевом направлении. С левой стороны на штоке смонтирована планшайба с закрепленным на ней испытываемым образцом, выполненным в виде диска. С правой стороны на торце штока смонтирован динамометр ДОС-0,2 (2 кН). Для выбора зазора и для создания испытательной нагрузки динамометр поджимается регулируемым упором универсально-сборного приспособления.

Для измерения числа оборотов подвижной планшайбы использовался индукционный датчик, формирующий один импульс за оборот вращающейся планшайбы.

*Описание проведения эксперимента.* Планшайбы с образцами монтировались на штатные места и приводились в соприкосновение посредством смещения штока. За счет регулируемого упора создается нагрузка на образцы 1,5 кН, контролируемая по динамометру. После этого включался мотор-редуктор. В ходе эксперимента контролировалась нагрузка на образцы и при необходимости корректировалась. Количество совершенных оборотов измерялось счетчиком, подсчитывающим импульсы с индукционного датчика. В качестве испытуемого образца использовалось кольцо с нанесенной полиэтиленовой изоляцией толщиной 3 мм, защищенной слоем скального листа. Наружный диаметр кольца составил 60 мм, его ширина 7 мм, что создало напряжения сжатия в изоляции, близкие к определенным по результатам математического моделирования, равные 2,5 МПа. В первом периоде эксперимента наблюдалось значительное сжатие материала скального листа (0,3–0,5 мм), после чего размер стабилизировался. В дальнейшем наблюдался достаточно линейный износ (0,02–0,03 мм) за 30 мин при 20 об/мин (проходимый путь 3,77 м/мин). Далее эксперимент был прекращен, т.к. получаемые результаты позволили сделать вывод об отсутствии значительных повреждений изоляции вследствие трения ленты утяжелителей в процессе эксплуатации.

**Заключение.** Проведенные исследования с использованием разработанной математической модели нефтепровода DN 800 с утяжелителями типа УБО-1020 показали, что напряжения в соединительных поясах утяжелителей и в изоляции нефтепровода не критичны. Работоспособность и долговечность нефтепровода при таком нагружении обеспечивается, трубопровод выдержит вибрацию под действием внешних сил, смещение соединительного пояса не произойдет. Данная работа, проведенная на кафедре трубопроводного транспорта и гидравлики, позволила трубопроводной организации ОАО «Гомельтранснефть Дружба» использовать установку утяжелителей на нефтепроводе под углом наклона от вертикального положения больше 5°.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Строительство магистральных нефтепроводов. Конструкции и балластировка : СТП 09100.20001.012-2018. – Взамен ТКП 419-2012 (09100).
2. Утяжелители бетонные охватывающие для магистральных трубопроводов. Рабочие чертежи. Проект № 999Б. Миннефтегазстрой. Главное техническое управление. Экспериментально-конструкторское бюро.
3. Утяжелители сборные железобетонные охватывающего типа УБО : ТУ 102-300-81. – Введ. 01.11.1981. – М. : ВНИИСТ, 1981. – 69 с.
4. Трубы стальные электросварные диаметром до 1420 мм с наружным антикоррозионным полиэтиленовым покрытием для строительства магистральных нефтепроводов : ТУ 14-3 Р-67-2003. – Введ. 01.09.2003. – М. : ВНИИСТ, 2003. – 33 с.
5. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации / А.А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
6. Dassault Systemes. Новые возможности SolidWorks 2019. – USA : Waltham : Dassault Systemes (DS) SolidWorks Corp., 2019. – 242 с.
7. Бате, Н. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Н. Бате, Е. Вилсон. – М. : Стройиздат, 1982. – 448 с.
8. Голованов, А.П. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций / А.П. Голованов, О.Н. Тюленева, А.Ф. Шигабутинов. – М. : Физматлит, 2006. – 392 с.

Поступила 18.06.2020

**DETERMINATION OF CONDITIONS OF OPERATION OF CONNECTING BELTS  
AT INSTALLATION OF BALLASTING ELEMENTS ON OIL PIPELINE  
AT AN ANGLE OF 30 °**

**L. SPIRIDENOK, A. YANUSHONOK, N. BOGDANOVICH**

*The use of inventory weighting agents intended for larger oil trunk pipelines during the ballasting process violates the requirements of regulatory documents in terms of ensuring their installation angle relative to the vertical. In this regard, the problem arises of determining the possibility of deviation from the requirements of the standards from the point of view of ensuring the safe operation of these structures.*

*The article presents some results of a study of the technical condition of pipelines operating for 44 years. The issues of increasing the reliability of trunk pipelines that have worked for a long time due to reductive heat treatment of ring welded joints are considered. The effectiveness of applying the non-destructive method for controlling the mechanical properties of metal directly on the main pipeline (after heat treatment at specified conditions) is evaluated.*

**Keywords:** *weighting agents (blocks), oil trunk pipeline, connecting belt, mathematical modeling, experimental studies.*