

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.644.074

doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-72-81

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ТРАВЕРСЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ БАЛЛАСТИРОВКИ ПРИ ПРОКЛАДКЕ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Леонид Григорьевич Вайнер<sup>1✉</sup>, Всеволод Михайлович Петкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия

<sup>1</sup> lgvainer@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2460-2340>

<sup>2</sup> seva\_seva2312@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1476-8475>

### Аннотация

Рассмотрены варианты конструкции грузо-подъемных траверс с целью повышения эффективности балластировки нефтегазопроводов. Основным способ прокладки магистральных нефтепроводов - подземный, что может приводить к вытеснению трубопровода грунтовыми водами на поверхность ввиду низкой плотности перекачиваемой среды. Для предотвращения всплытия осуществляют балластировку трубопровода, например, чугунными кольцевыми утяжелителями. Задачи данного исследования заключались в проведении вариативного анализа конструкции траверсы с переменным количеством одновременно перемещаемых полуколец и изменяемым положением точек подвеса с помощью методов компьютерного моделирования. Для решения поставленных задач применялись технологии и инструментарий построения 3D моделей конструкций и расчетов напряженно-деформационного состояния программы *FreeCAD*. Предложены конструкции траверсы в виде двутавра с переставными обоями и комбинированной траверсы перемен-

ной длины, совмещающей конструкции траверс с переставными обоями и телескопической, рассмотрены варианты их использования для разных грузов. Проведен инженерный анализ способности различных конструкций выдерживать нагрузки, действующие со стороны балластирующих устройств УЧК-1420, предложены варианты модернизации конструкции траверсы, обоснована форма её оптимального сечения. Перспективы дальнейших исследований заключаются в оптимизации конструкций траверс для других балластирующих устройств, различающиеся по виду, весу и расположению перемещаемых грузов. Предложенная методика и полученные результаты инженерного анализа грузоподъемной траверсы при балластировке трубопровода могут быть использованы при выполнении подъемно-транспортных работ производственного назначения.

**Ключевые слова:** балластировка, трубопроводы, траверсы, устройство, нефтегазопроводы, напряженно-деформационное состояние.

Ссылка для цитирования:

Вайнер Л.Г. Анализ конструктивных вариантов траверсы для эффективной балластировки при прокладке нефтегазопроводов / Л.Г. Вайнер, В.М. Петкевич // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 4. – С. 72-81. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-72-81.

Original article

Open Access Article

## ANALYSIS OF BRIDLE OPTIONS FOR EFFECTIVE BALLASTING DURING LAYING OF OIL AND GAS PIPELINES

Leonid Grigorievich Vayner<sup>1✉</sup>, Vsevolod Mikhailovich Petkevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pacific National University, Khabarovsk, Russia

<sup>2</sup> Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia

<sup>1</sup> lgvainer@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2460-2340>

<sup>2</sup> seva\_seva2312@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1476-8475>

## Abstract

Design options for bridles are considered in order to increase the ballasting efficiency of oil and gas pipelines. The main method of laying main oil pipelines is underground, which can lead to displacing pipelines by groundwater to the surface due to the low density of the pumped medium. To prevent its ascent, the pipeline is ballasted, for example, with cast-iron ring weights. The tasks of this study are to conduct the analysis of variable designs of a bridle with a variable number of simultaneously movable half-rings and a variable position of the suspension points by evaluating its stress-strain state using computer modeling methods. To solve these tasks, technologies and tools for building 3D models of structures and calculating the stress-strain state of FreeCAD program are used. Double tee designs with adjustable clips and a combined

bridle of variable length, a combined bridle with adjustable clips and a telescopic one are proposed, and options for their use for different loads are considered. Various structures are analyzed technologically for the ability to withstand loads from UCK-1420 ballasting devices; options for upgrading the bridle design are proposed, and the shape of its optimal cross-section is substantiated. The prospects for further research lie in optimizing the bridle designs for other ballasting devices, which differ in type, weight and location of the transported loads. The proposed technique and the obtained results of the engineering analysis of the bridle during pipeline ballasting can be used in carrying out lifting and transport operations for any purpose.

**Keywords:** ballasting, pipelines, bridle, device, oil and gas pipelines, stress-strain state.

## Reference for citing:

Vayner LG, Petkevich VM. Analysis of bridle options for effective ballasting during laying of oil and gas pipelines. *Transport Engineering*. 2026;4:72-81. doi: 10.30987/2782-5957-2026-4-72-81.

## Введение

Одна из проблем, возникающих при строительстве магистральных нефтегазопроводов, заключается в необходимости пересечения обводненных, заболоченных территорий или водных преград [1]. Согласно СТО Газпром 2-2.1-249-2008 на болотах и заболоченной местности газопровод прокладывается под землей. При этом может произойти ситуация, когда подводные переходы газопроводов смещаются относительно своего начального проектного положение по причине повышения плотности жидкой среды, окружающей участки газопровода, или обмерзания наружной поверхности газопровода вследствие транспортирования газа с отрицательной температурой [2–4]. Часто это проявляется в том, что труба всплывает. Эффективным средством предотвращения всплытия труб грунта является балластировка, которая подразумевает применение железобетонных или чугунных утяжелителей, а также контейнеров с грунтом [1-2]. Балластировка актуальна и для полимерных трубопроводов, которые наиболее подвержены отрицательному действию силы выталкивания из-за их низкой плотности [4].

Чугунные утяжелители - дорогостоящи и подвержены внешним воздействиям, прежде всего коррозии [5]. Использование чугунных утяжелителей рациональ-

но, если их стоимость ниже стоимости железобетонных утяжелителей с учетом доставки.

Общее количество утяжелителей для установки на сильно обводненных протяженных участках может достигать десятков и сотен штук [6]. Для поставок газа от крупных и удаленных месторождений необходимое количество утяжелителей, например, модернизированных полимерно-контейнерных балластирующих устройств для трубопроводов диаметром 1420 мм, исчисляется несколькими десятками тысяч [7].

Для каждого объекта строительства требуемое расстояние между утяжелителями является переменным и определяется, исходя из их массы, параметров перекачиваемой среды и размеров трубопровода [7]. Средний шаг расстановки утяжелителей для труб разного диаметра с различными утяжелителями варьируется от 1,4 до 4,3 м (рис. 1 – утяжелители): УБО – бетонный охватывающий, УБКМ – бетонный клиновидный модернизированный, УТК – бетонный кольцевой. Из графика видно, что при увеличении диаметра трубопровода шаг между грузами уменьшается (за исключением начального участка кривых). Как показывают расчеты, шаг между утяжелителями УЧК для участка, представленного в работе [8], может составлять

чуть больше 1 м, длина трубопровода может составлять от 100 до 1500 м. Очевидно, с уменьшением расстояния между гру-

зами значительно увеличивается время на их установку.

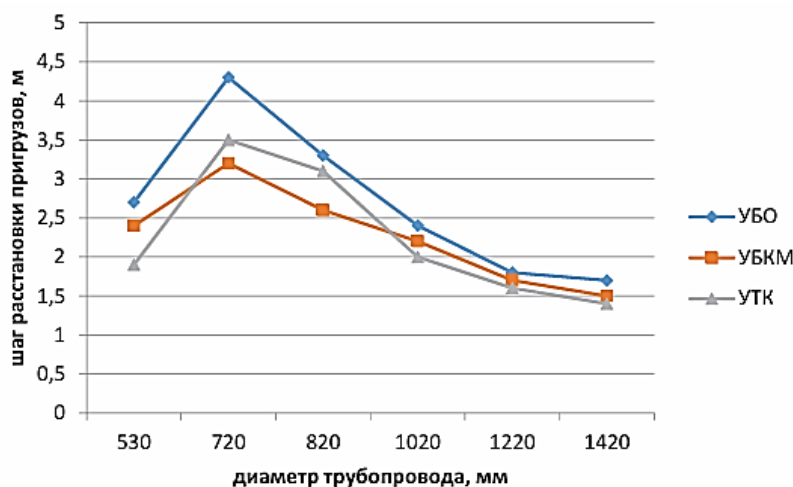


Рис. 1. Расстояние между пригрузами для труб различного диаметра [8]

*Fig. 1. Distance between weights for pipes of various diameters [8]*

В соответствии с используемыми типовыми технологическими картами, например, для утяжелителей УЧК [9] и нормативными документами утяжелители устанавливаются на трубопровод с помощью крана-трубоукладчика или стрелового крана по одной единице. Вначале укладывают нижние полукольца на бровке траншеи. Затем на них укладывают трубопровод, после чего верхние полукольца устанавливают на плетть трубопровода. Поскольку установка по одному утяжелителю требует значительного времени, проблема поиска способов одновременной укладки

нескольких утяжелителей является актуальной, так как ее решение позволяеткратно повысить производительность труда при прокладке нефтегазопроводов. Одним из решений этой проблемы является использование траверсы. Целью данной работы является повышение эффективности балластировки за счет оптимизации конструкции траверсы, позволяющей одновременно перемещать несколько утяжелителей с изменяемым положением точек подвеса, с применением анализа ее напряженно-деформационного состояния (НДС) методами компьютерного моделирования.

### Общая методика расчета траверсы

Расчетный анализ НДС проводился с использованием программы *FreeCAD* (версия 1.0.0), предназначенной для параметрического трехмерного моделирования произвольных механических объектов по критериям прочности и жесткости. За исходную была принята конструкция траверсы с переставными обоймами. Основные заданные параметры при расчете характеристик траверсы - высота, ширина и толщина стенок сечения конструкции, масса, марка стали, модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала траверсы.

В соответствии с конструктивной схемой и внешними нагрузками были по-

строены требуемые 3D модели. Каждая прикладываемая внешняя нагрузка соответствовала массе груза 1100 кг (10791 Н), что соответствует массе полукольца УЧК-1420, широко применяемого в качестве утяжелителя. Схема расположения грузов по длине конструкции показана на рис. 2. Расстояние между грузами принято от 1 до 2 метров.

Эквивалентная твердотельная конструкция траверсы предварительно была представлена в виде сеточной модели в соответствии с используемым методом конечных элементов.

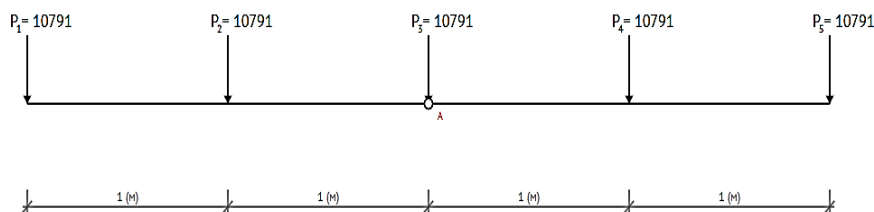


Рис. 2. Расчетная схема траверсы с максимально возможным количеством утяжелителей  
 Fig. 2. Calculated scheme of the traverse with the maximum possible number of weights

В ходе расчетов были определены внутренние механические напряжения и смещения в узловых точках каждого из анализируемых вариантов конструкции. Дифференциация значений этих параметров визуализируется различным цветом. Также были построены наиболее информа-

тивные для сравнительного напряженно-деформационного анализа графики распределения напряжений фон Мизеса. Для корректности и большего обобщения результатов были использованы относительные единицы.

### Вариации формы сечения траверсы с переставными обоями

Для выбора оптимального сечения траверсы с переставными обоями были выбраны три конструкции: двутавр № 16

(рис. 3а), прямоугольный профиль (рис. 3б), труба (рис. 3в).

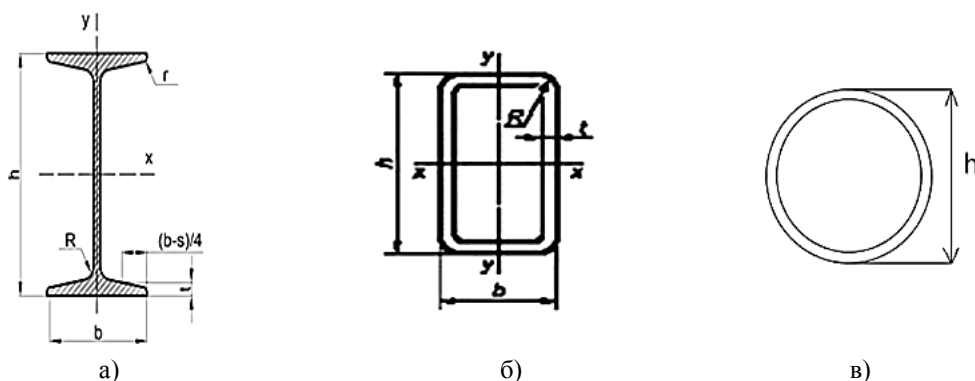


Рис. 3. Рассматриваемые формы поперечного сечения траверсы:

а – двутавр; б – прямоугольный профиль; в – труба

Fig. 3. Considered cross-sectional shapes of the traverse:

a - I-beam; b - rectangular profile; c - pipe

Выбор формы и параметров сечений был проведен с учетом следующих условий: механические и упругие характеристики материалов (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести), а также габаритные размеры сечений приблизительно одинаковы. Размеры и свойства выбранных для анализа профилей приведены в таблице.

В результате предварительных расчетов установлено (рис. 4): максимальные значения внутренних механических напряжений фон Мизеса для всех трёх типов конструкций близки или незначительно превышают предел текучести использу-

емых марок сталей – 225...250 МПа (рис. 5а), что свидетельствует о необходимости увеличения жёсткости конструкции.

Совместный анализ прочностной (рис. 5а) и деформационной (рис. 5б) картины показывает целесообразность использования для траверсы либо двутавра, либо прямоугольного профиля, однако с учетом приведенных в таблице стоимости и массы конструкций (масса конструкции из двутавра меньше на 30 %, а стоимость – на 15 %) при отсутствии других конструкторских ограничений эффективнее использовать конструкцию из двутавра.

## Parameters of the profiles for the traverse

Параметры	Форма сечения		
	Двутавр №16	Прямоугольный профиль	Труба
Высота сечения, h, мм	160	160	178
Ширина сечения, b, мм	81	80	-
Толщина стенки, мм	5	7	6
Марка стали	Ст3сп	09Г2С	С245
Модуль Юнга стали, ГПа	200		
Коэффициент Пуассона стали	0,3		
Предел текучести стали, МПа	205–255	225	245
Масса конструкции длиной 4 метра, кг	63,6	94,1	101,8
Стоимость конструкции длиной 4 метра, рублей	5720	6679	6680

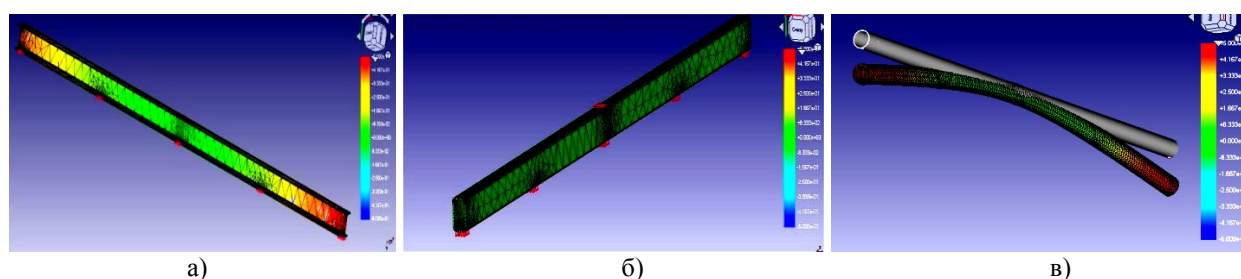


Рис. 4. Примеры результатов расчетов 3D сеточных моделей: а – двутавр; б – прямоугольный профиль; в – труба  
 Fig. 4. Examples of calculation results for 3D grid models: a - I-beam; b - rectangular profile; c - pipe

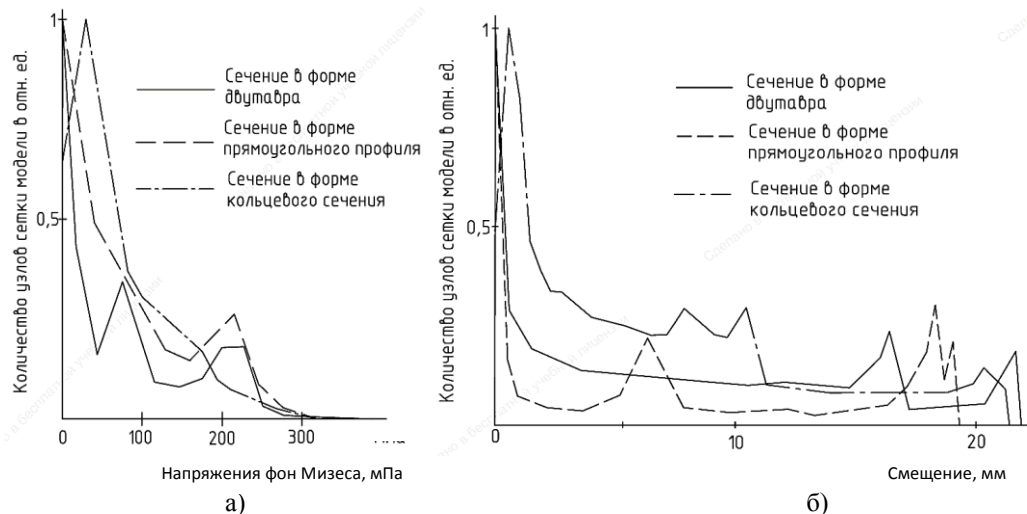


Рис. 5. Графики распределения: а – внутренних механических напряжений фон Мизеса; б – смещений узловых точек  
 Fig. 5. Distribution graphs: a - internal mechanical stresses of von Mises; b - displacements of nodal points

### Анализ несущей способности усиленной конструкции

Для повышения прочности и жесткости траверсы в конструкцию были добавлены дополнительные усиливающие элементы - связи длиной 0,5 м и 0,75 м (рис.

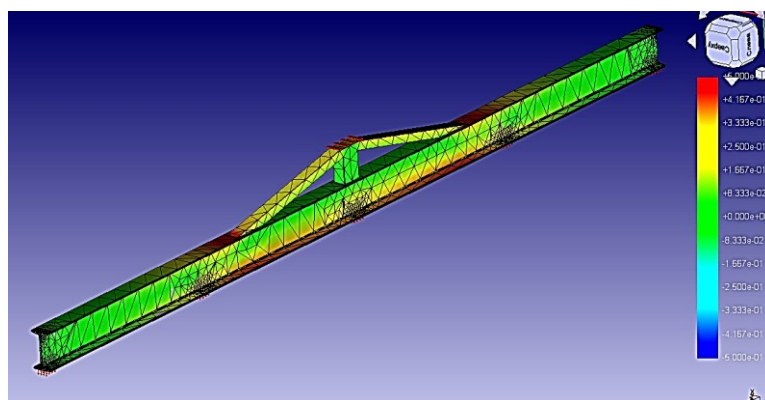
ба) в обе стороны относительно центральной оси.

Приведенные данные расчетов (рис. 6б) при общей длине связей 1 м указывают на снижение максимальных механических

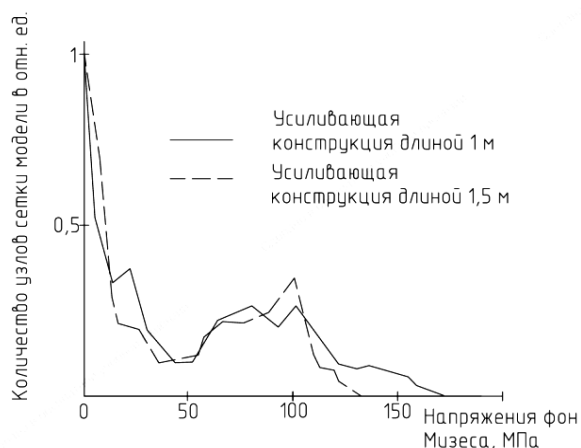
напряжений фон Мизеса в 1,7 раз, уменьшается и максимальная величина смещения узлов в 2 раза (рис. 6в).

Дополнительное удлинение усиливающей конструкции до 1,5 м снижает

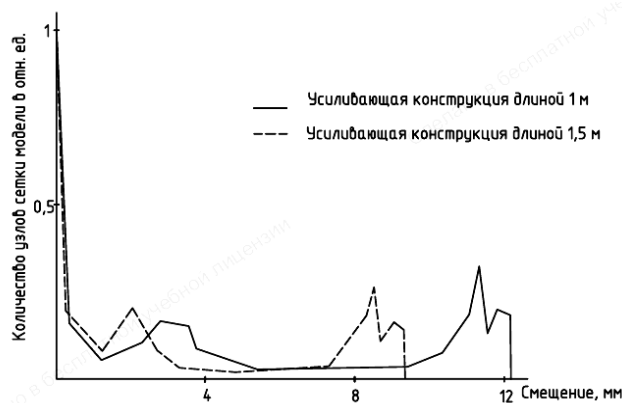
внутренние механические напряжения в 2 раза по сравнению с конструкцией без усиления.



а)



б)



в)

Рис. 6. Результаты анализа НДС усиленной траверсы из двутавра: а – поля распределения напряжений при общей длине связей 1,5 м; б – гистограммы распределения внутренних механических напряжений; в – гистограммы распределения величины смещения узлов модели

Fig. 6. Results of the stress-strain state analysis of a reinforced I-beam traverse: a – stress distribution fields with a total bond length of 1.5 m; b - histograms of the distribution of internal mechanical stresses; c - histograms of the distribution of the displacement of the nodes of the model

Таким образом, дополнительные усиливающие элементы обеспечивают двукратный запас прочности (отношение

предела текучести к максимальным напряжениям) и значительно снижают уровень значений деформации траверсы.

### Анализ возможности использования траверсы переменной длины

В условиях, когда траверсу требуется перевозить или использовать в стесненных условиях, а также для перемещения относительно легких утяжелителей при более длинном шаге грузов, удобнее использовать траверсы с функцией регулировки длины. Для реализации данной функции авторами предложена комбинированная

траверса, состоящая из двух секций прямоугольных профилей (рис. 7). Прямоугольная форма сечения профилей выбрана в связи с тем, что выдвигаемые телескопические элементы подразумевают использование полых конструкций, внутри которых будет происходить перемещение элементов.

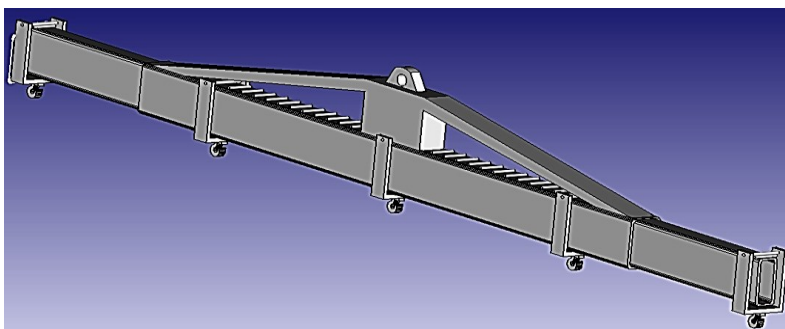


Рис. 7. Общий вид комбинированной траверсы в максимально выдвинутом положении  
 Fig. 7. General view of the combined traverse in maximum working position

Разработанная комбинированная траверса состоит из трех прямоугольных профилей:

- один прямоугольный профиль – центральный, усиленный двумя связями жесткости, длиной 2000 мм, высотой 160 мм, шириной 70 мм и толщиной стенки 7 мм;

- два прямоугольных профиля – боковых длиной 1000 мм каждый, высотой 140 мм, шириной 60 мм и толщиной стенки 7 мм.

Размерные параметры элементов траверсы приняты соответствующими рассмотренным выше примерам и могут варьироваться в зависимости от требуемых параметров балластировки.

Для практического выполнения своих производственных функций в конструкции комбинированной траверсы предусмотрены следующие дополнительные рабочие элементы:

- проушина в верхней части, для крепления траверсы к тросу крана;
- переставные обоймы, оснащенные грузозахватными приспособлениями;
- упоры для фиксации обойм на определенном расстоянии.

### Заключение

В работе приведены результаты вариативного инженерного анализа конструкций траверсы для подъема и перемещения чугунных утяжелителей при балластировке трубопроводов. Предложенные многоместные конструкции обеспечивают многократное повышение производитель-

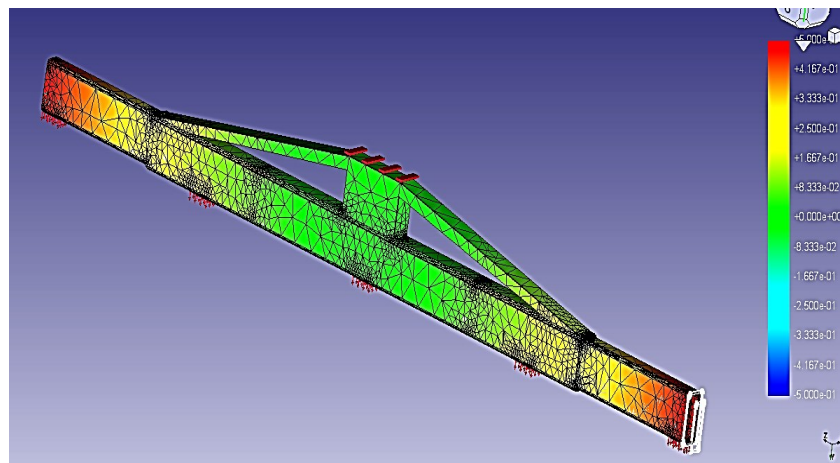
Перемещаемые внутри конструкции телескопические элементы в выдвинутом положении выступают из центральной секции в противоположные стороны на заданное расстояние.

Анализ прочности и жесткости проводился для траверсы в положении убранных и максимально выдвинутых телескопических секций при транспортировке 5 полуколец УЧК-1420 массой 1100 кг.

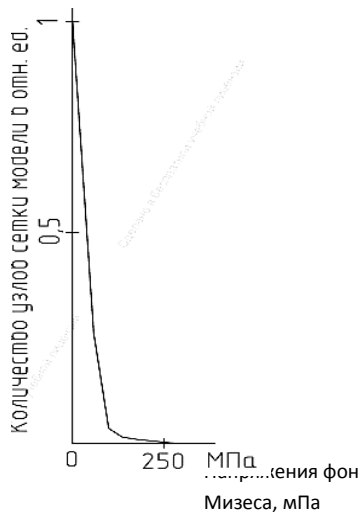
В результате моделирования НДС комбинированной траверсы получены поля распределения напряжений и смещений в узлах (пример приведен на рис. 8а), а также гистограммы напряжений фон Мизеса (рис. 8б) и смещений узлов (рис. 8в).

Полученные данные свидетельствуют о возможности комбинированной траверсы транспортировать одновременно до пяти утяжелителей УЧК-1420 в рабочем положении при выдвинутых несущих элементах. Возникающие напряжения до 130 МПа значительно ниже предела текучести материала конструкции (200...250 МПа), что свидетельствует о достаточном запасе прочности траверсы.

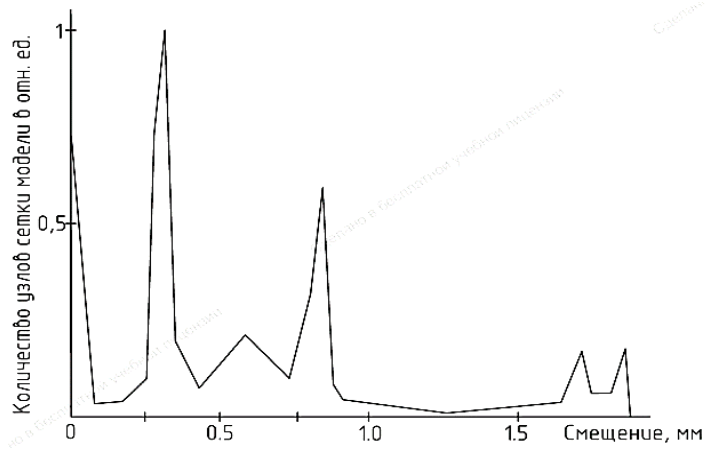
ности, обладают достаточной прочностью и жесткостью. Выбор конкретной конструкции и её размерных параметров зависит от типа и характеристик грузов, а также от расстояния между точками их крепления, определяемых заданными технологическими условиями.



а)



б)



в)

Рис. 8. Результаты анализа НДС комбинированной траверсы: а – поля распределения напряжений;

б – гистограммы распределения внутренних механических напряжений;

в – гистограммы распределения величины смещения узлов модели;

*Fig. 8. Results of the stress-strain state analysis of a combined traverse:*

*a - stress distribution fields; b - histograms of the distribution of internal mechanical stresses;*

*c - histograms of the distribution of the displacement of the nodes of the model*

При рассмотрении конкретного примера было выявлено, что для перемещения типовых чугунных полуколец утяжелителей рационально использовать конструкции с сечением в виде двутавра № 16 и прямоугольного профиля высотой 160 мм, позволяющие закрепить до 5 полуколец УЧК-1420 при общей длине траверсы 4000 мм.

Для повышения запаса прочности и жесткости конструкций предложены и рассчитаны усиливающие элементы, увеличивающие запас прочности конструкции в 1,7 или 2 раза, в зависимости от длины элементов.

При отсутствии размерных ограничений самым простым и экономичным вариантом является использование траверсы из двутавра с переставными обоями. При недостаточной жесткости или прочности необходимо использовать траверсу усиленной конструкции.

При наличии размерных ограничений, связанных с транспортировкой или хранением, целесообразно использовать комбинированную телескопическую траверсу переменной длины с широким рабочим диапазоном значений шага утяжелителей.

Изложенные в работе методики и результаты компьютерного инженерного

анализа могут служить основой для разработки производственных технологических рекомендаций при проектировании работ по балластировке трубопровода с

произвольными размерно-весовыми параметрами, а также для оптимизации конструкций траверс при подъеме и перемещении других категорий грузов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гулин Д. А., Шамилов Х. Ш., Хасанов Р. Р. и др. О закреплении подземных магистральных трубопроводов на болотах. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 3. С. 330-345.
2. Гусев А. А., Локтев А. В., Малахов А. В. Особенности проектирования магистральных газопроводов на обводненных участках. Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2017. № 3 (118). С. 127-134.
3. Пазиняк В. В., Кутвицкая Н. Б., Минкин М. А. Экспериментальные исследования устойчивости трубопроводов на крупномасштабной фунтовой модели. Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 1. С. 51-55.
4. Кушнир С. Я., Пульников С. А., Сысоев Ю. С. Пространственная устойчивость подземного магистрального газопровода на обводненных участках трассы. Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 1. С. 72-76.
5. Сыгуров Г. Способы балластировки полимерных трубопроводов. Полимерные трубы. 2014. № 4(46). С. 52-53.

6. Паршаков И. А. Анализ методов закрепления нефтепроводов в грунте на обводненных участках. Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 1. С. 26-32.
7. Кузьбожев А. С., Работинская Т. И., Шишкин И. В. и др. Диагностирование устойчивости теплоизолированных газопроводов при эксплуатации на мерзлых грунтах. Вести газовой науки. 2020. № 1 (43). С. 98-103.
8. Серебренников Д. А., Столяренко Ю. Н. Анализ причин отказов балластирующих устройств магистральных трубопроводов. Новая наука: от идеи к результату. 2016. № 1-2. С. 191-194.
9. Чучин А. О., Калошина С. В., Золотозубов Д. Г. Балластировка участков магистральных трубопроводов, проходящих через водные преграды. Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2022. № 2. С. 88-99.

## REFERENCES

1. Gulin DA, Shamilov HSh, Khasanov RR. About fixing underground main pipelines in marshes. Petroleum Engineering. 2015;3:330-345.
2. Gusev AA, Loktev AV, Malakhov AV. The design details of gas main pipelines for the watered grounds. Trudi of NSTU named after R. E. Alekseev. 2017;3(118):127-134.
3. Pazinyak VV, Kutvitskaya NB, Minkin MA. Experimental studies of pipeline stability on a large-scale pound model. Earth's Cryosphere. 2006;10(1):51-55.
4. Kushnir SYa, Pulnikov SA, Sysoev YuS. Spatial stability of the underground gas main pipeline in watered sections of the route. Oil and Gas Studies. 2012;1:72-76.
5. Sygurov G. Methods of ballasting plastic pipelines. Plastic Pipes. 2014;4(46):52-53.

6. Parshakov IA. Analysis of methods for fixing oil pipelines in the ground of flooded areas. Modern Technologies in Construction. Theory and Practice. 2019;1:26-32.
7. Kuzbozhev AS, Rabodinskaya TI, Shishkin IV. Diagnostics of the stability of thermally insulated gas pipelines during operation on frozen soils. Gas Science Bulletin. 2020;1(43):98-103.
8. Serebrennikov DA, Stolyarenko YuN. Analysis of the causes of failures of main pipeline ballasting devices. New Science: From Idea to Result. 2016;1-2:191-194.
9. Chuchin AO, Kaloshina SV, Zolotozubov DG. Ballasting of sections of trunk pipelines passing through water barriers. Construction and Geotechnics. 2022;2:88-99.

## Информация об авторах:

**Вайнер Леонид Григорьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы промышленной инженерии Политехнического института Тихоокеанского государственного университета, Scopus-Author ID: 7004052035, Author-ID-РИНЦ: 119940, тел. +79145415149.

**Петкевич Всеволод Михайлович** – инженер кафедры «Физика и теоретическая механика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, тел. +79098747993.

**Vayner Leonid Grigorievich** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Higher School of Industrial Engineering of Pacific National University, Scopus-Author ID: 7004052035, Au-thor-ID-RSCI: 119940, phone: +79145415149.

**Petkevich Vsevolod Mikhailovich** – Engineer of the Department of Physics and Theoretical Mechanics at Far East State Transport University, phone: +79098747993.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.  
Article published in Open Access mode.**

**Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 27.03.2026. Рецензент – Шальгин М.Г., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».**

**The article was submitted to the editorial office on 26.01.2026; approved after review on 17.03.2026; accepted for publication on 27.03.2026. The reviewer is Shalygin M.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.**