

## Моделирование распределения нагрузки металлоконструкций вантового перехода при разбалансировке усилий тросовой системы

*К.Р. Муратов, Р.А. Соколов, Р.Ф. Сафаргалиев, Р.А. Мамадалиев*

*Тюменский индустриальный университет*

**Аннотация:** В работе рассматриваются результаты моделирования тросовой системы надводного вантового перехода магистрального газопровода при помощи лабораторной установки и компьютерного моделирования с использованием методов конечных элементов. Приведены основные характеристики материалов и конструктивные элементы, используемые для создания компьютерной и лабораторной модели. Изучены различные режимы натяжения тросовой системы, влияющие на дальнейшее эксплуатирование рассматриваемой модели, позволяющие определить срок эксплуатации объекта. Показано, что при незначительном ослабевании натяжения одного из тросов, в тросовой системе, в теле трубы наблюдается возникновение напряжений, величина которых при определенных условиях может сильно превышать рабочие значения. Небольшой разбаланс усилий приводит к перераспределению усилий и перекосу всей конструкции, что при циклических нагрузках может привести к преждевременному выходу из строя рассматриваемого объекта.

**Ключевые слова:** вантовый переход, напряженно-деформированное состояние, тросовая система, метод конечных элементов, модель, нагрузка, усилие.

Техническое диагностирование стальных конструкций, имеющих сложную систему распределения нагрузки, представляет достаточно высокую сложность. Основная нагрузка в таких системах распределяется между различными ее элементами. Часто нагрузка в конструкции распределена не однородна, что может приводить к появлению напряженно-деформированного состояния (НДС) в отдельных частях, в которых становится необходимым контролировать ее величину, так как действующие значения напряжения могут превышать предел текучести, что может привести к нарушению целостности конструкции и возникновению аварийной ситуации [1-3].

Особый интерес представляют стальные конструкции, имеющие в своей основе тросовые системы, которые несут основную нагрузку [2-4]. С точки зрения механики подобные конструкции представляют собой колебательную систему, имеющую упругие связи. В такой системе со сложным взаимодействием между составляющими её элементами, при

любом изменении могут произойти внештатные ситуации, предсказать которые достаточно сложно ввиду наличия множества связанных факторов [1, 5, 6].

Для предотвращения возникновения аварийных ситуаций, на объектах такого характера, необходимо проводить всесторонние исследование текущего состояния, включающие работы по контролю НДС [6,7]. Такое исследование возможно провести как непосредственно на объекте в условиях эксплуатации, используя различные методики [8,9], так и при помощи моделирования, разрабатывая цифровой двойник или проводя лабораторные испытания [7]. Моделирование позволяет получить данные об объекте исследования при различных условиях эксплуатации, не подвергая опасности реальный объект исследования.

Для математического моделирования напряжений и деформаций возникающих, а также других процессов используются различные программные комплексы, например, Comsol Multiphysics, позволяющие провести инженерный анализ и моделирование методом конечных элементов (МКЭ) [10].

В качестве объекта моделирования выбран надводный вантовый переход магистрального газопровода (рисунок 1)

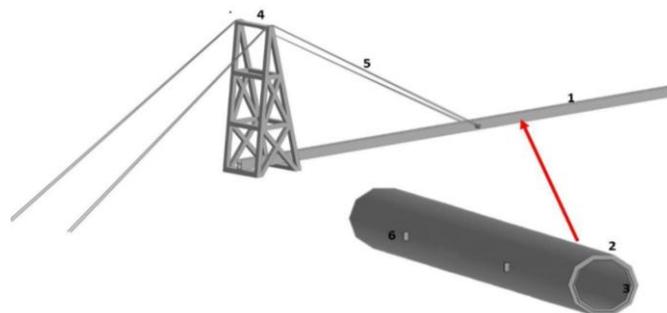


Рис. 1. Модель надводной части вантового перехода: 1 – переход (труба с защитным кожухом), 2 – кожух с изоляцией, 3 – труба, 4 – ванта, 5 – тросы, 6 – конструктивные элементы для крепления тросов.

3D-модель составляющих элементов конструкции создана в среде проектирования САПР КОМПАС 3D.

Процесс дальнейшего моделирования заключается в переносе разработанной в САПР программе геометрической модели, в среду математического моделирования, использующую МКЭ.

Для составляющих элементов модели конструкции в среде математического моделирования необходимо задать свойства материалов, используемых в конструкциях реального вантового перехода. Это условие необходимо выполнить для проведения точных расчётов напряжений и деформаций, возникающих в различных частях модели.

Для имитации неоднородности усилий в системе поддержки в модель была добавлено дополнительное усилие, значение которой можно изменять, а, следовательно, можно изменять и составляющие данной силы по трем осям координат.

После выполнения расчётов становятся доступны графические изображения картины распределения напряжений в конструкции (Рис. 2). Цветовая шкала соответствует различной величине напряжений. Деформация элементов отображается в виде смещения их частей относительно первоначальных положений.

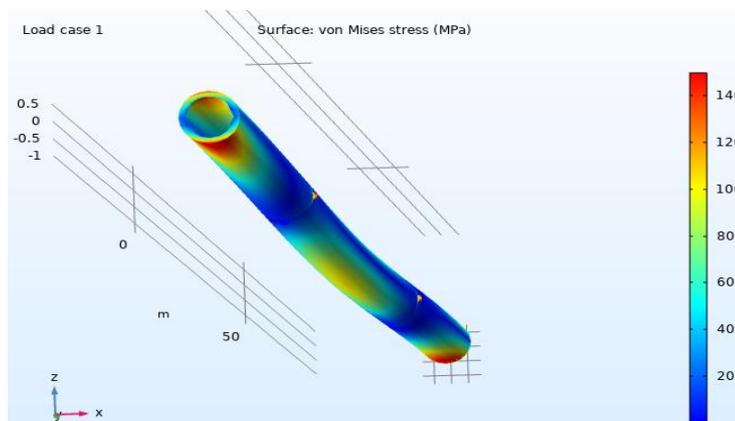


Рис. 2. Напряжения и деформации в математической модели вантового перехода, возникающие при изменении силы, создаваемой тросовой системой

По полученным картинам распределения НДС показывают, что основные напряжения при равномерной нагрузке тросов возникают в месте крепления трубы. Величина напряжений в состоянии равномерного распределения усилий не превышает предела текучести, максимальное значение достигает 90 МПа. При возникновении разбаланса усилий, величина возникающих напряжений возрастает и может достигать порядка 160 МПа в центральной части и в местах крепления.

Поведение тросов достаточно сложно смоделировать при использовании методов конечных элементов, т.к. данные элементы конструкции зачастую являются многосоставными и имеют сложную геометрию, связанную с их навивкой. Именно по этой причине для анализа влияния разбаланса усилий на данные элементы конструкции была изготовлена лабораторная модель, представленная на рисунке 3.

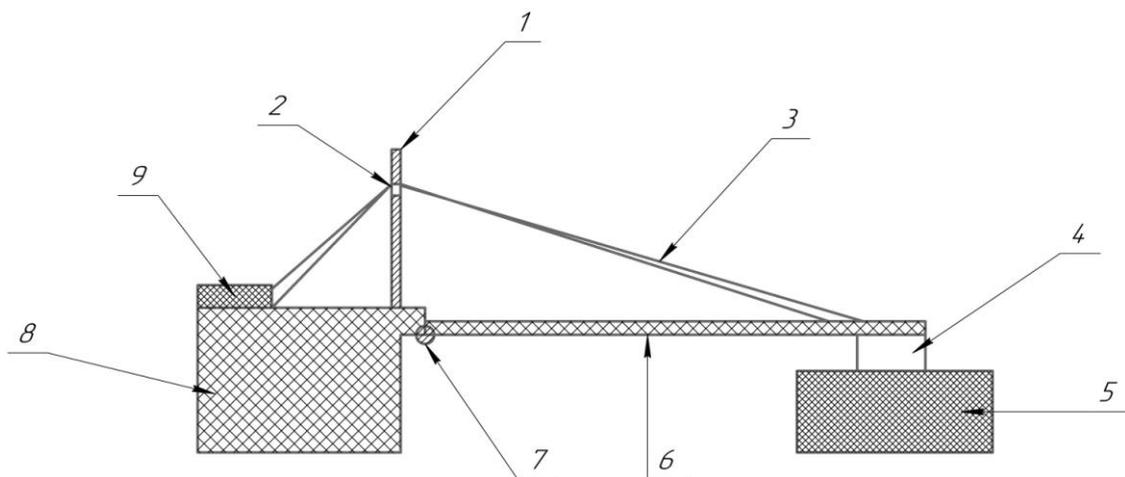


Рис. 3. Модель установки для выполнения лабораторного исследования различных режимов натяжения тросов: 1-вертикальные стальные стойки; 2- горизонтальная опора из мягкого металла; 3- металлические тросы диаметром 2мм с установленными пружинами; 4- демпфер из вспененного

полиуретана; 5- лабораторные весы с точностью определения массы 0,001 гр;  
6- Тело трубы; 7- шарнирный механизм; 8- основание; 9- натяжная система

Полученные данные изменения усилий и напряжений в центральной части тела трубы представлены на рисунке 4.

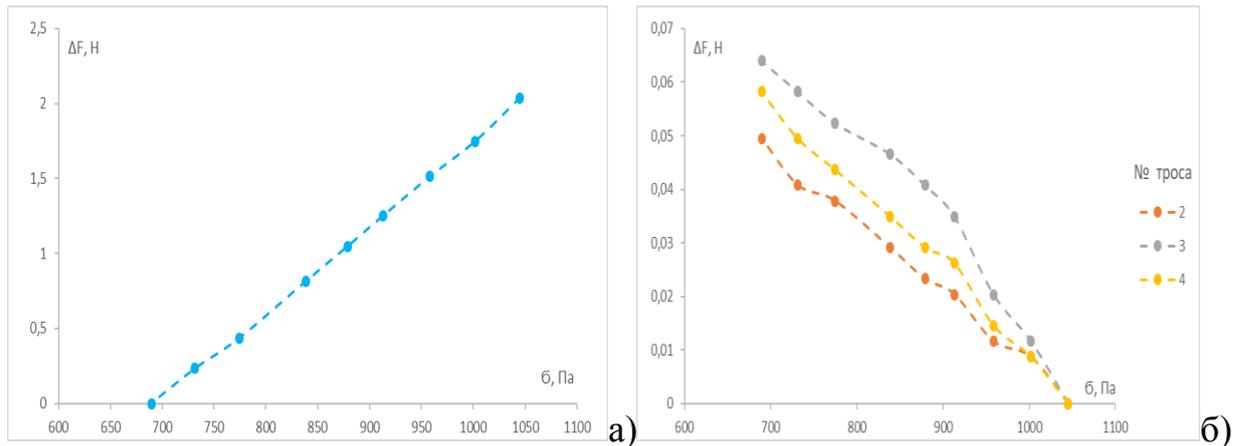


Рис. 4. – Зависимость величины силы натяжения троса от нагрузки на тело трубы: а) трос №1; б) трос №2-4

Из опытов на модели видно, что, при нагружении первого троса, происходит уменьшение усилий на соседних тросах. Выравнивание усилий происходит в рассматриваемой модели при 710 Па. Так как тросы в рассматриваемой системе находятся в парах, при ослаблении одного из них доля нагрузка уходит на соседнюю пару тросов, тем самым происходит выравнивание сил натяжения вант. Однако происходит перекос тела трубы, что приводит к увеличению касательных нагрузок. При этом возможен процесс торможения тросов на пилоне, о чем говорит нелинейность полученных зависимостей.

Как можно заметить из приведенных данных, изменение в силе натяжения тросов №2-4 на несколько порядков ниже, чем изменение силы натяжения троса №1.

Полученные данные позволяют судить о поведении отдельных элементов в конструкции сложной системы поддержки. В результате анализа полученных данных, можно сделать следующее заключение.

Основные напряжения при равномерной нагрузке тросов возникают в месте расположения трубы на берегах и ее центральной части. Величина напряжений не превышает предела текучести, но достигает до 90 МПа. При полном отсутствии воздействия со стороны одного из тросов в паре тросовой системы, величина возникающих напряжений возрастает и достигает порядка 190 МПа, что, при использовании некоторых видов конструкционной стали, сопоставимо с началом предела текучести. По мере увеличения воздействия со стороны тросов 1-2, наблюдается выравнивание картины распределения напряжений в теле трубы и уменьшение ее максимальных значений. По мере увеличения усилий со стороны троса с низкой силой натяжения наблюдается уменьшение величины стрелы прогиба трубы. Недостаточные усилия в натяжении одного троса приводят к перекосу распределения нагрузок и возникновению дополнительных касательных напряжений. Нагрузка в таком случае в большей степени распределяется на соседнюю пару тросов. Данные, полученные при модельных экспериментах, показывают характер разгрузки тросовой системы, и позволяют прогнозировать изменение сил натяжения тросов в связанной системе.

*Авторы благодарят за поддержку данного исследования национальный проект «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FEWN-2021-0012).*

### Литература

1. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
2. Ахмедов А.Д. К расчету опорного контура радиально-вантовой двухпоясной системы // Альманах современной науки и образования. Тамбов. 2014. № 5-6 (84). С. 27–35.

3. Лисин Ю.В., Эрмиш С.В., Махутов Н.А., Неганов Д.А., Варшицкий В.М. Влияние напряженно-деформированного состояния на предельное состояние трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. Т. 7. № 4. С. 12-16.

4. Бугаев В.Я. Исследование вопросов проектирования вантово-балочных мостовых систем: Автореф. дис. канд. техн. наук. Л., 1975. 26 с.;

5. Yu Y., Chen Z., Liu H., Wang X. Finite element study of behavior and interface force conditions of seven-wire strand under axial and lateral loading // Construction and Building Materials. 2014. V. 66. pp. 10-18.

6. Даненко, В. Ф., Гуревич Л. М. Моделирование напряженно-деформированного состояния канатов закрытой конструкции при растяжении и кручении // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 1. С. 2-9. URL: Doi: 10.31044/1814-4632-2021-1-2-9.

7. Соколов Р. А., Муратов К. Р. Моделирование воздействия одноосных сжимающих напряжений на образец круглого сечения // Материалы Международной научно-практической конференции молодых исследователей им. Д.И. Менделеева, посвященной 10-летию Института промышленных технологий и инжиниринга, Тюмень, 22–26 октября 2019 года / Ответственный редактор А. Н. Халин. Том 3. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 118-119.

8. Muratov K., Novikov V., Neradovsky D., and Sokolov R. Cyclic load amplitude dependence of magnetoelastic power relaxation parameters for the 30Kh13 steel at various tempering temperatures. AIP Conference Proceedings 2053. 030045 (2018). URL: doi.org/10.1063/1.5084406.

9. Быков, Л. И., Бешерян З. А. Исследование деформативности и напряженного состояния надземных трубопроводов на многолетнемерзлых грунтах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и

нефтепродуктов. 2019. № 2(118). С. 81-90. – URL: Doi 10.17122/ntj-oil-2019-2-81-90.

10. Comsol Multiphysics User's Guide. Version 4.2, 2011. URL: comsol.ru

### References

1. Rabotnov Ju.N. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. M.: Fizmatgiz, 1962. 456 p.

2. Ahmedov A.D. K. Al'manah sovremennoj nauki i obrazovanija. Tambov. 2014. № 5-6 (84). pp. 27–35;

3. Lisin Yu.V., Ermish S.V., Makhutov N.A., Neganov D.A., Verzhbitsky V.M. Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov. 2017. T. 7. № 4. pp. 12-16;

4. Bugaev V.Ja. Issledovanie voprosov proektirovanija vantovo-balochnyh mostovyh sistem [Study of design issues of cable-stayed-beam bridge systems]: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. L., 1975. 26 p.

5. Yu Y., Chen Z., Liu H., Wang X. Construction and Building Materials. 2014. V. 66. pp. 10-18.

6. Danenko, V. F. , Gurevich L. M. Deformacija i razrushenie materialov. 2021. № 1. pp. 2-9. URL: DOI: 10.31044/1814-4632-2021-1-2-9.

7. Sokolov R. A., Muratov K. R. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii molodyh issledovatelej im. D.I. Mendeleeva, posvjashhennoj 10-letiju Instituta promyshlennyh tehnologij i inzhiniringa, Tjumen', 22–26 oktjabrja 2019 goda. Otvetstvennyj redaktor A. N. Halin. Tom 3. Tjumen': Tjumenskij industrial'nyj universitet, 2019. pp. 118-119.

8. Muratov K., Novikov V., Neradovsky D., and Sokolov R. AIP Conference Proceedings 2053. 030045 (2018). URL: doi.org/10.1063/1.5084406.



9. Вукон, Л. И., Бешержан З. А. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov. 2019. № 2(118). pp. 81-90. URL: DOI 10.17122/ntj-oil-2019-2-81-90.
10. Comsol Multiphysics User's Guide. Version 4.2, 2011. URL: comsol.ru.