

УДК 622.692.4

**К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ БАЛОЧНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ПЕРЕХОДА**

**THE QUESTION OF MODELING AND EXPERIMENTAL RESEARCH
OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE BEAM CROSSING**

Котов М. Ю., Быков Л. И.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
г. Уфа, Российская Федерация

M. Yu. Kotov, L. I. Bykov

FSBEI NPE “Ufa state petroleum technological university”, Ufa, Russian Federation

e-mail: mkotov@inbox.ru

Аннотация. При эксплуатации многопролетных балочных трубопроводных переходов их реальная работа на практике, как правило, может отличаться от расчетной (изменение высотного положения опор ввиду их выпучивания на мерзлоте или просадки на болотах и др.). В связи с этим возникает задача оценки достоверности расчетных методик, одним из наиболее эффективных способов решения которой является экспериментальное исследование действительных условий работы перехода. В статье приведены результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния балочного трубопроводного перехода. Исследование производилось при помощи тензометрического оборудования, подробно описан ход эксперимента и его итоги. Изучен вопрос, связанный с изменением высотного положения опор с целью создания равнопрочной конструкции. Определены расхождения между экспериментальными и расчетными значениями напряжений, позволяющие судить об адекватности полученных результатов.

Abstract. In the process of exploitation the real work of the multi-span beam crossings may, as a rule, differ from the pre-calculation (the change in the altitude position of supports due to their bellying in frost or sagging on the muskeg, etc.). In this connection there is the problem of estimating the reliability of calculation methods. One of the most effective ways to solve it is the experimental study of the actual conditions of a crossing. The results of an experimental study of the stress-strain state of the girder-type pipeline. The study was carried out with strain gauge equipment, is described in detail the progress of the experiment and its results. Examine issues related to changes in the situation of high-rise towers to create equiresistant design. Identified

discrepancies between the experimental and calculated values of the stress, allowing to judge the adequacy of the results.

Ключевые слова: балочный трубопроводный переход, экспериментальное исследование, моделирование, напряжения, тензометрирование, оптимизация, эффективность.

Keywords: girder-type pipeline overpass, experimental study, modeling, strain, strain measurement, optimization, efficiency.

Расчет многопролетного балочного трубопроводного перехода в настоящее время достаточно часто выполняется с использованием современного программного обеспечения, позволяющего реализовать различные способы расчета. Одним из таких способов является метод сил со всеми присущими ему предпосылками и гипотезами. На его основе кафедрой «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ» Уфимского государственного нефтяного технического университета разработана программа VSPOptimize, позволяющая достаточно эффективно производить оценку напряженно-деформированного состояния балочного трубопроводного перехода [1].

Реальная же работа перехода на практике может отличаться от расчетной (изменение высотного положения опор ввиду выпучивания на мерзлоте или просадки на болотах, перенагружение пролетов и др.). В связи с этим возникает задача оценки достоверности расчетных методик, одним из наиболее эффективных способов решения которой является экспериментальное исследование действительных условий работы перехода.

Используя теорию моделирования, получили, что с целью имитации напряженно-деформированного состояния реального трубопроводного перехода диаметром 820 мм с толщиной стенки 14,6 мм и длиной пролета 50 м можно использовать стальную трубу 28x0,5 мм с длиной пролета 1,7 м. Для достижения в модельной трубе тех же значений напряжений, что и в реальном переходе, необходимо к модельному трубопроводу приложить распределенную нагрузку интенсивностью 104 Н/м.

Таким образом, для исследований выбран 4-х пролетный балочный переход с двумя консолями. По заданным условиям авторами сконструирована экспериментальная установка, схема которой изображена на рисунке 1. Длина пролета равна 1,7 м, консоли – 0,6 м, общая длина модельного трубопровода составляет 8 м.

С целью исключения возможных погрешностей измерения, связанных с деформацией основания, модель трубопроводного перехода крепилась на станине, сваренной из стальной профильной трубы. Впоследствии на изготовленное основание были установлены опорные элементы под трубопровод, конструкция которых позволяла бы изменять как высотное положение опор, так и расстояние

между ними. Тем самым была создана возможность моделирования трубопроводных переходов с различными параметрами.

В качестве измерителей напряжений применялись проволочные тензорезисторы на бумажной подложке, наклеенные вдоль верхней и нижней образующей трубы, моделирующей переход. Измерения напряжений проводились в сечениях, соответствующих серединам пролетов и опорам трубопровода (9 сечений). Для устранения теплового эффекта использован активно-компенсационный метод, в котором активный тензорезистор крепится к самому трубопроводу, а компенсационный – к компенсационному блоку, на который воздействие не оказывается, но при этом он находится в тех же температурных условиях, что и объект измерения, и изготовлен из того же материала, что и сама модель [2]. Роль компенсационного блока играет отрезок аналогичной трубы, закрепленный отдельно. Компенсационный тензодатчик обладает теми же параметрами, что и рабочие датчики. Таким образом, при проведении эксперимента показания регистрировались по 19 датчикам (18 рабочих и 1 компенсационный), каждые 6 из которых объединены в группы (3 группы по 6 датчиков). Каждый датчик из группы соединен с прибором измерения относительной деформации согласно схеме подключения.

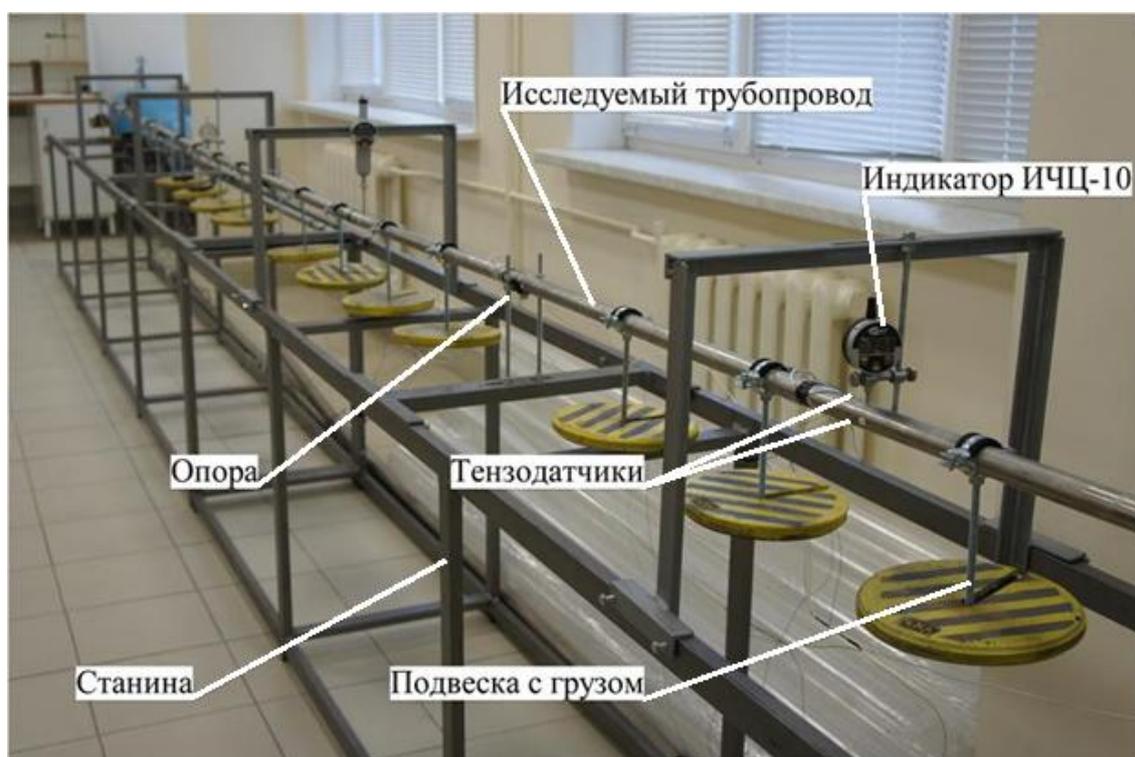


Рисунок 1. Общий вид установки

В середине каждого пролета с помощью индикаторов ИЧЦ-10, установленных на специальных штативах, измерялся прогиб трубопровода от действия собственного веса и распределенной нагрузки.

Технология наклейки тензорезисторов осуществлялась по рекомендациям завода-изготовителя. Для измерения выходных сигналов тензорезисторов и представления результатов измерений деформаций в цифровом виде использован прибор ИТЦ-03-32. Согласно техническому описанию диапазон измеряемых деформаций прибора составляет от 0 до 9999 единиц относительных деформаций (еод). Цена одной единицы показаний прибора равна 1 еод, следовательно, абсолютная погрешность измерителя деформаций ИТЦ-03-32 определяется половиной цены деления и равна 0,5 еод.

Напряжения, возникающие в сечениях трубы, вычисляются путем перемножения разности величин относительной деформации тензодатчиков по показаниям прибора на тарировочный коэффициент, получаемый в результате тарировки тензодатчика на балке равного сопротивления.

Проведение эксперимента выполнялось в следующем порядке. До установки трубы на опоры была произведена выверка их высотного положения. Таким образом, первые измерения были получены при одинаковом высотном положении опор и отсутствии дополнительной распределенной нагрузки. Полученные показатели единиц относительной деформации каждого датчика вносились в журнал измерений и впоследствии обрабатывались для получения конкретных значений напряжений в каждом сечении.

Для выполнения следующего этапа к модельному трубопроводу была приложена распределенная нагрузка интенсивностью 104 Н/м. Нагрузка прикладывалась путем навешивания мерных грузов на специальные подвески. Количество подвесок на пролете – 4 шт, на консоли – 1 шт, масса каждого груза на полете – 4,2 кг, на консоли – 6,4 кг.

Значения величин прогибов трубы в серединах пролетов, получаемые по четырем индикаторам и значения деформаций тензодатчиков, получаемых по показаниям ИТЦ-03-32, вносились в журнал измерений.

С целью определения конкретных значений напряжений в сечениях трубопровода была произведена тарировка тензодатчиков (рисунок 2).

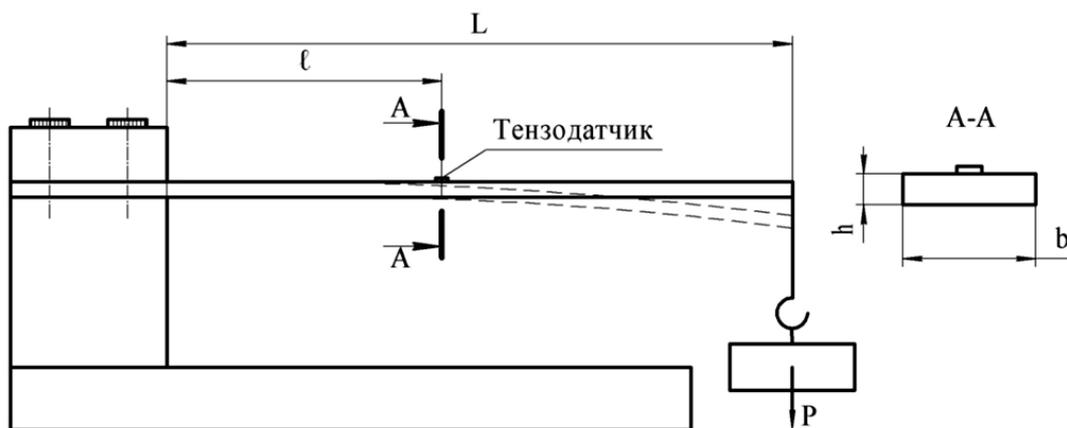


Рисунок 2. Схема установки для тарировки датчиков

Результаты тарировки приведены в таблице 1.

Величина напряжений σ , соответствующая 173 делениям измерителя деформации при толщине балки $h=8$ мм, $b=33,7$ мм, $l=182,2$ мм, $L=414,5$ мм равна [3]:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot P(L-l)}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot 101,54 \cdot (414,5-182,2) \cdot 10^{-3}}{33,7 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 65,62 \text{ МПа.} \quad (1)$$

Таблица 1. Результаты тарировки

№	Вес груза P, Н	Показания прибора, еод	Разность показаний, еод	Напряжения σ , МПа
1	0	317	0	0
2	21,68	353	36	13,68
3	41,57	388	71	26,98
4	61,59	422	105	39,90
5	81,68	456	139	52,82
6	101,54	490	173	65,62

Таким образом, цена 1 еод равна:

$$k = \frac{65,62}{173} = 0,38 \quad (2)$$

Значения напряжений, полученные для других весов груза внесены в таблицу 1. Таким образом, для определения напряжения в конкретном сечении трубопровода необходимо разность между показаниями датчиков без нагрузки и с нагрузкой умножить на тарировочный коэффициент k , равный 0,38. Полученные значения напряжений в каждом сечении внесены в таблицу 2. В эту же таблицу внесены экспериментальные значения напряжений, полученные при помощи расчета по программе VSPOptimize, а так же показано расхождение этих значений, выраженное в процентном отношении.

На рисунке 3 приведены экспериментальные схемы с эпюрами напряжений, на которых точками обозначены значения напряжений, полученные экспериментальным путем.

Исследования, результаты которых приведены в статье [1] показали, что при помощи перемещения опор по вертикали можно искусственно создать дополнительные изгибающие моменты, которые, складываясь с моментами в расчетных сечениях, изменяли бы их в нужном направлении. При помощи программы VSPOptimize получены значения высотных положений опор, при которых наша экспериментальная балочная конструкция становится

равнопрочной. Для этого 1-ю и 5-ю опоры необходимо сместить на 25 мм вверх, 2-ю и 4-ю на 9 мм вниз, 3-ю опору на 20 мм вниз [4].

Такие же высотные положения опор относительно первоначального положения (опоры на одном уровне) были выставлены на экспериментальной установке (рисунок 3 б). После чего сняты показания индикаторов и тензодатчиков и вычислены значения напряжений.

Таблица 2. Значения напряжений при расположении опор на одном уровне

№ Тензодатчика	Расчетное значение напряжения в сечении σ_p , МПа	Экспериментальное значение напряжения в сечении σ_s , МПа	Расхождение, %
1, 2	-50,45	-66,15	+23,7
3, 4	67,23	52,64	-27,7
5, 6	-95,30	-94,90	-0,4
7, 8	48,83	42,70	-14,4
9, 10	-88,00	-85,31	-3,2
11, 12	50,64	42,70	-18,6
13, 14	-88,95	-94,90	+6,3
15, 16	55,85	52,64	-6,1
17, 18	-50,92	-66,15	+23,0

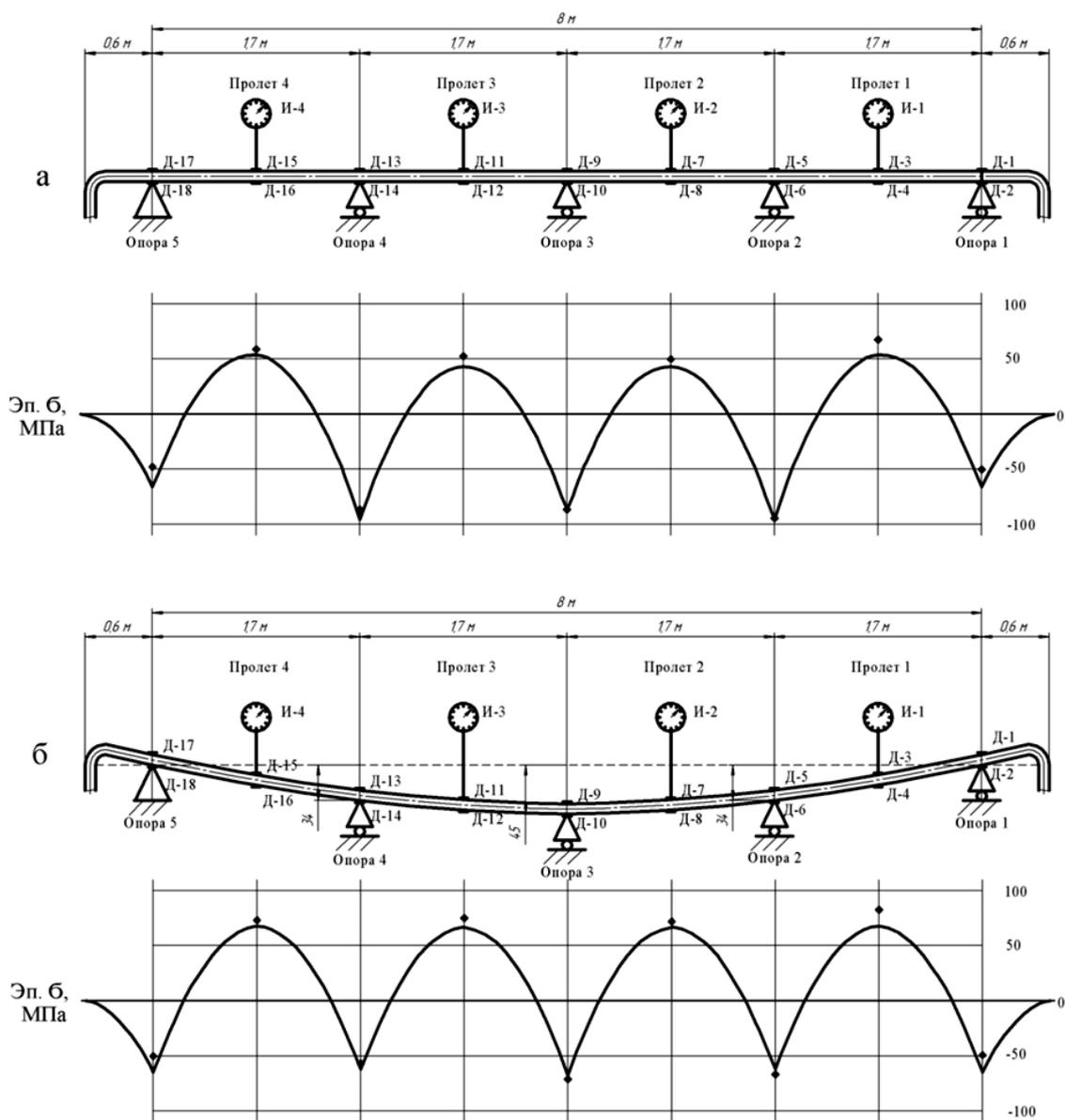


Рисунок 3. Экспериментальные схемы с эпюрами напряжений:
 а – опоры установлены на одном уровне; б – высотное положение опор оптимизировано с целью создания равнопрочной конструкции;
 ■ – значения напряжений, полученные экспериментальным путем;
 И – индикатор ИЧЦ-10, Д – тензодатчик

Значения напряжений при оптимизированном высотном положении опор внесены в таблицу 3.

Таблица 3. Значения напряжений при оптимизированном высотном положении опор

№ тензодатчика	Расчетное значение напряжения в сечении σ_p , МПа	Экспериментальное значение напряжения в сечении σ_s , МПа	Расхождение, %
1, 2	-66,09	-49,11	+25,7
3, 4	67,46	82,68	-22,6
5, 6	-64,34	-66,56	-3,4
7, 8	67,02	71,87	-7,2
9, 10	-66,95	-71,11	-6,2
11, 12	67,02	75,10	-12,1
13, 14	-64,34	-56,80	+11,7
15, 16	67,46	73,10	-8,4
17, 18	-66,09	-50,06	+24,3

Выводы

Как видно из результатов исследования, после оптимизации напряжения в опорных и пролетных сечениях стремятся выровняться. Значения расхождений напряжений, полученных расчетным и экспериментальным путем, имеют как положительный, так и отрицательный знак и лежат в диапазоне 25 %, что говорит об их адекватности для данного способа проведения измерений. Таким образом можно говорить о соответствии теории и эксперимента в целом, а также об экспериментальном подтверждении гипотезы о возможности получения равнопрочной балочной трубопроводной конструкции.

Литература

1. Котов М. Ю., Быков Л. И. Оценка влияния изменения высотного положения опор на напряженно-деформированное состояние балочного трубопроводного перехода //Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2012. № 1. С. 7–12.
2. Рuzга. 3. Электрические тензометры сопротивления; пер. с чеш. М.: Мир, 1964. 336 с.
3. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика: учеб. для ВУЗов. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.
4. Типовые расчеты при проектировании, строительстве и ремонте газонефтепроводов: учеб. пособие/ Быков Л. И. и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. Л. И. Быкова. СПб.: Недра, 2011. 748 с., ил.

References

1. Kotov M. Ju., Bykov L. I. Ocenka vlijanija izmenenija vysotnogo polozhenija opor na naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie balochnogo truboprovodnogo perehoda // Transport i hranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ja. 2012. № 1. S. 7–12. [in Russian].
2. Ruzga. Z. Elektricheskie tenzometry soprotivlenija; per. s chesh. M. : Mir, 1964. 336 s.
3. Darkov A. V., Shaposhnikov N. N. Stroitel'naja mehanika: ucheb. dlja VUZov. M. : Vysshaja shkola, 1986. 607 s. [in Russian].
4. Tipovye raschety pri proektirovanii, stroitel'stve i remonte gazonefteprovodov: ucheb. posobie/ Bykov L. I. i dr.; pod redakciej d-ra tehn. nauk, prof. L. I. Bykova. SPb.: Nedra, 2011. 748 s., il. [in Russian].

Сведения об авторах

Котов М. Ю., аспирант кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
 M. Ju. Kotov, post-graduate student department of “Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storages”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Быков Л. И., д-р. техн. наук, проф. кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация
 L. I. Bykov, dr. tech. sci., prof. department of “Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storages” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: mkotov@inbox.ru