

УДК 622.692.4.053

## ЗАКЛАДНАЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОДЗЕМНЫХ ТРОЙНИКОВ

Хасанов Р.Р.<sup>1</sup>, Яруллин И.Р.<sup>2</sup>, Султанмагомедов С.М.<sup>1</sup>, Харисов Р.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>кафедра «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»

<sup>2</sup>кафедра «Автоматизация технологических процессов и производств  
в нефтяной и газовой промышленности»

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

e-mail: hasanov25@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются натурные методы измерения напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов. Раскрываются основные достоинства и недостатки контактных и бесконтактных методов измерений. Приводятся примеры применения закладной контрольно-измерительной аппаратуры на основе контактных методов измерений на инженерных конструкциях промышленных и гражданских объектов, в частности, подземных трубопроводах. Для мониторинга напряженного состояния подземных трубопроводов широко внедряются «интеллектуальные» вставки, оборудованные датчиками деформаций. Предлагается разработать подобную систему мониторинга для подземных тройников.

**Ключевые слова:** экспериментальный метод, напряженно-деформированное состояние, тройник, закладная контрольно-измерительная аппаратура

Тройники являются одними из наиболее распространенных узлов трубопроводных обвязок. Несмотря на большое разнообразие конструкций и современных технологий изготовления тройников, эти элементы, подвергающиеся статическим и динамическим нагрузкам в процессе эксплуатации, остаются в то же время наиболее напряженными и, как следствие, потенциально опасными [1].

Форма тройника создает значительные сложности и в ходе определения его прочностных характеристик. В результате многие из расчетно-аналитических методов в силу своей трудоемкости оказываются менее предпочтительными, чем экспериментальные методы исследования напряженного состояния.

Современные экспериментальные методы позволяют на основе измерений косвенных параметров металла трубопровода определять величины напряжений. Получаемые при этом данные требуют нескольких этапов обработки. Основными из которых независимо от вида и характера эксперимента являются следующие [2]:

- первичная обработка, которая включает в себя нормировку результатов измерений, статистическую обработку, учет систематических искажений и т.д.;
- интерпретация результатов эксперимента с целью получения искомых параметров напряженного состояния замеряемых участков.

Благодаря этому комплексу мероприятий экспериментальные методы обладают наибольшей точностью получаемых результатов.

В настоящее время выделяют две основные группы экспериментальных методов:

- контактные методы;
- бесконтактные методы.

Большинство традиционных методов требует доступа к поверхности исследуемой зоны трубопровода. Например, рентгенографический метод, механический метод, магнитный метод (магнитношумовой метод, метод «магнитной памяти металла»), метод тензометрирования, акустический метод, метод фотоупругости, метод на основе струнных датчиков деформаций, метод амплитудно-фазочастотных характеристик, метод хрупких покрытий и т.д. [3 - 10].

Существуют методы, позволяющие получать необходимые результаты измерениями с поверхности грунта, в этом отношении наиболее интересным и перспективным является метод магнитной локации [3, 11].

Ниже приведен анализ некоторых экспериментальных методов измерений.

*Акустический метод* [3, 4, 5] основан на измерении скорости ультразвука в стенке трубопровода, является контактным. Поэтому требует обеспечения доступа к поверхности трубопровода.

Несмотря на высокую точность измерений, метод является довольно сложным в исполнении и обработке конечных результатов. В частности, предъявляются высокие требования к подготовке поверхности трубопроводов и точности определения температуры трубы перед измерениями. Кроме того, метод нуждается в предварительной тарировке прибора на конкретный исследуемый металл и подборе датчиков под каждый типоразмер труб.

Следовательно, акустический метод обладает рядом недостатков, которые делают неэффективным обследование сложных протяженных участков подземного и подводного трубопровода.

*Неразрушающий механический метод* [3] основан на приёмах метода измерения твердости и метода голографических исследований.

Данный метод имеет ряд преимуществ: высокая точность, возможность одновременно измерять все составляющие поля напряжений (продольные и окружные). К недостаткам относится то, что этот метод является контактным. Поэтому его целесообразно использовать для измерений напряжений на небольшой площади.

*Магнитношумовой метод* [5] основан на влиянии механических напряжений на магнитные свойства металлических конструкций.

Метод является оперативным и относительно простым, предъявляет относительно невысокие требования к подготовке поверхностей контролируемых трубопроводов.

Основным недостатком метода является необходимость предварительной калибровки для сталей различных марок вследствие влияния микроструктуры материала. Калибровка производится на образцах.

Кроме того, метод обладает низкой чувствительностью при измерениях материалов с высокой твердостью, выдает значительные погрешности результатов при низких уровнях напряжений.

*Рентгенографический метод* [5] в отличие от акустического является абсолютным, т.е. не требует предварительной калибровки на образцах металла. Позволяет получать начальные значения напряжений для других методов измерений, обладает высокой точностью выдаваемых результатов.

Однако, несмотря на значительные габариты и вес рентгеновской аппаратуры, метод позволяет определять величину и направление напряжений в очень небольшой области, что сильно ограничивает его применение в полевых условиях. Кроме того, процедура измерений недопустимо длительна и может составлять до нескольких десятков минут на точку трубопровода. Нельзя не учесть необходимость соблюдения повышенных требований техники безопасности при проведении измерений.

*Метод тензометрирования* [3, 5] широко известен и является базовым экспериментальным методом измерения напряжений на поверхности металлических конструкций. Несмотря на простоту процедуры измерений и низкую стоимость датчиков деформаций, обладает высокой точностью.

Метод является контактным и требует предварительного тарирования тензодатчиков с целью уточнения переходных коэффициентов «электрическое сопротивление - деформация - механическое напряжение». При проведении измерений необходима температурная компенсация.

Основной недостаток данного метода состоит в том, что он позволяет измерять только изменение напряжений в процессе нагружения трубопровода. Если нагружение произошло до того, как приклеили тензодатчики, то вызванные этим напряжения не определяются.

*Метод хрупких покрытий* [6] основан на том, что на поверхность исследуемого объекта тонким слоем наносят специальное покрытие. В процессе приложения нагрузки в покрытии возникают трещины, перпендикулярные действию главных растягивающих напряжений. По мере увеличения нагрузки трещина распространяется от более напряженного участка к менее напряженному. По полученной картине на поверхности тела судят о характере изменения напряженного состояния в процессе нагружения и наиболее напряженных зонах. Картина напряженного состояния сохраняется и в том случае, если с исследуемого объекта снимаются все нагрузки.

Значение напряжений определяются тензометрированием или по тензочувствительности покрытия, зависящая от относительного удлинения, при котором возникает трещина.

*Метод магнитной локации* [3, 11] позволяет исследовать параметры магнитного поля с поверхности грунта и определять характеристики аномально-напряженных зон на трубопроводе без его вскрытия.

В ходе измерений формируются следующие данные:

1. распределение аномально-напряженных зон по длине трубопровода;
2. длина аномально-напряженных зон, величина магнитного момента в этих зонах;
3. координаты месторасположения центров аномально-напряженных зон на трубопроводе;
4. карта проведения вскрышных работ для проведения дополнительного контроля в шурфах.

По завершению обследования проводится сравнительный анализ данных месторасположения аномально-напряженных зон с данными глубины заложения и пространственного положения трубопровода с целью изучения влияния грунтовых нагрузок на его напряженное состояние. Получаемая информация используется для оценки фактического напряженно-деформированного состояния трубопровода.

Недостатком данного метода является формирование общей интегральной картины напряженного состояния сечения трубопровода. Распределение механических напряжений в пределах одного сечения метод не раскрывает. Принимая во внимание сложную пространственную конструкцию тройников, технология магнитной локации не может быть использована для оценки надежности этих элементов.

Итак, по результатам анализа можно выявить основные недостатки экспериментальных методов исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов, в частности, тройников:

1. Большинство методов являются контактными, что требует обеспечения доступа к поверхности трубопровода. При вскрытии, грунт, взаимодействующий с трубопроводом, изымается, вследствие чего изменяется первоначальное напряженно-деформированное состояние объекта исследования. В итоге результаты, получаемые контактными методами, не совсем точно отражают исходное напряженное состояние исследуемого участка. Кроме того, при проведении вскрышных работ велика вероятность нанесения на поверхность трубопровода дефектов в виде нарушения сплошности изоляции, царапин и вмятин, которые во многих случаях остаются неустранимыми. Новые концентраторы напряжений являются потенциальными источниками возникновения аварий.

2. Дистанционные методы диагностики напряженного состояния металла трубопровода наряду с явными преимуществами (ведение работ с поверхности грунта) имеют ряд недостатков. Во-первых, они выдают общую интегральную картину напряженного состояния трубопровода в сечении. Максимальные опас-

ные значения напряжений в конкретных точках сечения не фиксируются [3]. Во-вторых, участки, на которых когда-то велись вскрышные работы, выделяются на общем фоне трассы в виде аномально-напряжённых зон. Возможно вскрытие участков трубопровода, не представляющих опасности.

Из вышеизложенного следует, что для исследования фактического напряженного состояния подземных тройников большинство экспериментальных методов по тем или иным причинам оказываются неприемлемыми.

В настоящее время для оценки прочностных характеристик инженерных конструкций широко применяется система мониторинга, основу которой составляет закладная контрольно-измерительная аппаратура, отслеживающая напряженное состояние объекта в реальном времени. Аппаратура устанавливается на поверхность исследуемого объекта в период строительства. Это позволяет регистрировать показания объекта на протяжении всего срока эксплуатации. Для оценки напряженного состояния конструкций, как правило, достаточно датчиков деформаций, в редких случаях применяют также датчики температур.

Данная система мониторинга положительно зарекомендовала себя при оценке прочности бетонных гидротехнических сооружений плотины, несущих конструкций высотных зданий, фундаментов. Нередко закладная контрольно-измерительная аппаратура применяется для отслеживания процессов в глубинных грунтах под монолитными сооружениями, в этом случае устанавливаются датчики давлений грунта. Для контроля напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций перед заливкой арматуру оснащают струнными датчиками деформаций.

Для мониторинга деформаций металла подземных трубопроводов активно перенимают положительный опыт применения закладной контрольно-измерительной аппаратуры.

Однако датчики деформаций на трубопроводах, как правило, являются временными. В зависимости от срока, необходимого для определения возникших нерасчетных напряжений, отклонения проектных параметров от фактических, могут монтироваться на поверхность исследуемого объекта от нескольких дней до нескольких месяцев. Установка измерительных датчиков на поверхность эксплуатируемого трубопровода ведется в предварительно заготовленных шурфах, которые для обеспечения свободного доступа к контрольно-измерительной аппаратуре на весь период измерений остаются открытыми.

Второй пример использования закладной контрольно-измерительной аппаратуры на подземных трубопроводах – «интеллектуальные» вставки [12, 13]. Вставка представляет собой катушку, изготовленную из трубы той же партии, что и прилегающие участки. По её периметру устанавливаются датчики, по показаниям которых осуществляется контроль над возможными деформациями металла. В

отличие от первого случая, «интеллектуальные» вставки могут врезаться в трубопровод, как в период строительства, так и в период эксплуатации.

В момент установки катушки происходит разгрузка трубопровода и, следовательно, начальные измерения соответствуют нулевому уровню строительных напряжений, имеющихся в трубопроводе [13].

Применение подобных методов контроля напряженного состояния металла трубопровода позволяет заблаговременно предупреждать возникновение аварий. Тем не менее, большинство систем мониторинга подземных трубопроводов ориентированы на исследование напряженного состояния исключительно протяженных линейных участков, представляющих повышенную опасность (береговые зоны, сильно пересеченные и геоактивные участки), а не конкретных узлов, например, тройников.

Тройники по своему исполнению являются конструктивными концентраторами напряжений. Зона пересечения трубопроводов характеризуется сложным пространственным распределением напряжений с высокими значениями коэффициентов концентрации, зависящими от характера нагружения, соотношения диаметров и толщин трубопроводов, типа их сопряжения и конструктивного исполнения (с отбортовкой, вваркой и т.д.) [1]. Дополнительные механические напряжения в зоне соединения основной трубы и отвода возникают при температурных деформациях и подвижках подземных трубопроводов. Это значительно снижает эксплуатационную надежность данного участка по отношению к надежности остальной линейной части трубопровода, в результате возникает потенциально опасный локальный участок.

Оборудование подземных тройников закладной контрольно-измерительной аппаратурой позволит отслеживать напряженное состояние металла в патрубковой зоне и оценивать его запас прочности в реальном времени, а измерение характеристик с поверхности грунта максимально приблизит получаемые результаты к фактическим.

Выбор тройников, на которых должна быть установлена закладная контрольно-измерительная аппаратура, осуществляется на основе расчета максимальных напряжений, которые могут возникнуть в патрубковой зоне при конкретных условиях эксплуатации. Немаловажным фактором, влияющим на выбор тройника, является его конструкция. Предпочтение должно отдаваться сварным тройникам.

Рабочая поверхность тройника должна быть оснащена датчиками деформаций в стационарных условиях до его монтажа на трассе. Во-первых, это гарантирует высокое качество и надежность выполняемых работ, во-вторых, позволяет регистрировать напряжения, возникающие, как в период строительства, в процессе сварочно-монтажных, земляных, испытательных работ, так и в период эксплуатации.

Реализация этих мероприятий на практике позволит повысить эксплуатационную безопасность подземных тройников и всего трубопровода в целом.

## Выводы

1. Натурные методы измерения прочностных характеристик подземных тройников, несмотря на явные преимущества перед расчетно-аналитическими методами, имеют ряд недостатков: контактные методы требуют обеспечения доступа к исследуемой поверхности, в результате изъятия грунта изменяется первоначальное напряженное состояние тройника; бесконтактные методы, в частности метод магнитной локации, выдают общую интегральную картину напряженного состояния сечения трубы. Максимальные опасные значения напряжений в конкретных точках сечения не фиксируются. Бесконтактные методы ориентированы на исследование напряженного состояния протяженных линейных участков, а не конкретных узлов.

2. Для мониторинга напряженного состояния подземных тройников предлагается использовать закладную контрольно-измерительную аппаратуру. Это позволит производить оценку надежности тройника с поверхности грунта и фиксировать изменение напряженного состояния с момента его монтажа.

## Литература

1. Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. Л.: Машиностроение, 1970. 752 с.
2. Махутов Н.А. и др. Конструкции и методы расчета водо-водяных энергетических реакторов. М.: Наука, 1987. 230 с.
3. Шуланбаева Л.Т. Безопасность магистральных трубопроводов при локальных термомеханических напряжениях. Автореф. ... канд. техн. наук. Уфа, 2010, 26 с.
4. Р Газпром 2-2.3-421-2010. Руководство по организации системы мониторинга стресс-коррозионных процессов на трассах действующих и проектируемых магистральных трубопроводов М.: ООО «Макспринт», 2010. 34 с.
5. СТО Газпром 2-2.3-327-2009. Оценка напряженно-деформированного состояния технологических трубопроводов компрессорных станций. М.: ООО «Полиграфия Дизайн», 2009. 30 с.
6. Пригоровский Н.И. Метод тензочувствительных покрытий. М.: Наука, 1978, 182 с.
7. Власов В.Т., Дубов А.А. Физические основы метода магнитной памяти металла. М.: ЗАО «ТИССО», 2004. 424 с.
8. Пригоровский Н.И. Поляризациино-оптический метод исследования распределения напряжений, в кн.: Справочник машиностроителя. В шести томах. Том 3. Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962.

9. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. Москва: Наука, 1973. 576 с.

10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Шапиро Г. С. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.

11. Григорашвили Ю.Е., Стицей Ю.В., Иваненков В.В. Использование технологии локации при определении коррозионной защищенности магистральных трубопроводов // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2006. № 9. С. 21-25.

12. Усошин В.А., Петров Н.Г., Захаров А.В., Кузнецов А.Н. «Интеллектуальная вставка» для контроля напряженно-деформированного состояния магистральных трубопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2004. № 11. С. 7-9.

13. Петров Н.Г., Захаров А.В., Прохожаев О.Т., Хасанов Р.Р. Интеллектуальная вставка // Нефтегазовая вертикаль. 2005. Специальный номер. С. 28-30.



## EMBEDDED CONTROLLING AND MEASURING APPARATUS FOR MONITORING OF UNDERGROUND T-JOINTS

R.R. Khasanov<sup>1</sup>, I.R. Yarullin<sup>2</sup>, S.M. Sultanmagomedov<sup>1</sup>, R.A. Kharisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Gas- and Oil- pipeline Construction Department*

<sup>2</sup> *Technological Process and Production Automation  
in Oil and Gas Industry Department*

*Ufa State Technological Petroleum University, Ufa, Russia*

*e-mail: hasanov25@mail.ru*

**Abstract.** *In article natural methods of measurement of the intense-deformed condition of underground pipelines are given. The main merits and demerits of contact and non-contact measuring methods are presented in detail. Examples of using embedded controlling and measuring apparatus on the basis of contact methods of measurements on engineering constructions of industrial and civil objects, underground pipelines in particular are investigated. For monitoring of tension of underground pipelines are widely implemented "intelligent" insert equipped with strain gauges. Similar monitoring system for underground T-joints is proposed to be worked out.*

**Keywords:** *experimental method, stressed-deformed state, T-joint, embedded controlling and measuring apparatus*

### References

1. Lashchinskii A.A., Tolchinskii A.R. Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoi apparatury (Fundamentals of chemical equipment construction and design). Leningrad: Mashinostroenie, 1970. 752 p.
2. Makhutov N.A. et al. Konstruktsii i metody rascheta vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov (Pressurized water reactors design). Moscow: Nauka, 1987. 230 p.
3. Shulanbaeva L.T. Bezopasnost' magistral'nykh truboprovodov pri lokal'nykh termomekhanicheskikh napryazheniyakh (Pipelines safety with the local thermomechanical stresses). PhD Thesis. Ufa, 2010.
4. R Gazprom 2-2.3-421-2010. Rukovodstvo po organizatsii sistemy monitoringa stress-korroziionnykh protsessov na trassakh deistvuyushchikh i proektiruemykh magistral'nykh truboprovodov (Guidelines for organizing a system for monitoring stress-corrosion processes on the routes of existing and planned pipelines) Moscow, Maksprint, 2010. 34 p.
5. STO Gazprom 2-2.3-327-2009. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh stantsii (Evaluation stress-strain state of technological pipelines of compressor stations). Moscow: "Poligrafia Dizain", 2009. 30 c.
6. Prigorovskii N.I. Metod tenzochuvstvitel'nykh pokrytii (The method of strain-sensing coatings). Moscow: Nauka, 1978, 182 p.

7. Vlasov V.T., Dubov A.A. Fizicheskie osnovy metoda magnitnoi pamyati metalla (The physical principles of the metal magnetic memory method). Moscow: "TISSO", 2004. 424 p.

8. Prigorovskii N.I. Polyarizatsionno-opticheskii metod issledovaniya raspredeleniya napryazhenii (The polarization-optical method for studying the stress distribution), in book: Spravochnik mashinostroytelya. V shesti tomakh. Tom 3. (Mechanic engineer handbook. In 6 vol. Vol. 3). Moscow: State scientific and technical literature publishing house, 1962.

9. Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. Polyarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tela (Polarization-optical methods for solid-state mechanics). Moscow: Nauka, 1973. 576 c.

10. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti (Theory of Elasticity): Transl. from eng. Under. ed. Shapiro G.S. 2-e ed. Moscow: Nauka, 1979. 560 p.

11. Grigorashvili Yu.E., Stitsev Yu.V., Ivanenkov V.V. Ispol'zovanie tekhnologii lokatsii pri opredelenii korrozionnoi zashchishchennosti magistral'nykh truboprovodov (The use of location technology in determining the corrosion protection of pipelines), *Truboprovodnyi transport. Teoriya i praktika*, 2006, Issue 9, pp. 21-25.

12. Usoshin V.A., Petrov N.G., Zakharov A.V., Kuznetsov A.N. «Intellektual'naya vstavka» dlya kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya magistral'nykh truboprovodov ("Intellectual embedded device" to control the stress-strain state of main pipelines), *Transport i khranenie nefteproduktov*, 2004, Issue 11, pp. 7-9.

13. Petrov N.G., Zakharov A.V., Prokhozhaev O.T., Khasanov R.R. Intellektual'naya vstavka (Intellectual embedded device), *Neftegazovaya vertikal'*, 2005, Special Issue, pp. 28-30.

