

УДК 622.691.4

**Ф.А. Егоров**, с.н.с., к.ф.-м.н., egorov-fedor@mail.ru, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

**А.П. Неугодинов**, генеральный директор ООО НПК «Мониторинг-центр»;

**И.И. Велиюлин**, д.т.н., директор; **А.Е. Зорин**, к.т.н., заместитель начальника Отдела инструментального контроля, zorin@oeg.gazprom.ru; **П.И. Васильев**, начальник Отдела технологии и организации ремонта газопровода ЭАЦ «Оргремдигаз» ОАО «Оргэнергогаз»

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ

*С помощью системы волоконно-оптических датчиков (ВОД) деформаций исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) в трубной плети в условиях статических и динамических нагрузок, характерных при эксплуатации магистральных газопроводов. Показана принципиальная возможность применения системы ВОД для контроля НДС трубопровода, ее высокая эксплуатационная надежность.*

Основным показателем, лежащим в основе оценки прочности, прогнозирования надежности и безопасности эксплуатируемых трубопроводных систем является напряженно-деформированное состояние трубопровода [1]. На практике не всегда удается учесть множество факторов, вносящих изменения в НДС эксплуатируемого трубопровода, а следовательно, невозможно обеспечить постоянный необходимый уровень надежности трубопровода на этапе его проектирования. Одним из немаловажных случайных факторов, вносящих существенный вклад в перераспределение НДС трубопровода, являются взаимодействия в системе «трубопровод – грунт». Сезонные подвижки грунтов, морозное пучение, циклические подмерзания, оползни и другие неконтролируемые природные явления могут привести к возникновению критического уровня НДС в трубопроводе и даже к его разрушению. В связи с этим важным вопросом является разработка и внедрение систем мониторинга НДС магистральных газопроводов.

В настоящей статье приводятся результаты применения для контроля НДС трубопровода волоконно-оптических датчиков (ВОД) деформаций в составе системы мониторинга, на примере контроля параметров статического и квазистатического нагружения трубной плети.

Испытания проводились на полигоне ИЭПЦ ОАО «ВНИИСТ» в поселке Толбино Московской области. Для испытаний была сварена плеть из двух труб стали Х70, длиной 8 м, диаметром 1420 мм, толщиной стенки 16,5 мм (рис. 1).

Для изучения особенностей распределения НДС в области концентраторов напряжений на плеть был нанесен трещиноподобный дефект с исходными размерами: длина – 200 мм, ширина – 0,2 мм, глубина – 8 мм.

На внешнюю поверхность плети в зонах концентрации напряжений (трещиноподобный дефект, околошовная зона) и в бездефектных зонах металла были установлены первичные преобразователи деформаций (далее – датчики (Д)). Схема расстановки датчиков показана на рисунке 1. Датчики ПВ, ПВ-С, ПВ-К с

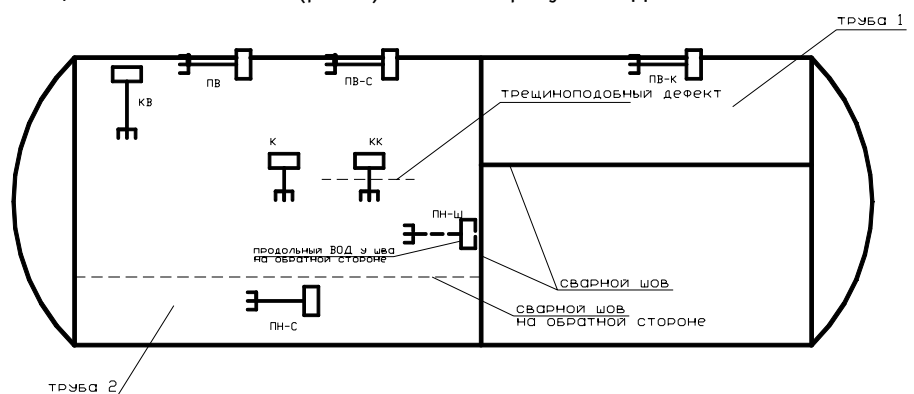


Рис.1. Схема объекта испытаний с указанием мест установки датчиков

измерительными базами  $l_1 = 271$  мм  $l_2 = l_3 = 272$  мм измеряли осевые (продольные) деформации трубы, датчик КК с короткой базой  $l_4 = 66$  мм измерял кольцевые деформации в зоне искусственного трещиноподобного дефекта. Датчики К с базой  $l_5 = 70$  мм и КВ с базой  $l_6 = 72$  мм предназначались для контроля окружающих деформаций в бездефектных зонах металла. Датчик ПН-Ш с базой  $l_7 = 255$  мм измерял продольные деформации в околшовной зоне металла.

**ВОД ДЕФОРМАЦИЙ СОСТОИТ ИЗ СЛЕДУЮЩИХ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ:**

- первичного оптоволоконного преобразователя деформаций (ПП) (рис. 2), осуществляющего преобразование деформаций (перемещений) контролируемого объекта в деформации растяжения и изгиба участка специального световода, расположенного в корпусе ПП;
- оптоэлектронных приемно-передающих преобразователей;
- волоконно-оптического кабеля (ВОК), соединяющего первичный преобразователь с оптоэлектронными преобразователями;
- электронного блока, осуществляющего обработку сигналов, индикацию, хранение и передачу результатов измерений.

Оптоэлектронные преобразователи и электронный блок обработки сигналов выполнены в виде единого компактного устройства – измерителя сигналов волоконно-оптических датчиков (ИСВОД).

Контроль НДС осуществляется 4-канальной волоконно-оптической измерительной системой, позволяющей в режиме реального времени регистрировать сигналы и отображать результаты измерений (рис. 2, 3). Цикл опроса всех четырех датчиков осуществляется за 4 секунды. Результаты измерений – относительные деформации  $\epsilon = \Delta l / l$  определяются автоматически путем пересчета изменений выходных сигналов ИСВОДов в соответствии с градуировочными кривыми датчиков  $U_i(\epsilon)$ .

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД ДЕФОРМАЦИЙ:**

- измерительная база первичного преобразователя – 60 ÷ 300 мм;
- диапазон измеряемых относительных деформаций – 0 ÷ 10<sup>-2</sup>;

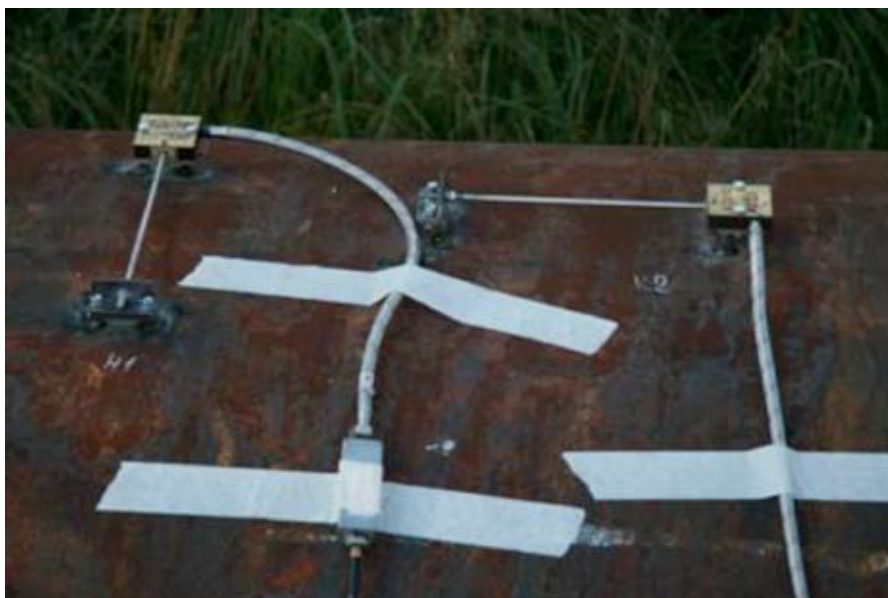


Рис. 2. Первичные преобразователи ВОД на испытываемой плети

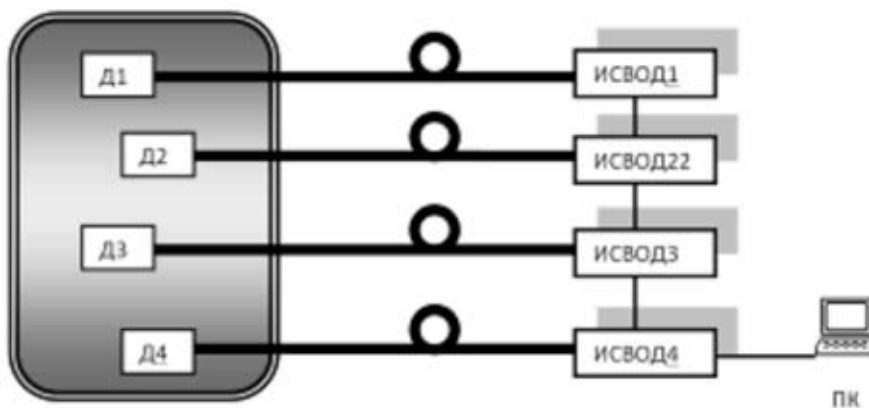


Рис. 3. Схема 4-канальной измерительной системы

- основная погрешность измерения (от верхнего предела диапазона) – 1,5%;
- удаленность объекта контроля – до 3 км;
- электрическое питание от сети переменного тока – 220 В/50 Гц;
- потребляемая мощность – не более 2 Вт;
- срок службы – не менее 15 лет;
- порог чувствительности – 5·10<sup>-6</sup>.

Крепление первичных преобразователей на поверхности трубы производилось путем приварки стальных уголков на определенном расстоянии друг от друга, на которые жестко крепились преобразователи. Сварка осуществлялась в соответствии с требованиями раздела 10.9 в [2]. Особенностью конструкции первичных преобразователей является высокая чувствительность перемещения штока относительно корпуса ПП (усилие – менее 0,1 Н), так что благодаря малой жесткости ПП обе-

спечивается корректная трансляция деформаций от трубы к преобразователю деформаций.

Испытания проводили в четыре этапа: на первом этапе производилась проверка работоспособности ВОД, для чего плеть статически нагружалась от 0 до 80 атм. и обратно, с шагом 10 атм., с выдержкой на каждой ступени в течение 2 мин. На рисунке 4 приведена временная зависимость показаний датчика измерения продольных деформаций ПВ-С в ходе одного из циклов нагружения. Для оценки достоверности результатов была произведена попарная перестановка датчиков, и режимы нагружения были повторены. В результате картина распределения деформаций практически не изменилась. Полученные результаты позволяют сделать выводы о том, что наблюдается полная корреляция между приложенными нагрузками и откликом измерительной системы. Также следует



Рис. 4. Показания датчика ПВ-С, цикл 2

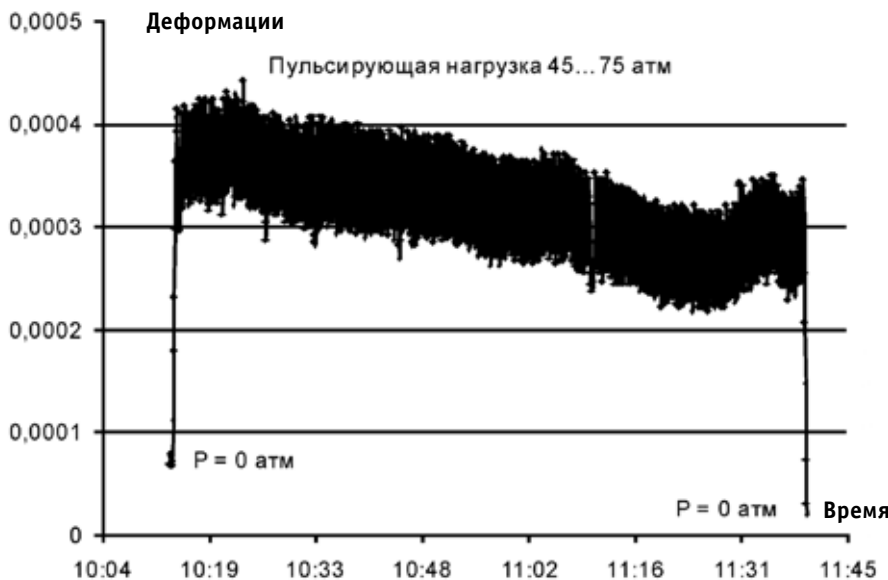


Рис. 5. Временная зависимость продольных деформаций в верхней средней части трубы в условиях пульсирующих нагрузок

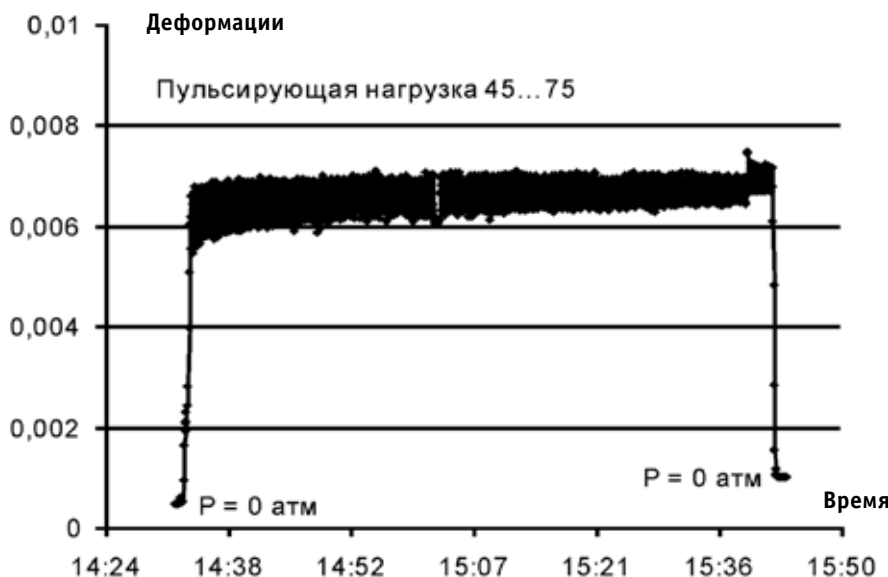


Рис. 6. Временная зависимость окружных деформаций в зоне трещиноподобного дефекта в условиях пульсирующих нагрузок

отметить тот факт, что датчиками были зафиксированы остаточные деформации, свидетельствующие об упруго-пластическом характере деформаций некоторых зон металла.

Для проверки корректности полученных данных были проведены теоретические расчеты распределения продольных и кольцевых деформаций при заданных условиях нагружения по существующим зависимостям [3]:

$$\sigma_{II} = \frac{Pd}{4\delta} \quad \varepsilon_{II} = \frac{1}{E} [\sigma_{II} - \nu\sigma_{\perp}] \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp} = \frac{Pd}{2\delta} \quad \varepsilon_{\perp} = \frac{1}{E} [\sigma_{\perp} - \nu\sigma_{II}] \quad (2),$$

где  $\sigma_{II}$ ,  $\sigma_{\perp}$  – соответственно осевые (продольные) и окружные (кольцевые) напряжения;  $\varepsilon_{II}$ ,  $\varepsilon_{\perp}$  – осевые и окружные деформации;  $P$  – внутреннее давление в трубе;  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала трубы.

Подставляя параметры трубы, характеристики металла и условия нагружения, получим, что соотношение кольцевых и продольных деформаций в упругой области нагружения трубы составляет 4,3:1, и при давлении  $P = 80$  атм. составляют  $\varepsilon_{\perp P} = 1,4 \cdot 10^{-3}$  и  $\varepsilon_{II P} = 3,3 \cdot 10^{-4}$ .

Характер наблюдаемых кольцевых деформаций практически по всем датчикам соответствовал теоретическим значениям, в бездефектных зонах металла погрешность составляла не более 5%. На втором этапе исследовались особенности распределения продольных деформаций в разных участках поверхности трубы. При этом для повышения точности измерений использовались исключительно длиннобазовые датчики. Особенностью, выявленной на данном этапе испытаний, явилось снижение продольных деформаций при переходе от верхней образующей трубы к нижней. Данные результаты объясняются изначальным изгибом заполненной водой плети (края плети опирались на лежки). Так, при нагружении прогнувшейся плети внутренним давлением плеть стремится выпрямиться, вследствие чего на продольные деформации металла трубы, вызванные нагружением плети, накладываются сжимающие деформации нижней образующей, вызванные выпрямлением плети. Для верхних образующих выпрямление плети будет приводить к дополнительным растягивающим деформациям.

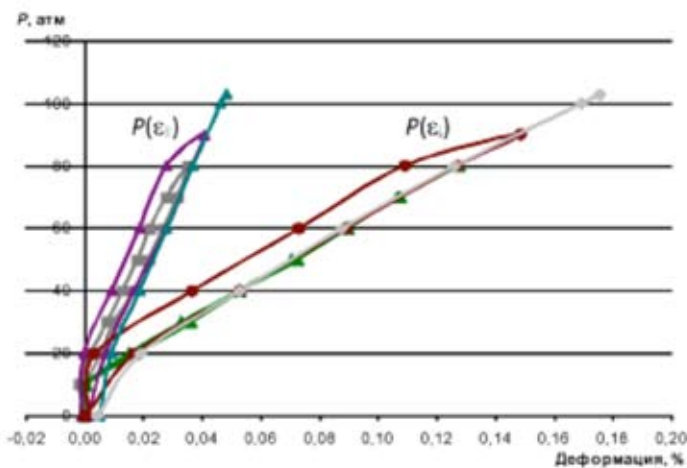


Рис. 7. Диаграммы продольных  $P(\epsilon_l)$  и окружных  $P(\epsilon_c)$  деформаций

На третьем этапе исследовалось НДС трубы в условиях циклического нагружения внутренним давлением. На данном этапе труба в течение 500 циклов нагружалась давлением  $P_{max}/P_{min} = 45/75$  атм., с длительностью каждого цикла 20–30 секунд.

Датчики, установленные в бездефектных зонах основного металла, показали четкий отклик измерительной системы на переменную составляющую нагрузки (рис. 5). Показания датчиков, расположенных в зоне трещиноподобных дефектов, позволяют оценить поведение металла в окрестности трещиноподобного дефекта. Так, из рисунка б видно, что в окрестности дефекта наблюдается более низкая амплитуда колебаний, что говорит о разгрузке данных зон при нагружении, а также можно наблюдать скачкообразные изменения среднего значения деформации в цикле, что свидетельствует о развитии дефекта в процессе нагружения.

На заключительном четвертом этапе испытаний объект подвергался отнулевому нагружению с возрастающей амплитудой: первый цикл – 0–80 атм., второй цикл – 0–90 атм., и далее плеть была статически нагружена до разрушения. В бездефектной верхней средней части оболочки распределение деформаций вполне закономерное, результаты измерений согласовываются с расчетными значениями (соотношение между окружными и продольными деформациями (рис. 7) составляет

$$\frac{\epsilon_l}{\epsilon_{II3}} \approx 4,$$

что близко к расчетному

$$\frac{\epsilon_{IP}}{\epsilon_{IIP}} = 4,3.$$

Анализ полученных диаграмм деформирования для окружных и продольных деформаций в ходе испытаний трубной плети показывает (рис. 7, 8), что при заданных величинах нагрузок ( $P \leq 80$  атм.), зависимости  $P(\epsilon)$  располагаются в пределах четко ограниченных областей, что свидетельствует о глобальной изотропии свойств трубы при указанных видах нагрузок.

В заключение особо отметим высокую надежность и ремонтпригодность использованных датчиков: три датчика после разрушения трубной плети полностью сохранили работоспособность, а четвертый, в зоне распространения разрушения, после замены поврежденного штока также был готов к повторному использованию.

### ВЫВОДЫ

На основании результатов испытаний можно заключить:

1. При использовании ВОД деформаций обеспечивается достаточная чувствительность, диапазон измерений и быстродействие для адекватного контроля НДС участка магистрального трубопровода, как в статическом, так и в динамическом режимах, при этом датчики обладают высокой надежностью и ремонтпригодностью.
2. Рассмотренные ВОД могут применяться, в частности, для контроля потенциально опасных участков и непроектных смещений трубопроводов [1] (на береговых, пойменных, оползневых участках и т.д.). Поскольку три

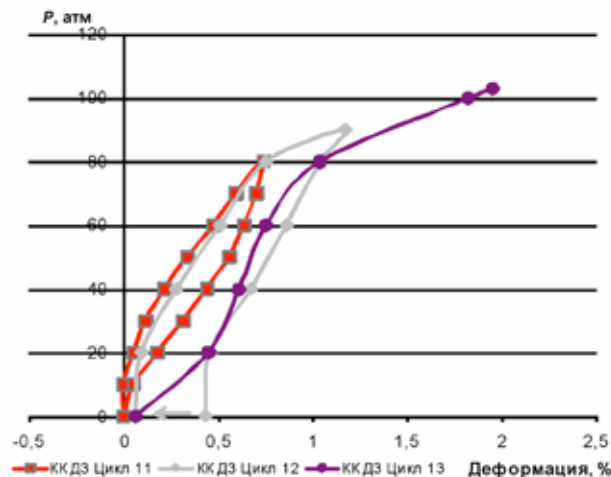


Рис. 8. Диаграмма деформирования в зоне трещиноподобного дефекта. Циклы 11, 12, 13

значения продольных деформаций вдоль периметра сечения трубопровода позволяют полностью определить локальные пространственные параметры кривизны его оси, то измерение распределения деформаций в разных сечениях вдоль трассы позволяет установить действительное положение трубопровода на интересующем участке трассы. Количество датчиков и их распределение вдоль контролируемого участка будут определять точность измерения непроектных смещений трубопровода.

### Литература:

1. Филатов А.А., Велиулин И.И., Добров А.С., Велиулин Э.И. Формирование напряженно-деформированного состояния свободного пролета речного подводного перехода магистрального газопровода // Территория НЕФТЕГАЗ, 2010, № 8, с. 77–81.
2. СТО Газпром 2-2.2-136-2007 «Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промысловых и магистральных трубопроводов. Часть 1».
3. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 415 с.

**Ключевые слова:** трубопровод, мониторинг, волоконно-оптический датчик, деформации, напряжения, надежность.