

УДК 621.6-7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ ОБВЯЗОК ГКС УЛЬТРАЗВУКОВЫМ НЕРАЗРУШАЮЩИМ МЕТОДОМ

Н.Е. Никитина<sup>1,2</sup>, А.В. Камышев<sup>2</sup>, С.В. Казачек<sup>2</sup>, Н.А. Миронов<sup>2</sup>

Продемонстрированы возможности неразрушающего акустического метода измерения механических напряжений, возникающих в элементах конструкции трубопроводных обвязок газокompрессорных станций (ГКС) под действием нагрузок, возникающих в процессе их длительной эксплуатации. Проведены прямые измерения осевых напряжений в трубах надземной части обвязки пылеуловителей (трубы производства фирмы GMBH диаметром 720 мм и толщиной 11 мм). Напряжения определены на основе прецизионных ультразвуковых измерений с использованием портативного прибора ИН-5101А, разработанного фирмой «ИНКОТЕС».

Измерение механических напряжений с помощью ультразвука основано на использовании упруго-акустического эффекта [1,2], проявляющегося в зависимости скорости упругих волн от напряженно-деформированного состояния (НДС) твердого тела. Изменения скоростей упругих волн из-за эффекта акустоупругости даже при напряжениях, близких к пределу текучести материала, весьма невелики (несколько долей процента). Чтобы на этой основе оценивать напряженное состояние материала, требуется осуществлять прецизионные измерения скоростей волн с относительной погрешностью по крайней мере 0,01 процента.

Прибор ИН-5101А в комплекте со специализированными пьезопреобразователями продольных и сдвиговых волн удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к аппаратуре для измерения механических напряжений методом акустоупругости. Возможности прибора подтверждены сертификатом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. К прибору прилагается методика выполнения измерений (МВИ) осевых и окружных напряжений в стальных трубопроводах [3], аттестованная в установленном порядке и внесенная в Федеральный Реестр МВИ, применяемых в сферах распространения государственного метрологического контроля и надзора.

Нами исследованы возможности экспериментальной проверки правильности численных расчетов методом конечных элементов НДС трубопроводных обвязок (ТПО) действующих ГКС [4], проведенных на базе результатов периодических геодезических измерений. Геодезическая съемка надземной части трубопроводной обвязки проводилась в октябре 2000 г. при базовом диагностическом обследовании, в 2002 г. при расширенном диагностическом обследовании и в июне 2004 г. при периодических контрольных измерениях. Расположение точек съемки показано на рис. 1, где точки 1, 3, 4 соответствуют входу скруббера (СК), а точки 7, 8, 10 – выходу фильтра-сепаратора (ФС).

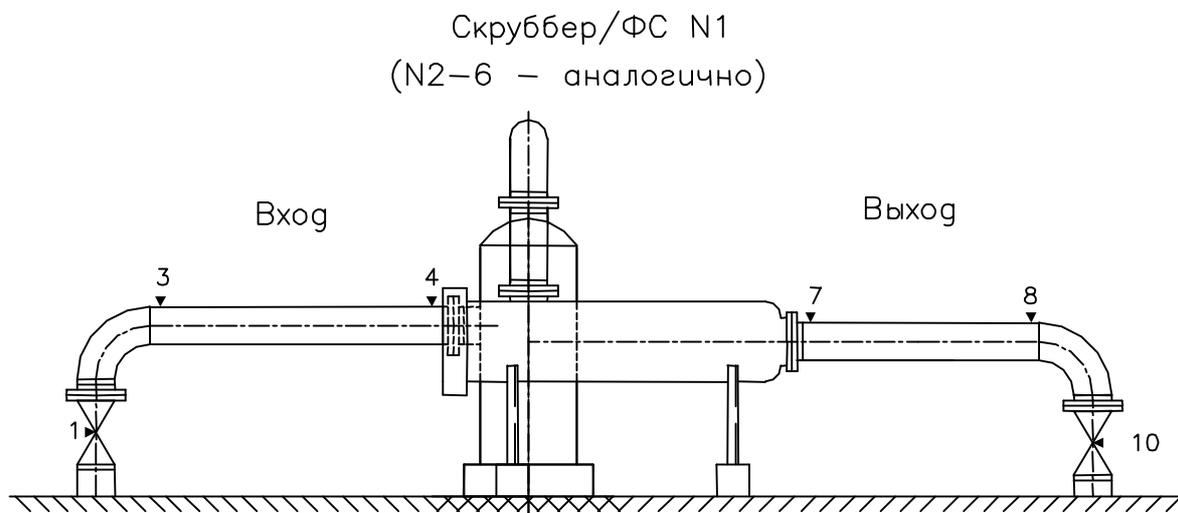


Рис. 1. Расположение точек геодезической съемки.

Изменение относительного положения контрольных точек приводит к изгибу трубопроводов и, как следствие, появлению дополнительных напряжений. Косвенным свидетельством присутствия изгибных напряжений является наличие уклонов для горизонтальных участков. В связи с этим необходимо сравнить высотные отметки в точках 3 и 4 для трубопроводов входа и в точках 7 и 8 для трубопроводов выхода. Геодезическая съемка показала, что для ТПО входа и выхода величины всех уклонов не превышают допустимого значения 10 мм/м. По этим данным можно сделать вывод о равномерности просадок основных элементов ТПО СК/ФС за период 2000-2004 гг. Вместе с тем причиной появления уклона может быть и отклонение от проектного положения при монтаже обвязки.

Таким образом, результаты геодезических измерений за период обследования позволяют сделать вывод о наличии кинематического нагружения ТПО СК/ФС, но не дают однозначного вывода о возможном кинематическом нагружении с момента постройки станции. Арбитражной оценкой полученных расчетных значений напряжений, а, следовательно, и фактических кинематических нагрузок, могут служить значения напряжений, непосредственно измеренных в некоторых точках конструкции. Схема расположения контрольных точек измерения напряжений на трубопроводах приведена на рис. 2. Выбор точек связан с наличием в них зон локализации напряжений, возникающих при кинематическом нагружении ТПО.

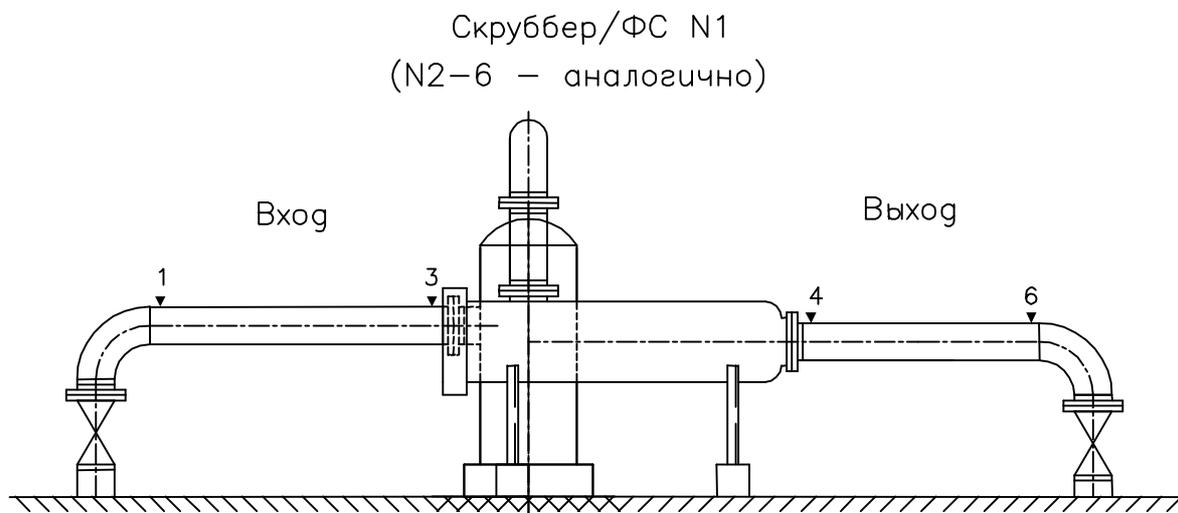


Рис. 2. Расположение контрольных точек измерения напряжений.

Во всех точках измерения для установки трехкомпонентного датчика подготовлены площадки размером 50x20 мм, где трубопровод был зачищен до металлического блеска. Непосредственно измеряемой величиной выбрана разница значений осевых напряжений в точках на верхней образующей (3 и 1, 4 и 6). Этот выбор обусловлен тем, что в точках 1 и 6, находящихся на «незакрепленных» для вертикальных нагрузок точках конструкции, возникновение больших напряжений вряд ли возможно. Поэтому указанная разница с большой долей достоверности характеризует осевые напряжения в «закрепленных» точках 3 и 4. Значения окружных напряжений в указанных точках должны быть одинаковыми, да они обычно и не учитываются при расчетах НДС трубопроводных систем численными методами.

Прямые измерения напряжений в трубопроводах неразрушающим ультразвуковым методом с помощью прибора ИН-5101А проведены в июле 2006 г. при работе ГКС в номинальном режиме. Результаты измерений, приведенные в таблице (последний столбец), показывают, что значения осевых напряжений, соответствующих узловым точкам крепления труб к другим элементам ГКС, не превышают допустимых по СНиП 2.05.06-85 [5].

Прямые измерения напряжений можно провести только в отдельных точках трубопроводов. Полная картина НДС обвязки может быть получена на основе численного расчета, например, методом конечных элементов. Предварительный анализ показал, что в случае кинематического нагружения по данным геодезической съемки за 2000 г., максимальные уровни напряжений в трубопроводах превышают допустимые СНиП 2.05.06-85 во всех случаях, кроме случаев выпирания коллекторов входа.

Рассмотрен также вариант кинематического нагружения, вызванного просадкой коллекторов за период 2001-2004 гг. Выполнены расчеты напряжений для общих просадок, характеризующих изгиб элементов обвязки, как для входа, так и для выхода ТПО СК/ФС. В этом случае значения осевых напряжений на входе изменяются от 22 до 178 МПа, а на выходе – от 33 до 139 МПа в зависимости от номера СК/ФС. При данном варианте кинематического нагружения напряжения на входе и выходе ТПО СК/ФС не превышают допустимые СНиП 2.05.06-85 значения.

Для оценки текущего НДС необходимо провести совместный анализ напряжений, напрямую измеренных в контрольных точках, и напряжений в этих же точках, полученных в результате численных расчетов для различных вариантов изменения проектного положения обвязки. Данные соответствующих расчетов также приведены в таблице.

Таблица.  
Разности осевых напряжений в контрольных точках обвязки СК/ФС.

№ СК/ФС	№№ точек	При проектном положении обвязки	При смещении коллектора относительно среднего положения обвязки 2004 г.	При общей просадке коллектора 2000-2004 гг.	Измеренные в 2006 г. значения
1	3-1	5	-34	44	46
	4-6	8	355	20	21
2	3-1	5	198	73	25
	4-6	8	-9	31	1
3	3-1	5	123	86	21
	4-6	8	173	20	-88
4	3-1	5	-74	71	18
	4-6	8	-53	10	38
5	3-1	5	-81	64	-11
	4-6	8	-98	6	2
6	3-1	5	52	60	27
	4-6	8	-1	-11	34

Из результатов расчетов, приведенных в таблице, следует, что кинематическое нагружение, возникающее в результате подвижек подземного коллектора за весь период эксплуатации, должно приводить к значительному росту разностей напряжений в контрольных точках. Для точек, расположенных на выходных трубах, она должна увеличиться, а для точек, расположенных на входных трубах, - уменьшиться по сравнению с проектным положением обвязки. Однако прямые замеры не зафиксировали роста разности напряжений, кроме разности между точками 4-6 СК № 3. Результат измерения в данной точке противоречит как данным геодезических измерений 2000-2004 г. г., так и гипотезе об общей просадке коллектора за весь период эксплуатации. Он может быть обусловлен локальной неоднородностью акустических свойств объекта контроля.

Следовательно, гипотеза о перемещении положения подземного коллектора и опор за весь период эксплуатации, основанная на данных геодезической съемки за 2000 г., не подтвердилась, а наблюдаемые отклонения связаны с особенностями монтажа.

Однако возможен вариант общей просадки обвязки СК/ФС по данным геодезической съемки за 2000-2004 гг., т.к. замеренные разности напряжений близки к величинам, полученным при расчете НДС трубопроводной обвязки. Отличие расчетных напряжений от измеренных на линии входа СК №№ 2-6 может быть обусловлено смещением скрубберов в сторону просадки (в расчетной схеме рассматривалось жесткое закрепление).

Результаты прямого измерения напряжений прибором ИН-5101А и их сравнения с данными расчета методом конечных элементов позволили сделать вывод о том, что разности высотных отметок обвязки обусловлены особенностями монтажа, а не просадкой или подъемом основных технологических и конструктивных элементов ТПО СК/ФС. Причиной изменения положения высотных отметок стала общая просадка коллектора за период между геодезическими измерениями, а не его изгиб относительно исходного среднего положения. При реализации последнего варианта кинематического нагружения напряжения в отдельных элементах обвязки могли бы значительно превысить допусковые по СНиП 2.05.06-85, что потребовало бы проведения дорогостоящих мероприятий по их снижению. Таким образом, ультразвуковые измерения напряжений в некоторых точках позволили уточнить характер кинематического нагружения для расчета методом конечных элементов НДС всей системы трубопроводов обвязки СК/ФС газокompрессорной станции.

#### Литература

1. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.И. Введение в акустоупругость. -Киев: Наукова думка, 1977. 162 с.
2. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. -Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
3. Трубы стальные для трубопроводов. Методика выполнения измерений механических напряжений методом акустоупругости. Свидетельство об аттестации № 531/1700. Регистрационный код МВИ по Федеральному реестру ФР.1.31.2006.0283.
4. Методика оценки НДС технологических трубопроводов компрессорных станций. ООО «Газпром», 2002.
5. Строительные нормы и правила. Магистральные трубопроводы. СНиП 2.05.06-85. Минстрой России, 1997

<sup>1</sup> Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
<sup>2</sup> ООО Инженерная фирма «ИНКОТЕС»

Поступила: 26.01.08.