

Резвых В.А., Чирков Ю.А.*, Кушнарченко Е.В.*
УЭСП «Оренбурггазпром»,
*Оренбургский государственный университет

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЯ НАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ ТРУБ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Представлена методика испытания натуральных образцов труб, контактирующих с сероводородсодержащей средой, позволившая уточнить влияние формы нетрещиноподобных дефектов на сопротивление разрушению от внутреннего давления в трубе и сопоставить с расчетными значениями.

В настоящее время большинство трубопроводов ООО «Оренбурггазпром» проработало более 25 лет. Определение технического состояния трубопроводов проводится путем внутритрубного диагностирования приборами – дефектоскопами и наружного неразрушающего контроля.

Оценку нагруженности дефектных участков трубопроводов осуществляют расчетными методами согласно действующей нормативной документации, с учетом фактической геометрии и размеров трубопровода, вида и величины выявленных дефектов и вызываемой ими концентрации напряжений, а также результатов экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния и измерения физико-механических свойств металла.

Для уточнения прочностных характеристик металла труб и определения количественных характеристик сопротивления разрушению от внутреннего давления сероводородсодержащей среды в трубах были проведены натурные испытания образцов труб.

В качестве объекта испытаний были взяты катушки труб $\varnothing 57 \times 4$ мм; $\varnothing 89 \times 4$ мм; $\varnothing 108 \times 6,2$ мм; $\varnothing 168 \times 11$ мм; $\varnothing 219 \times 7$ мм; $\varnothing 377 \times 10,5$ мм; $\varnothing 720 \times 20$ мм из стали типа сталь 20 трубопроводов, используемых для транспортировки нефтегазоконденсатных сероводородсодержащих сред.

Натурные испытания труб проводили на установке, состоящей из насосной станции (нагружающего устройства), бокса с вытяжной вентиляцией и консольного крана. Контроль давления производили с помощью трех образцовых манометров с диапазоном измерений: $0 \div 2,5$; $0 \div 60$ и $0 \div 200$ МПа.

В целях безопасности условий испытания установка оборудована боксом, в котором размещали испытываемые трубы. Бокс состоит из стальной цилиндрической обечайки $\varnothing 1420 \times 17$ мм, заглубленной в бетон и днища со сливным

отверстием. Из нижней части бокса производится отток газов в систему вытяжной вентиляции. В поддон засыпается слой извести на случай нейтрализации испытательного раствора, находящегося внутри испытываемой трубы. С помощью крана бокс накрывается выпуклой сферической крышкой $\varnothing 1420 \times 20$ мм.

Для регистрации изменения сопротивления тензодатчиков, наклеиваемых на дефектные участки труб, использовали цифровой автоматический тензоизмеритель (ЦАТ), состоящий из автоматического 100 позиционного прецизионного переключателя АП-3 и цифрового тензоизмерителя (ЦТИ).

Перед проведением испытаний выполняли обезжиривание внутренних поверхностей труб и сборку специальных заглушек, вентиляей, пробок и т. п.

Испытания проводили в следующем порядке. Внутреннюю полость испытываемых труб заполняли сероводородсодержащим раствором – 5% раствор NaCl в дистиллированной воде с добавлением 0,5% ледяной уксусной кислоты, насыщенный сероводородом, приготовленным согласно NACE TM 0177-96 [1].

Трубы выдерживали с раствором при внутреннем давлении, создающим напряжения в металле $0,6 \sigma_T$. Необходимое давление рассчитывали по минимальному нормативному пределу текучести металла испытываемых труб равному 220 МПа.

После достижения необходимого давления перекрывали все вентили, открывающие доступ в испытываемые трубы и осуществляли выдержку 120 часов, затем сбрасывали давление до нуля, и производили смену сероводородсодержащего раствора. Выдержку катушек труб с раствором осуществляли в течение 720 часов.

После этого освобождали испытываемые трубы от раствора и наносили посередине длины трубы искусственные дефекты – надрез дисковой фрезой, а в диаметрально противополо-

ложном направлении – лыску. Лыска имитировала равномерное утонение стенки трубы, а надрез – локальное.

Глубину надреза и лыски (h) выполняли равной половине толщины стенки катушки трубы, а длину – равной наружному диаметру трубы, не считая длин выходов фрезы, которые зависели от толщины стенки трубы и применяемого инструмента для получения надреза (таблица 1).

Образцы труб с дефектами заполняли сероводородсодержащим раствором НАСЕ и выдерживали еще 720 часов при вышеуказанных условиях.

Перед проведением испытаний труб до разрушения сбрасывали давление и на поверхность лыски и над надрезом, посередине длины искусственных дефектов труб, наклеивали по три тензодатчика с базой 20 мм.

Затем производили нагружение, заполненных сероводородсодержащим раствором труб, до давления, равного $1,25 P_{\text{раб}}$ и выдерживали 10 мин. Сбрасывали давление до $0,1 P_{\text{раб}}$ и также выдерживали 10 мин. Вновь поднимали давление до $1,25 P_{\text{раб}}$, выдерживали 10 мин и сбрасывали до $0,1 P_{\text{раб}}$ с выдержкой 10 мин. Всего циклов нагружения-разгрузки – 10. После проведения циклических нагружений осуществляли визуальный, капиллярный и ультразвуковой контроль металла дефектных участков труб. Появления трещин не обнаружили.

После этого вновь поднимали давление до $1,25 P_{\text{раб}}$ и далее производили ступенчатое нагружение до разрушения испытуемых труб, поднимая каждый раз давление на 5 МПа с выдержкой по одной минуте. На тензоизмерителе от деформации тензодатчиков фиксировали появление деформаций металла трубы в области лыски и в надрезе.

При увеличении внутреннего давления в испытуемых трубах наблюдали появление пластических деформаций в области дефектов. Первые пластические деформации обнаруживали в зоне надрезов, при этом фиксировали давление

и выдерживали 5 минут. На надрезе с повышением давления, после достижения t в металле, наблюдали резкое увеличение деформаций, а после фиксации давления – постепенное уменьшение деформаций. Это объясняется раскрытием надреза за счет течения металла в зоне концентрации напряжений в надрезе, а после остановки увеличения давления и поддержки его постоянным, зона пластических деформаций увеличивается и приближается к равномерной по остаточной толщине катушки трубы, при этом надрез несколько закрывается. В процессе снижения давления линия графика изменения деформаций идет несколько круче по сравнению с линией нагружения в упругой области, что свидетельствует о возникновении пластических деформаций сжатия в надрезе при разрушении испытуемой трубы. В результате упрочнения (наклепа) металла в зоне пластических напряжений линия графика деформаций при нагружении поднимается еще круче, чем при разгрузке. Пластические деформации начинают развиваться при достижении величины давления, превышающего предыдущий уровень нагружения. Циклическое нагружение испытуемых образцов в области пластических деформаций проводили несколько раз, пока не произошло разрушение.

В центральной зоне дефекта типа лыска отсутствует концентрация напряжений по остаточной толщине стенки, вследствие плавного утонения металла труб по окружности и большой осевой протяженности. Поэтому пластические деформации на лыске наступали при большем внутреннем давлении, которое соответствует возникновению напряжений равных пределу текучести наводороженного металла трубы, чем при давлении в надрезе (таблица 2). Отношение давления текучести металла на лыске к давлению в надрезе ($P_{\text{л}}/P_{\text{н}}$) представляет собой коэффициент концентрации напряжений K_{δ} в остаточной толщине металла надреза. Среднее значение K_{δ} равно 1,385 (таблица 2), которое условно определяет потенциальную опасность дефектов типа локальных механических или коррозионных повреждений, расположенных вдоль оси трубопровода по линии, например, группы точечных коррозионных язв, по отношению к общей коррозии, имеющей тот же линейный размер вдоль оси трубопровода. Опасность усугубляется при частых перепадах давления, которые должны учитываться в расчетах на малоцикловую усталость.

Таблица 1.

Толщина стенки, δ , мм	Радиус фрезы, R, мм	Ширина фрезы, t, мм
До 5	30	1,5
6 ÷ 10	40	2
11 ÷ 17	40	2,5
18 ÷ 25	60	3
26 ÷ 33	60	4

Таблица 2

Диаметр и толщина стенки трубы, мм	Давление текучести металла трубы в дефекте		$P_{л}/P_{н}$	Давление разрушения при гидроиспытаниях $P_{раз}$, МПа	Истинный предел текучести металла $\sigma_{тн}$, МПа	Расчетное давление разрушения трубы с дефектом по пределу текучести материала		$P_{раз}/P_{разн}$	$P_{раз}/P_{разн}$
	Надрез $P_{н}$, МПа	Лыска $P_{л}$, МПа				Истинное $P_{разн}$, МПа	Норматив $P_{разн}$, МПа		
57x4	24,5	34	1,38	46	312	36,6	31,6	1,25	1,45
89x4	12	15	1,25	21,0	303,8	21,0	18,5	1	1,14
89x4	13	18	1,38	21,5	364,5	24,4	18,5	0,88	1,16
108x6	12	18	1,5	29,4	285	25,4	23,9	1,16	1,23
168x11	17,5	25	1,4	56,4	327,2	35,0	29,0	1,61	1,94
219x7	7,5	10,5	1,4	16,3	307,5	14,4	12,5	1,13	1,31
377x10,5	7,5	-	-	15,3	-	-	10,7	-	1,43
720x20	-	15,5	-	21,0	310	19,5	16,7	1,08	1,26
			1,385		315,7			1,16	1,36

Все разрушения испытываемых труб произошли по надрезу. При этом в надрезу трубы $\varnothing 377 \times 10,5$ мм наступили значительные пластические деформации. Для этой трубы коэффициент равный отношению $P_{раз}/P_{расчн}$ – величины разрушающего давления при испытании к величине расчетного давления разрушения, которую определяли по модифицированной методике В31G [2-3] относительно нормативного предела текучести 260 МПа, составил 1,43. Среднее значение этого коэффициента для других отрезков труб составило 1,38 (таблица 2). Поэтому считаем, что результаты испытаний трубы также показательны.

Полученное значение коэффициента концентрации напряжений $K_{\delta} = 1,385$ в остаточной толщине металла надреза показывает возможность эксплуатации труб с общей коррозией (область испытываемых труб с лыской) большей глубины, чем глубины коррозионных повреждений, расположенных вдоль оси трубопровода по линии, например, группы точечных коррозионных язв (область испытываемых труб с надрезом).

Проведены циклические испытания трубы $\varnothing 720 \times 20$ мм с водородными расслоениями, вырезанной из соединительного газопровода транспортирующего сероводородсодержащие среды. Согласно результатам обследования области расслоения трубы обнаружено расслоение с наибольшими геометрическими размерами: длиной вдоль оси трубы 220 мм, перпендикулярно оси трубы 160 мм и средней глубиной залегания по стенке трубы $8 \div 12$ мм (рисунок 1).

Испытуемая труба выдержала 500 циклов нагружения нормативным расчетным давлени-

ем $P_{н}=8,7$ МПа, затем проводили испытания ее на прочность при нагружении до величины давления $1,25P_{н}$ со сбросом давления до $0,1P_{н}$, 100 циклов. Затем проводили нагружение до величины давления $1,5P_{н}$ со сбросом давления до $0,1P_{н}$, 10 циклов и до величины давления $1,75P_{н}$ со сбросом давления до $0,1P_{н}$, 10 циклов. После того, как испытываемая труба выдержала все циклические нагрузки, ее нагружали до разрушения. При давлении 21,0 МПа труба разрушилась в области расслоения. Зона разрушения имеет размеры $\sim 1400 \times 200$ мм и ориентирована вдоль оси трубы (рисунок 2). Испытуемая труба разрушилась при давлении в 2,41 раза превышающем нормативное рабочее давление – и в 3,18 раза превышающем проектное давление – 6,6 МПа.

Свойства металла трубы согласно испытаниям образцов: временное сопротивление разрыву $\delta_{в}=440$ МПа, предел текучести $\delta_{т}=310$ МПа. Нормативные: $\delta_{в}=440$ МПа, $\delta_{т}=260$ МПа.

Коэффициент равный отношению $P_{раз}/P_{расчн}$ величины разрушающего давления при испытании к величине расчетного давления разрушения, определяемого с учетом истинного предела текучести наводороженного металла (установленного в ходе гидравлических испытаний на лыске), составил 1,17 (таблица 2). Наименьшее значение этого коэффициента равно 0,88 получено для катушки трубы $\varnothing 89 \times 4$ мм, которая имела посередине кольцевой сварной шов, проходящий через дефекты. Считаем, расчетное значение разрушающего давления завышено относительно разрушающего давления, полученного в ходе гидроиспытаний. Пос-

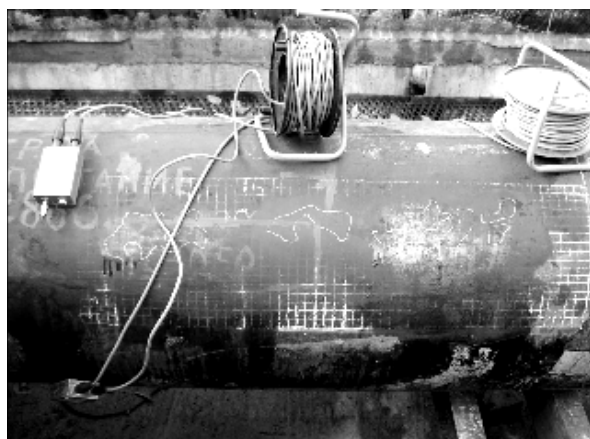


Рисунок 1. Зона трубы с расслоениями

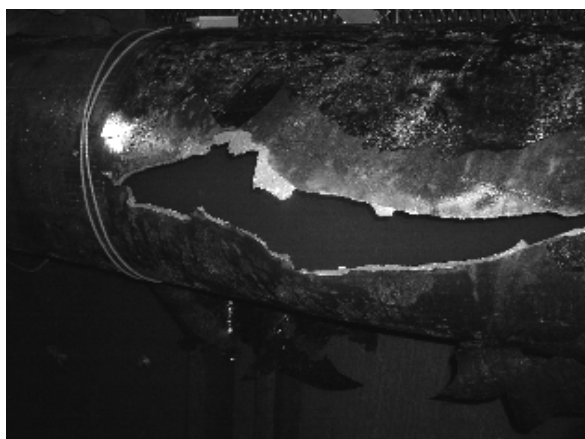


Рисунок 2. Зона разрушения трубы с расслоениями

леднее обусловлено завышением истинного предела текучести, на определение которого повлиял сварной шов как минибандаж, а также другие характеристики металла сварного соединения (предел текучести, пластические свойства).

В целом результаты проведения коррозионно-механических испытаний труб с надрезом позволяют утверждать, что разрушающее давление достаточно точно устанавливается по модифицированной методике В31G имея небольшой запас, если использовать в расчетах истин-

ный предел текучести металла труб, транспортирующих сероводородсодержащие среды. При использовании нормативного предела текучести получаем занижение в 1,36 раза величины расчетного разрушающего давления относительно истинного разрушающего давления.

Проведенные коррозионно-механические испытания труб позволяют обосновать применения методики В31G для определения потенциальной опасности нетрещиноподобных дефектов трубопроводов, транспортирующих сероводородсодержащие среды.

Список использованной литературы:

1. NACE Standard TM 0177-96. Standard Test Method Laboratory Testing of Metals for Resistance to Specific Forms of Environmental Cracking in H₂S Environments. – 32 p.
2. ANSI/ASME B 31 G-1984. Manual For Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines. – ASME. – New York.
3. Гафаров Н.А., Гончаров А.А., Кушнарченко В.М. Коррозия и защита оборудования сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений. – М: Недра – 1998. – 437 с.