

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 620.16:620.179.17

А.Н. Смирнов, Е.А. Ожиганов, Д.Н. Бакланов, А.Г. Кузнецов, Г.Г. Кузнецов

АНАЛИЗ МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ РАБОТАЮЩЕГО ПОД ДАВЛЕНИЕМ (КРАТКИЙ ОБЗОР).

Введение.

Долговечность, надежность и работоспособность оборудования работающего под давлением напрямую зависит от своевременности и качества проведения работ по оценке его технического состояния. Для этого применяются разнообразные методы неразрушающего контроля, а также испытания избыточным давлением. Действующая НТД предусматривает испытания различных технических устройств (ТУ) опасных производственных объектов (ОПО) под различными нагрузками, и с разной периодичностью.

Цель настоящей работы заключается в анализе существующих способов и режимов проведения испытаний ТУОПО избыточным давлением для оценки возможности их оптимизации.

Традиционные методы испытаний.

Гидравлическое испытание (ГИ) является одним из основных видов неразрушающего контроля (НК), применяемого для проверки прочности и плотности, оборудования работающего под давлением. Объект контроля (ОК) считается выдержавшим ГИ в случае, если в процессе испытаний не обнаружено течей, деформаций и разрывов, а также падение давления на манометре не превысило допустимое значение. Величины испытательного давления $P_{исп}$, в зависимости от материала и характера эксплуатации ОК, при ГИ могут варьироваться от 1,25 до 1,66 [1–8] по отношению к расчётному¹ $P_{расч}$. В общем виде величина испытательного давления определяется [2]:

$$P_{исп} = K_h P_{расч} \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}$$

где, $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для материала ОК или его элементов соответственно при 20 °C и расчетной температуре, МПа (kgs/cm^2); K_h – коэффициент, учитывающий характер материала и запас прочности (Рис. 1). При этом:

$$[\sigma] = \eta \min \left(\frac{R_{e/t}}{n_t} \right)$$

где, η – поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям; n_t – коэффициент запаса по текучести; $R_{e/t}$ – минимальные значения предела текучести для расчетной температуры, МПа

(kgs/cm^2). Следует отметить, что в зависимости от толщины стенки и материала испытуемого ОК, варьируется и продолжительность его выдержки под пробным давлением. В случае отсутствия конкретных указаний в проекте (паспорте), время выдержки может достигать от 10 до 60 минут.

После ГИ можно уверенно утверждать, что коэффициент запаса прочности ОК не ниже коэффициента превышения пробного давления над рабочим, значение же действительного коэффициента запаса прочности определить невозможно [8]. Кроме того, невозможно оценить и коэффициент запаса по текучести. Такие испытания не позволяют обнаружить изменение геометрии ОК и оценить его остаточную деформацию, от которой, как известно, зависит запас пластичности и склонность к хрупкому разрушению.

Испытания с определением остаточных деформаций

Одним из показателей, измеряемых в последнее время при ГИ, является коэффициент остаточного расширения $K_{оп}$. Его определение, согласно некоторым НТД [11] является обязательным. Коэффициент остаточного расширения определяется как:

$$K_{оп} = \frac{\Delta W_{ост}}{\Delta W_{полн}}$$

где, $\Delta W_{ост}$ – остаточное изменение объёма ОК; $\Delta W_{полн}$ – полное изменение объёма ОК под давлением. $K_{оп}$ характеризует степень пластических деформаций в стенке сосуда, являясь интегральным критерием надежности [8]. Этот коэффициент не должен превышать установленного предельного значения ($K_{пп}$), который, как правило, равен 5...10% [7, 9].

$$K_{оп} \leq [K_{пп}]$$

Важным преимуществом ГИ с измерением остаточного расширения перед обычным нагружением ОК избыточным давлением, заключается в том, что данный метод включает выполнение всех требований, касающихся простого испытания, и кроме того, дает интегральную характеристику ОК как конструкции в целом. Метод связывает в единое целое геометрические характеристики ОК (процент овальности, отклонение толщин и др.) с пределом текучести материала и внутренним давлением.

Существует несколько основных способов определения $K_{оп}$ [9, 10]:

¹ Расчётное давление $P_{расч}$ – при испытаниях на предприятии-изготовителе, рабочее давление $P_{раб}$ – при испытаниях после монтажа и в процессе эксплуатации.

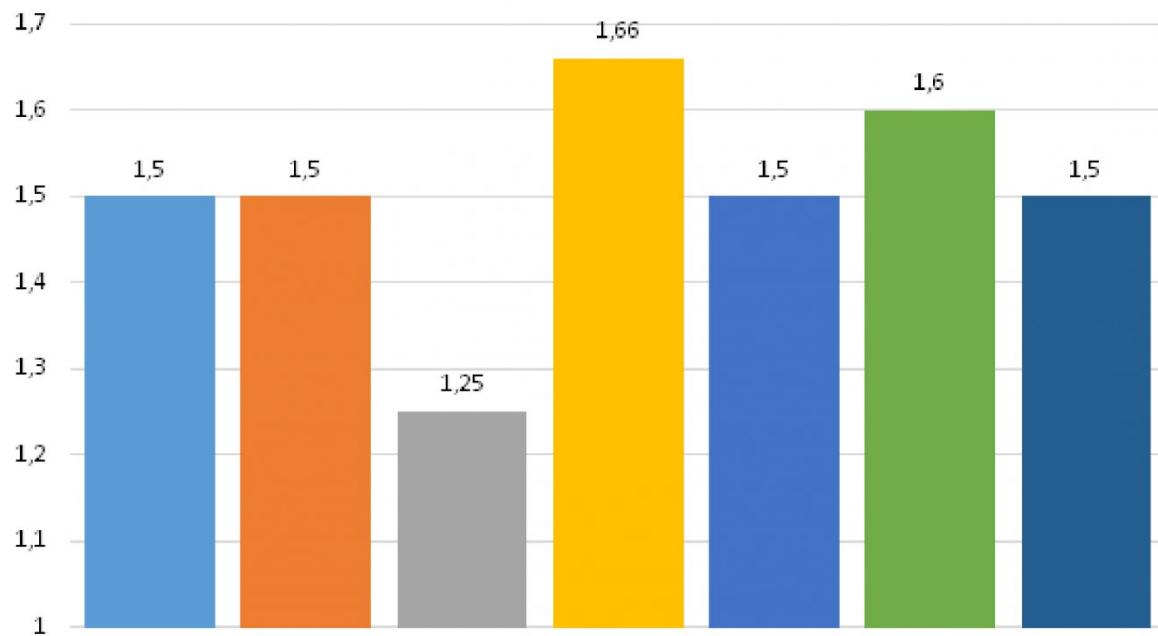


Рис. 1. Максимальные значения коэффициента K_b , регламентируемые в различной НТД (слева направо): 1) ФНП «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под давлением»; 2) СП 75.13330.2012; 3) Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов»; 4) Guidance for the use, inspection, care and periodic testing of composite cylinders; 5) ГОСТ Р 51753-2001; 6) НП 044-03; 7) ВСН 005-88.

- Схема водяной рубашки, осуществляется погружением сосуда (баллона) в герметически закрытую ёмкость, заполненную жидкостью (водяную рубашку). Измеряется объём жидкости, вытесненной из водяной рубашки при расширении сосуда под действием испытательного давления ($\Delta W_{\text{полн}}$) и объём жидкости, который не возвратился в водяную рубашку после снятия давления ($\Delta W_{\text{ост}}$). Применение данной схемы возможно для небольших сосудов (баллонов), кроме того, данная схема обладает наибольшей точностью.

- Схема прямого расширения. Измеряется объём жидкости, закачанной в сосуд для достижения испытательного давления, и объём, вытесненной из сосуда жидкости при снижении давления до атмосферного. Остаточную объёмную деформацию определяют по разности объёмов жидкости с учетом её сжимаемости при температуре окружающей среды. Применение данной схемы целесообразно для больших сосудов.

- С использованием высокоточных весов. Измеряется вес закачанной в сосуд (баллон) жидкости для достижения испытательного давления и вес воды, вытесненной из сосуда при снижении давления до атмосферного. Остаточную объёмную деформацию определяют по разности в весе жидкости, с учетом её сжимаемости при температуре окружающей среды. Применение данной схемы возможно для сосудов (баллонов) малого объёма.

Испытания повышенным давлением. «Стресс-тест».

В последнее время, для оценки состояния обо-

рудования работающего под давлением (главным образом трубопроводов), наряду с традиционными испытаниями, все большее место находит «стресс-тест».

«Стресс-тест» представляет собой особую форму ГИ на прочность, исключающую возможность возникновения недопустимых деформаций и позволяющую сохранить гарантированный запас пластичности ОК на время эксплуатации [11]. Сущность данных испытаний заключается в нагружении участка трубопровода до фактического предела текучести, с последующей проверкой на герметичность [13]. В результате проведения испытаний достигается:

- Выявление критических дефектов, связанных с браком при производстве и монтаже;
- Выявление пропущенных дефектов;
- Локализация микродефектов;
- Выявление утечек;
- Снижение овальности труб;
- Снижение локальных остаточных напряжений, возникающих при производстве труб и монтаже трубопровода;
- Установление реального запаса прочности по отношению к рабочим нагрузкам;
- Оценка технически обоснованного срока безопасной эксплуатации трубопровода (после капитального ремонта).

Для оценки прочности и герметичности испытываемых трубопроводов с целью подтверждения их надежности, в различных странах способы испытаний трубопроводов регламентированы дей-

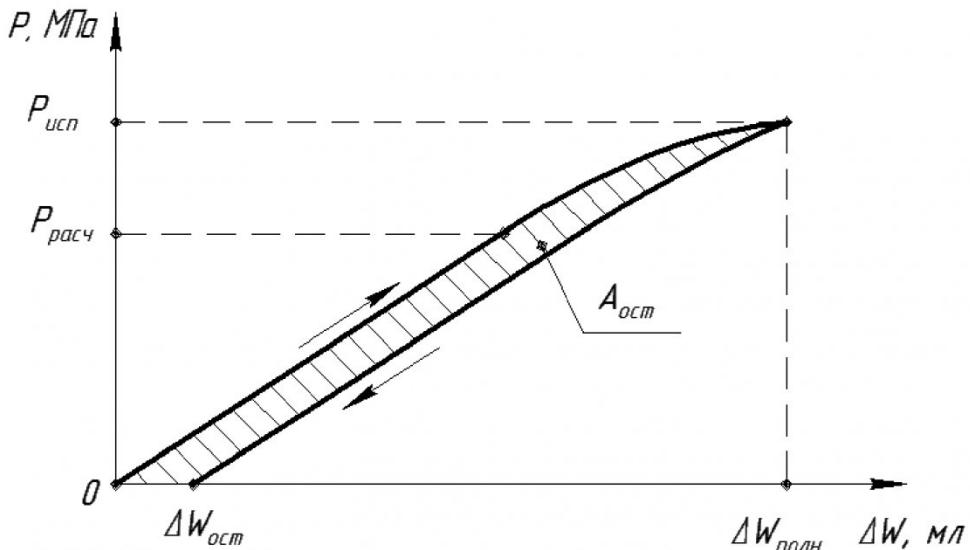


Рис. 2. Изменение остаточного расширения при испытаниях ОК избыточным давлением

ствующими НТД. Эти способы классифицированы по различным критериям (величинам испытательного давления, методам контроля параметров и типу испытательной среды). Заметим, что нормативы, стандарты и правила, действующие в РФ [12, 13], в Германии [14], Великобритании [15], США и Канаде [16, 17], незначительно различаются по величинам испытательного давления, а требования по технологии и методам проведения испытаний практически идентичны.

Согласно [12] величина испытательного давления при «стресс-тесте» газопроводов определяется как:

$$P_{исп} = \frac{2,2\sigma_t s}{D_{вн}}$$

где σ_t – нормативный предел текучести для данной стали; s – номинальная толщина стенки трубопровода; $D_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода. Нормативами РФ, Германии, США и Канады предусмотрены испытания трубопроводов повышенным давлением нагрузками до 110% от предела текучести металла труб.

$$1,5P_{раб} \leq P_{исп} \leq 1,1\sigma_t$$

При высоком давлении испытания, прежде всего, следует учитывать допустимые деформации, в участках с высокой концентрацией напряжений (места защемления, отводы и др.). Для выявления нестабильных дефектов применяют двухкратное приложение испытательного давления продолжительностью не менее чем по 60 минут [11].

Критерием эксплуатационной надежности трубопровода, принят коэффициент запаса прочности, как отношение давления испытания к максимально допустимому (проектному) рабочему давлению в газопроводе.

$$K_{зп} = \frac{P_{исп}}{P_{раб}}$$

Применение данного критерия, при проведе-

нии испытания методом «стресс-теста» трубопровода может дать положительный технологический эффект, а с учетом возможности оптимального использования имеющихся труб и экономический эффект.

Пневматические испытания. Акустическая эмиссия.

В некоторых случаях, специально оговоренных в НТД [1], возможно применение пневматических испытаний (ПИ). Так, например, при испытании кислородных ресиверов целесообразнее проводить ПИ рабочей средой, главным образом это связано с высокой стоимостью работ по пусконаладке и обезжикиванию внутренней поверхности сосуда. Не следует забывать, что кинетическая энергия сжатого газа при ПИ значительно выше, чем воды при ГИ. Поэтому заменять ГИ на ПИ разрешается при условии дополнительного контроля методом акустической эмиссии (АЭ) [18].

Метод АЭ основан на явлении испускания и распространения упругих акустических волн при нелинейных трансформациях структуры объекта контроля, в результате физического воздействия на него. При этом каждый параметр сигнала АЭ связан с каким-либо параметром процесса разрушения и является его акустическим отображением (рис. 3). Поэтому важность метода АЭ при испытаниях оборудования работающего под давлением сложно переоценить.

Теоретически, упругие деформации не вызывают АЭ, поскольку активность АЭ-сигнала напрямую связана с характером пластического деформирования. Регистрацию АЭ в области упругих деформаций можно объяснить появлением в материале пластически деформируемых микрообъемов уже при низкой нагрузке, а также наличием шумов [19]. Поэтому, работа остаточной пластической деформации при расширении сосуда

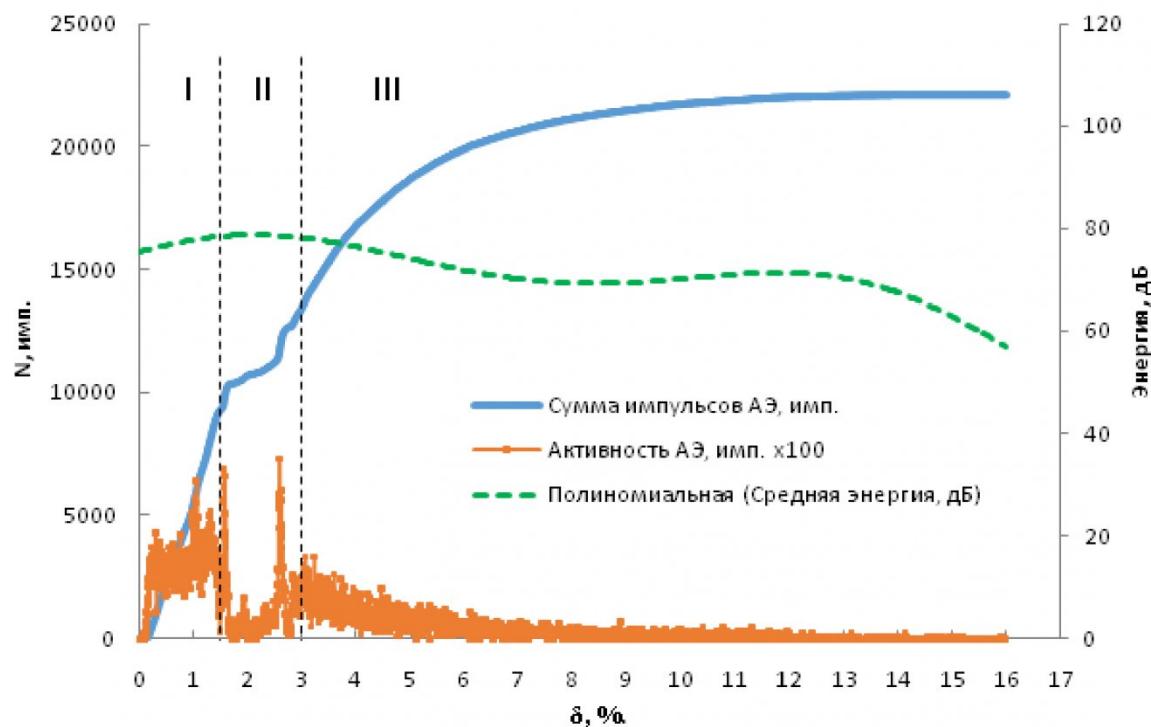


Рис. 3. Изменение параметров АЭ при растяжении образца Ст3сп ГОСТ 380-2005, выполненного ручной дуговой сваркой до разрушения: I – этап макроупругой деформации; II – этап текучести; III – этап деформационного упрочнения, предшествующий разрушению.

(рис. 2, 3) будет пропорциональна выделенной энергии АЭ:

$$E_{\text{AЭ}} \sim \int P d\Delta W$$

Неоспоримыми преимуществами данного метода являются возможность локализации источников сигналов АЭ (по разности времен прихода АЭ сигналов на пьезо преобразователи), а также идентификация каждого источника по степени опасности и природе их происхождения. Так например, для дефекта типа течи характерен непрерывный АЭ сигнал средней и малой амплитуды, а хрупкому росту трещины соответствует АЭ большой интенсивности и малой продолжительностью сигнала.

Применение действующей НТД [18, 20] и различных критериев оценки АЭ (амплитудного, интегрального, локально-динамического, интегрально-динамического и др.) при испытаниях ТУ ОПО, предусматривает 4 класса опасности источников АЭ:

- *Пассивные (источники I класса)*. Регистрируют для анализа динамики его последующего развития.

- *Активные (источники II класса)*. Регистрируют и следят за развитием в процессе испытания. Дополнительно контролируют другими методами НК.

- *Критически активные (источники III класса)*. Регистрируют и следят за развитием в процессе испытания. Принимают меры по подготовке сброса нагрузки.

- *Катастрофически активные (источники IV класса)*. Производят немедленное уменьшение нагрузки до 0 либо до величины, при которой класс источника АЭ снизится до II или III класса. Проводится осмотр ОК, контроль дополнительными методами НК.

Следует отметить, что при проведении испытаний с применением АЭ-метода, для уменьшения шумов и исключения внезапной аварии, нагрузка на ОК подается ступенчато (например: $0,5P_{\text{раб}}$, $0,75P_{\text{раб}}$, $P_{\text{раб}}$, $P_{\text{исп}}$). Выдержка на каждой из ступеней должна составлять не менее 10 минут.

Заключение

Традиционные методы ГИ и ПИ не могут обеспечить достаточной гибкости оценки состояния ОК, их критерий сводится к «годен» или «не годен». Кроме того, данные испытания не позволяют определить действительное значение коэффициента запаса прочности, можно лишь констатировать, что коэффициент запаса прочности ОК не ниже коэффициента превышения пробного давления над рабочим. Также, невозможно оценить коэффициент запаса по текучести и остаточную деформацию, связанную и с запасом пластичности и склонностью к охрупчиванию.

Применение ГИ с измерением коэффициента остаточного расширения позволяет оценить запас пластичности, процент овальности и отклонение толщины стенки ОК от名义альной. Ограничением данного метода является чувствительность к

–изменениям температуры при испытаниях из-за увеличения погрешности измерений, связанных с девиацией объема рабочей жидкости и температурными деформациями материала корпуса ОК.

Испытания ОК методом «стресс-теста» позволяют выявить докритические дефекты, снизить остаточные напряжения, устранить овальность, а также определить коэффициент запаса прочности и оптимально скорректировать рабочие нагрузки трубопровода. Однако применения «стресс-теста» возможно только на оборудовании из материала с

известными номинальными физико-механическими характеристиками, в противном случае возникает высокая вероятность аварии.

Применение метода АЭ представляется наиболее перспективным. Данный метод, несмотря на большую стоимость оборудования и высокие требования к квалификации специалистов НК, позволяет проводить мониторинг состояния оборудования на всем протяжении испытания, отслеживая зарождение и развитие дефектов, локализуя и идентифицируя их.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под давлением».
2. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы расчета на прочность. Общие требования.
3. Руководство по безопасности «Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов».
4. СП 75.13330.2012. Технологическое оборудование и технологические трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 3.05.05-84.
5. ВСН 005-88. Строительство промысловых стальных трубопроводов. Технология и организация.
6. НП 044-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, для объектов использования атомной энергии.
7. Guidance for the use, inspection, care and periodic testing of sci composite cylinders.
8. Дмитриенко Р.И. Остаточное расширение баллонов (краткий обзор) / Р.И. Дмитриенко, Э.Ф. Гарф В.П. Чижиченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2014, №1. С 23-28.
9. ГОСТ Р 51753-2001. Баллоны высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах.
10. Дмитриенко Р.И., Миховский М. Методика определения остаточного расширения баллонов // Научные известия на НТСМ. 2014. Година ХХII, Брой 1(150). С. 494-499.
11. Испытания на прочность магистральных газопроводов методом «стресс-теста» [Электронный ресурс] / А.В. Топилин [и др.] // Oil & Gas Journal Russia 2013, №11. – Режим доступа: <http://ogjrussia.com/issues/article/ispytaniya-magistralnyh-gazoprovodov>.
12. ВН 39-1.9-004-98. Инструкция по проведению гидравлических испытаний трубопроводов повышенным давлением (методом стресс-теста).
13. СТО Газпром 2-3.5-354-2009 «Порядок проведения испытаний магистральных газопроводов в различных природно-климатических условиях».
14. Vd TÜV – Merkblatt Rohrleitungen 1060. Richtlinien für Durchführung des Streßtest.
15. IGE/TD/1 Edition 5 – Steel pipelines for high pressure gas transmission.
16. ANSI/ASMEB «Испытания трубопроводов». Свод правил.
17. Z 183-М, том II «Трубопроводные системы для транспорта нефти».
18. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
19. Смирнов А.Н., Ожиганов Е.А. Акустическая эмиссия при различных степенях деформации и способах сварки стали Ст3сп // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. №6. – С. 68-72.
20. ГОСТ Р 52727-2007. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.

Авторы статьи:

Смирнов Александр Николаевич, д.т.н., профессор кафедры технологии машиностроения КузГТУ.

Ожиганов Евгений Анатольевич, аспирант кафедры «Технология машиностроения» КузГТУ.

Бакланов Дмитрий Николаевич, исполнительный директор ООО «Кузбасс РИКЦ», эксперт в области химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Кузнецов Алексей Геннадьевич, начальник отдела котлонадзора и газового надзора ООО «Кузбасс РИКЦ», эксперт на объектах газового надзора.

Кузнецов Геннадий Геннадьевич, ведущий специалист-эксперт ООО «Кузбасс РИКЦ», эксперт на объектах котлонадзора.