

Черепанов Анатолий Петрович,
д.т.н., профессор кафедры «Управление на автомобильном транспорте»,
Ангарский государственный технический университет,
e-mail: boning89@mail.ru

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Cherepanov A.P.

EVALUATION OF NONDESTRUCTIVE TESTING RESULTS

Аннотация. Рассмотрены вопросы оценки объемов и эффективности неразрушающего контроля с целью повышения качества и полноты информации для определения деградационных процессов, вызывающих разрушение технических устройств, для автоматизации обработки данных, для определения времени, трудозатрат и стоимости с учетом объемов, эффективности и трудоемкости.

Ключевые слова: визуальный контроль, дефектоскопический контроль, объем контроля, показатель коррозии, коррозионная стойкость, сварные швы, технический контроль, техническое устройство.

Abstract. The issues of assessing the volume and efficiency of non-destructive testing in order to improve the quality and completeness of information for determining the degradation processes that cause the destruction of technical devices, for automating data processing, for determining time, labor and cost, taking into account the volume, efficiency and labor intensity.

Keywords: corrosion index, corrosion resistance, flaw detection inspection, scope of inspection, technical control, technical device, visual inspection, welds.

Задача неразрушающего контроля (НК) состоит в оценке технического состояния (ТС) объекта и безопасности его эксплуатации. В работе [1] предложены информационно-диагностические системы о ТС объектов для принятия решений по обеспечению промышленной безопасности [2]. Например, протяженность труб поверхностей нагрева паровых котлов может составлять несколько километров [3], протяженность газопроводов и нефтепроводов - тысячи километров [4], химические, нефтехимические и другие отрасли содержат множество сосудов и технологических трубопроводов [5], которым требуется первичный и периодический НК. Периодический НК при ремонте в условиях производственных площадок без демонтажа или полной разборки технических устройств (ТУ) в полном объеме требует значительных затрат времени и средств. Поэтому следует учитывать фактические объемы и эффективность методов дефектоскопии, акустико-эмиссионного контроля, вибродиагностики, магнитной анизотропии металла и других современных методов получения информации о повреждениях и дефектах [6], и проводить анализ параметров ТС [7].

Рассмотрим НК как процесс определения ТС и проверки соответствия значений параметров ТУ требованиям нормативной и технической документации в конкретный момент времени. Методы НК [8] входят в перечень документов по стандартизации [9] и включают: визуальный контроль по внутренним и

наружным поверхностям стенки; измерение размеров элементов ТУ и толщины его стенок с наружной и внутренней стороны; определение наличия дефектов (трещин, раковин, несплошностей металла, и др.), их характера и размеров; контроль состояния металла металлографическими исследованиями, механическими испытаниями и измерением твердости; контроль состояния металла акустико-эмиссионным методом определения развивающихся дефектов при нагружении пробным давлением (совмещение с гидравлическими или пневматическими испытаниями); контроль герметичности гидравлическими или пневматическими испытаниями, полнота выполнения которых влияет на объемы НК. В то же время, приведенные нормы относятся к изготовлению и монтажу оборудования, когда возможен контроль в полном объеме для всего изделия. Однако, численных величин для определения этих объемов, которые позволили бы наиболее объективно их оценивать, ни в нормативах [9], ни в работе [10] не приведено. Что же касается НК в процессе ремонта эксплуатируемого оборудования, то в полном объеме его провести сложно из-за недоступности некоторых деталей, узлов и сварных швов для подготовки и контроля. Поэтому качество НК определяется, например, по оценке экспертов, а объем контроля принимается, как отношение выполненного объема к полному возможному объему НК [10].

Согласно предлагаемой технологической схеме НК, показанной на рисунке 1, устройство, например, сосуд разбивается на группы типовых элементов, включая обечайки, днища, патрубки, линзовые компенсаторы.

Сварные швы между корпусом, патрубками, опорными и другими узлами и деталями разделены на продольные, кольцевые и их перекрестья. Для каждого элемента ТУ выбирается соответствующий комплекс методов контроля. По результатам НК определяется физический объем и достоверность примененных методов НК. Далее, в соответствии с классом опасности ТУ оценивается его эффективный объем, по которому на основе норм времени на проведение всей работы определяется трудоемкость и стоимость по нормам и расценкам [11] на сосуды, работающие под давлением, резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов, технологические печи, а также другие ТУ и сооружения. Показатель эффективности НК, который зависит и от эффективного объема, и от класса опасности ТУ для окружающей среды, учитывается при оценке ТС и ресурса [6, 12]. Полный объем НК для всего ТУ с учетом площади поверхностей деталей и узлов, длин сварных швов и количества элементов, которые необходимо было бы проконтролировать в объеме 100%, рассчитывается по технической документации или определяется непосредственно на объекте контроля. При разработке технологии НК для выполнения визуального измерительного и дефектоскопического контроля определяется целесообразность демонтажа,

полной или частичной разборки ТУ. Индивидуально на каждое ТУ в зависимости от его конструктивного исполнения (емкость, теплообменник, скруббер, колонна и др.), параметров эксплуатации (температура, давление, химический состав среды, коррозионная и химическая стойкость конструкционных материалов) и фактического ТС, составляется программа НК. По результатам анализа технической документации и результатам предшествующих заключений по ТС задаются объемы контроля, которые указываются в программе НК.



Рисунок 1 - Технологическая схема неразрушающего контроля

По окончании каждого вида НК составляют протоколы визуально-измерительного, дефектоскопического контроля, металлографических исследо-

ваний, контроля герметичности и другие. По количеству проконтролированных деталей, узлов, площади их поверхностей и длин сварных швов, которые охвачены НК, определяется фактически выполненный объем НК. Полный объем составляет 100%, если все поверхности элементов, деталей, узлов и сварные швы подвергнуты контролю. Физический объем определяется проконтролированными элементами, деталями, узлами сварными швами всеми видами НК и может выражаться в относительных единицах или в процентах.

Объем НК штучных элементов, деталей и узлов определен выражением:

$$V_N = \frac{1}{M_k} \cdot \sum_{i=1}^{M_d} \left[\frac{g_i}{T_i} \cdot \sum_{j=1}^{T_i^1} (n_{ij} \cdot K_j) \right], \quad (1)$$

где n_{ij} – число элементов, деталей и узлов i -й группы, контролируемых j -м методом;

T_i – число всех элементов, деталей и узлов i -ой группы;

g_i – коэффициент относительной значимости элементов i -ой группы;

T_i^1 – число методов, примененных при НК элементов i -ой группы;

M_k – число групп деталей и узлов, имеющих в ТУ;

M_d – число контролируемых групп элементов, деталей и узлов;

K_j – коэффициент достоверности j -го метода контроля.

Например, в работе [14] указывается, что при обследовании сварных сосудов на химически опасных объектах со средним сроком эксплуатации 24 года, 62% от общего числа дефектов составляют дефекты сварных швов.

Объем контроля сварных швов определен выражением:

$$V_L = \frac{1}{P_k} \cdot \sum_{i=1}^{P_c} \left[\frac{g_i}{l_i} \cdot \sum_{j=1}^{B_i} (l_{ij} \cdot K_j) \right], \quad (2)$$

где l_{ij} – длина всех сварных швов i -ой группы, контролируемых j -м методом (ультразвуковым, цветным, магнитопорошковым, радиографическим и т.п.);

l_i – длина имеющихся сварных швов в i -ой группе;

P_k – число групп всех сварных швов;

P_c – число групп контролируемых сварных швов (кольцевых, продольных, и угловых или др.);

B_i – число методов, примененных к i -ой группе контроля.

Физический объем контроля всего ТУ установлен зависимостью:

$$V_A = \frac{\sum_{j=1}^r A_{ij} \cdot K_j}{r_i} + \frac{V_p + V_{AEC}}{2} + \frac{V_N + V_L}{2}, \quad (3)$$

где A_{ij} – относительная часть поверхности сосуда, контролируемая j -м методом, например, площадь поверхности, охваченная толщинометрией;

K_j – коэффициент достоверности j -го метода контроля.

r_i – число методов, примененных к i -ой группе наружного и внутреннего визуального контроля, замеров толщин стенок, металлографических и механических исследований, измерения твердости и др.;

V_p – объем контроля при испытании пробным давлением;

V_{AEC} – объем акустико-эмиссионного контроля.

Испытание пробным давлением и акустико-эмиссионный методы контроля можно принять как контроль с полным охватом поверхности, но поскольку этими методами не всегда удается в некоторых местах ТУ обнаружить имеющиеся дефекты, например, из-за недоступности поверхностей, то объем контроля данными методами будет варьироваться в пределах менее 100%.

В работе [15] предложено определение эффективного объема НК исследуемого ТУ эмпирическими зависимостями, которые учитывают количество элементов, деталей и узлов, включая обечайки и днища корпуса, патрубков штуцеров, количество перекрестий сварных швов, а также длины сварных швов, соединяющих их между собой.

Выбор необходимого числа наблюдений (измерений) для оценки показателей надежности, например, по закону распределения Вейбулла определяется коэффициентом вариации, зависящим от глубины разрушения [15]. Приведем метод расчета эффективного объема НК. Эффективный объем НК [16] определен формулой:

$$W_{эфф} = \frac{V_A}{\omega}, \quad (4)$$

где ω – коэффициент технической оснащенности и квалификации специалистов лаборатории НК.

Коэффициент технической оснащенности и квалификации специалистов лаборатории НК может быть принят, например, в пределах $\omega = 1,2 \div 6,0$.

Показатель эффективности НК [16] определен формулой:

$$K_{э} = W_{эфф}^{1+\ln\xi}, \quad (5)$$

где ξ – коэффициент ответственности, который предложен в качестве аналога групп или классов ТУ и показывает степень опасности разрушения ТУ:

$$\xi = \gamma^{\ln(\delta)}, \quad (6)$$

где γ и δ доверительная вероятность оценки опасности или квантиль нормального распределения и максимальная допустимая относительная ошибка расчета опасности [17].

Коэффициент ответственности ТУ от классов их опасности для окружающей среды определен по формуле (6) для каждого класса ТУ и показан в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициент ответственности ТУ

Класс ТУ	Доверительная вероятность оценки опасности	Максимальная допустимая относительная ошибка расчета	Коэффициент ответственности ТУ
	γ	δ	ξ
1	0,99	0,05	0,94
2	0,95	0,1	0,79
3	0,9	0,15	0,67
4	0,8	0,2	0,49

Коэффициенты достоверности примененных методов ультразвукового, магнито-порошкового, цветного контроля по наружным и внутренним поверхностям стенок ТУ и гамма-графирования приняты согласно [10]. Примененное в данном случае количество методов обозначено в пределах $j=1\div 14$.

В таблице 2 показаны результаты расчета объемов НК с полным и частичным охватом поверхности.

Таблица 2

Контроль с полным или частичным охватом поверхности ТУ

Методы контроля с полным или частичным охватом поверхности	Число применённых методов НК, r_i	Коэффициенты достоверности		Относительная часть поверхности	
		Обозначение	Значение	$A_j, \%$	$A_j \cdot K_j, \%$
Внутренний визуальный контроль	4	K_6	0,7	80,0	56
Наружный визуальный контроль		K_7	0,5	100,0	50
Измерение толщин стенок с наружной стороны		K_8	0,7	80,0	56
Измерение толщин стенок с внутренней стороны		K_9	0,9	0,0	0
Механические испытания		K_{12}	0,8	0,0	0
Измерение твёрдости		K_{10}	0,8	80,0	64

В таблице 3 показаны результаты расчета объемов НК с полным охватом поверхности.

Таблица 3

Контроль с полным и частичным охватом поверхности ТУ

Методы контроля с полным охватом поверхности	Коэффициенты достоверности		A _j , %
	Обозначение	Значение	
Нагружение давлением	K ₁₄	0,6	100,0
Акустико-эмиссионный контроль	K ₁₃	0,7	0,0

В таблице 4 показаны результаты расчета объемов НК штучных элементов ТУ.

Таблица 4

Результаты расчета объемов НК штучных элементов ТУ

Штучные контролируемые элементы			Коэффициенты достоверности				
			Ультразвуковой	Гаммаграфирование	Магнитопорошковый	Цветной	
						снаружи	изнутри
Наименование	Общее количество, M _k	Количество контролируемых элементов, M _d	Количество элементов, контролируемых j-ым методом				
			K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
			0,7	0,7	0,5	0,4	0,6
Перекрестия швов, шт	32	18	16	0	0	18	0
Патрубки, шт	15	8	0	0	0	8	0

В таблице 5 показаны результаты расчета объемов НК продольных, кольцевых, и угловых сварных швов крепления патрубков к обечайкам и днищам корпуса ТУ.

Таблица 5

Результаты расчета объемов НК продольных, кольцевых, угловых сварных швов крепления патрубков к обечайкам и днищам корпуса ТУ

Контролируемые типы сварных швов			Коэффициенты достоверности j -го метода контроля				
			Ультразвуковой	Гамма-графирование	Магнитопорошковый	Цветной	
Наименование	Общая длина, l_i	Количество примененных методов, B_i				Длина сварных швов, контролируемых j -ым методом	
			K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
			0,7	0,7	0,5	0,4	0,6
Продольные швы, м	31	2	2,1	0	0	3,3	0
Кольцевые швы, м	74	2	5,8	0	0	5,8	0
Угловые швы, м	23	1	0	0	0	3,4	0

В таблице 6 показан результат расчета объемов по каждому виду НК.

Таблица 6

Результат расчета объемов по каждому виду НК и показателя его эффективности

Объемы НК, %							Показатель эффективности НК
V_{AEC}	V_p	V_A	V_N	V_L	$V_Э$	$W_{Эфф}$	$K_Э$
0	60	70,50	39,41	7,93	95,17	25,03	0,27

Результаты работы показали, что при оценке ТС требуется учитывать объемы и эффективность НК, модели механики разрушения [18]. Для обнаруженных дефектов следует использовать «консервативную» оценку вероятности аварии [19]. Опасность дефектов на различных стадиях жизненного цикла ТУ оценивается коэффициентом дефектности [10], определяемым отношением элементов, деталей и узлов, в которых обнаружены дефекты к их общему коли-

честву. Если один и тот же дефект появляется на протяжении эксплуатации неоднократно, то вероятность последующего его появления должна быть учтена при оценке фактического ТС.

Выводы:

1. Оценка результатов НК предложенным методом применима на любой стадии жизненного цикла ТУ.

2. Применением показателя эффективности НК может быть установлена зависимость прогнозируемого ТС элементов, сварных швов, а также опасности разрушения ТУ.

3. Выбор совокупности необходимых методов НК, обеспечивающих заданный показатель эффективности, снижает себестоимость, объемы работ, затраты на НК, повышает точность оценки фактического ТС.

4. Показатель эффективности НК может учитываться при оценке ресурса ТУ.

5. Для определения качества проведения НК и его эффективности необходимы дополнения в методические и нормативные документы, которые учитывали бы количественные показатели комплексного обнаружения (поиска) дефектов и показатели достоверности результатов НК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.И., Панчиков В.Н. Техническое диагностирование и оценка риска аварии в нефтегазовой отрасли // Безопасность труда в промышленности, № 1 – 2012. С 68 – 71.

2. Власов И.Э., Иванов В.И. О дефектометрических подходах в ультразвуковом контроле // Дефектоскопия. –1998. – № 2. – С. 41 – 46.

3. Динамика и прочность водо–водяных энергетических реакторов / Н.А. Махутов, Ю.Г. Драгунов, К.В. Фролов, С.М. Каплунов и др. – М.: Наука, 2004. – 440 с.

4. Безопасность России. Безопасность трубопроводного транспорта. – М.: МГФ "Знание", 2002. – 752 с.

5. Безопасность резервуаров и трубопроводов / В.А. Котляревский, А.А. Шаталов, Х.М. Ханухов. – М.: Экономика и информатика, 2000. – 555 с.

6. Безопасность России. Правовые, социально–экономические и научно–технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Махутова Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015, – 600 с.

7. Безопасность России. Правовые, социально–экономические и научно–технические аспекты. Научные основы промышленной безопасности. Научный руководитель Махутов Н.А. – М.: МГОФ Знание, 2019. – 824 с. ISBN: 978–5–87633–183–0.

8. Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Филинов В.Н. Измерения, контроль, испытания и диагностика. Под ред. Ключева В.В. Том III–7. Серия: Машиностроение. Энциклопедия в сорока томах. Издание: 2–е. М. Машиностроение. 2005 г. 464 с.
9. НП–105–18. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии "Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже" (Зарегистрировано в Минюсте России 20.12.2018 N 53090).
10. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. Изд. 2–е, дополненное. Иркутск: Издание ГП "Иркутская областная типография №1", 1999. 600 с.
11. Единые нормы времени и расценки на техническое диагностирование оборудования, сооружений и трубопроводов. Дата добавления в базу: 01.10.2014, дата актуализации: 01.01.2021. Библиотека нормативной документации.
URL: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293781/4293781364.htm> [Дата обращения 01 апреля 2021].
12. Черепанов А.П., Ляпустин П.К. Повышение качества контроля и диагностики при подготовке к декларированию и сертификации единичных и уникальных машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т.64, № 4. – С. 44 –51. – DOI: 10.26731/1813–9108.2019.4(64).44 – 51.4451
13. РД 03–606–03. Инструкция по визуальному и измерительному контролю.
14. Красных Б.А., Мокроусов С.Н., Махутов Н.А., Митрофанов А.В., Барышов С.Н. Ограничение прогнозируемого ресурса и назначаемого срока безопасной эксплуатации оборудования нефтегазового комплекса // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 30–33.
15. РД 26.260.005–91. Методические указания. Оборудование химическое. Номенклатура показателей и методы оценки надежности.
16. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Оценка эффективности технического диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 10. – С. 43–46.
17. РД 50–639–87. Методические указания. Надежность в технике. Расчет показателей надежности. Общие положения. – М.: Изд. стандартов, 1987.
18. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2005. – Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
19. Вероятностный риск–анализ конструкций технических систем / А.М. Лепихин, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, А.П. Черняев. – Новосибирск: Наука, 2003. – 174 с.