Экспериментальная оценка вероятности выявления несплошностей металла при ультразвуковом контроле нефтегазового оборудования

Павлов Олег Александрович (главный специалист),
Сапун Алексей Александрович (главный специалист),
Моисеев Александр Анатольевич (главный специалист),
Копытов Дмитрий Владимирович (главный специалист)
ОАО «Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика»
460047, Россия, г. Оренбург, ул. Юных Ленинцев, 22
Тел.: 8(3532) 63-84-07
E-mail: contact@tdiag.ru

Статья посвящена проблемам выявляемости дефектов при диагностировании оборудования нефтегазового комплекса: из литературных источников известно, что при ультразвуковом контроле вероятность пропуска дефекта, например, площадью 4 мм^2 в толстостенном сепараторе может достигать 50 %. В статье представлены результаты экспериментального определения зависимости вероятности выявления несплошностей основного металла типа водород-индуцированного растрескивания. Приведены сведения об экспериментальных образцах с искусственными дефектами, данные фактической вероятности выявления дефекта, полученные по результатам работы представительной группы дефектоскопистов. Экспериментально получено уравнение зависимости выявляемости от площади дефекта, в целом соответствующее классической упрощенной модели выявляемости дефектов методами неразрушающего контроля.

Ключевые слова: промышленная безопасность, диагностирование, оценка выявляемости.

При эксплуатации технологического оборудования опасных производственных объектов (ОПО) добычи сероводородсодержащего газа, конденсата, нефти риск причинения вреда определяется вероятностью аварии (отказа) (Va) и тяжестью ее последствий. В соответствии с требованиями и условиями промышленной безопасности Va не должна превышать нормированных значений [1], которые для этого оборудования в зависимости от тяжести последствий аварии (отказа) определены в нормативно-технической документации (НТД) [2] и составляют $1\times10^{-2}\div1\times10^{-6}$. Для обеспечения величины Va на уровне [Va] применяются методы диагностирования и ремонта. Целью диагностирования является получение фактических значений параметров технического состояния объекта диагностирования. Результаты диагностирования служат исходными данными при оценке параметров и критериев технического состояния, несущей способности, коэффициентов запаса прочности, срока (ресурса) безопасной эксплуатации и Va.

Опыт эксплуатации нефтегазового оборудования показывает, что фактическая частота и тяжесть последствий имевших место отказов и аварий превышают допустимый уровень, при этом основной причиной отказов оборудования служат дефекты его элементов [3]. Виды дефектов, приведшие к отказам оборудования имеют следующее распределение: коррозионный износ - 54%, несплошности основного металла - 44%, несплошности сварных швов - 21%, отклонения структурно - механических свойств - 3%. Литературные и экспериментальные данные [3, 4, 5 и др.] о выявляемости дефектов применяемыми при диагностировании методами контроля показывают далеко не стопроцентную выявляемость. Например, эксперименты [5] показывают, что вероятность пропуска недопустимого с точки зрения действующей НТД дефекта наиболее применяемыми ультразвуковыми методами контроля достигает 65% и находится в зависимости от множества

факторов. Как известно [см. 4] основными показателями всех без исключения методов неразрушающего контроля является вероятность выявления существующего дефекта (R_{11}) или вероятность его пропуска (R_{10}):

$$R_{10} = 1 - R_{11} \quad (1)$$

При этом вероятность пропуска дефекта приобретает особую значимость для ультразвукового контроля (УК), проведение которого требует от исполнителя работ высокой квалификации, опыта и внимательности. Площадь минимального регистрируемого дефекта в металле стенки сепаратора обоснована в [3] и составляет 4 мм^2, а результаты опубликованных исследований [5] показывают, что вероятность пропуска при УК несплошности условной площадью 4 мм^2 достигает 50%.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального определения зависимости вероятности выявления несплошности основного металла типа водород-индуцированного растрескивания (ВИР) [3, 8], типичных для оборудования, работающего в условиях воздействия влажных сероводородсодержащих газа и нефти от площади этой несплошности. Для проведения эксперимента использовался фрагмент выведенного из эксплуатации сепаратора. Из фрагмента обечайки толщиной Н = 26 мм были изготовлены экспериментальные образцы, которые размечены каждый на 64 квадрата размером 50х50 мм. Каждому квадрату присвоен уникальный номер, из общего количества квадратов случайным образом выбраны 30. Со стороны внутренней поверхности обечайки путем фрезерования несквозных плоскодонных отверстий в границах выбранных квадратов в обечайку были заложены модели дефектов ВИР. Фотография одного из образцов представлена на рисунке 1.

В эксперименте принимали участие 10 человек, отобранных случайным образом из числа специалистов неразрушающего контроля (НК) предприятия, аттестованных на второй уровень квалификации в соответствии с требованиями ПБ-03-440-02 [9] и имеющих право на самостоятельное выполнение УК с выдачей заключения по его результатам. Для проведения контроля применялся ультразвуковой дефектоскоп "Кропус УД-2-ВП" (НПО "Кропус", Россия) укомплектованный совмещенным пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) "MSEB-4" (Krautkramer, Германия). Контроль проводился со стороны наружней поверхности обечайки - образца.

Участники эксперимента выполняли ультразвуковой контроль независимо. Номера квадратов с выявленными дефектами при проведении эксперимента регистрировались специально назначенным для этой цели наблюдающим специалистом, в обязанности которого также входил контроль неизменности параметров контроля.

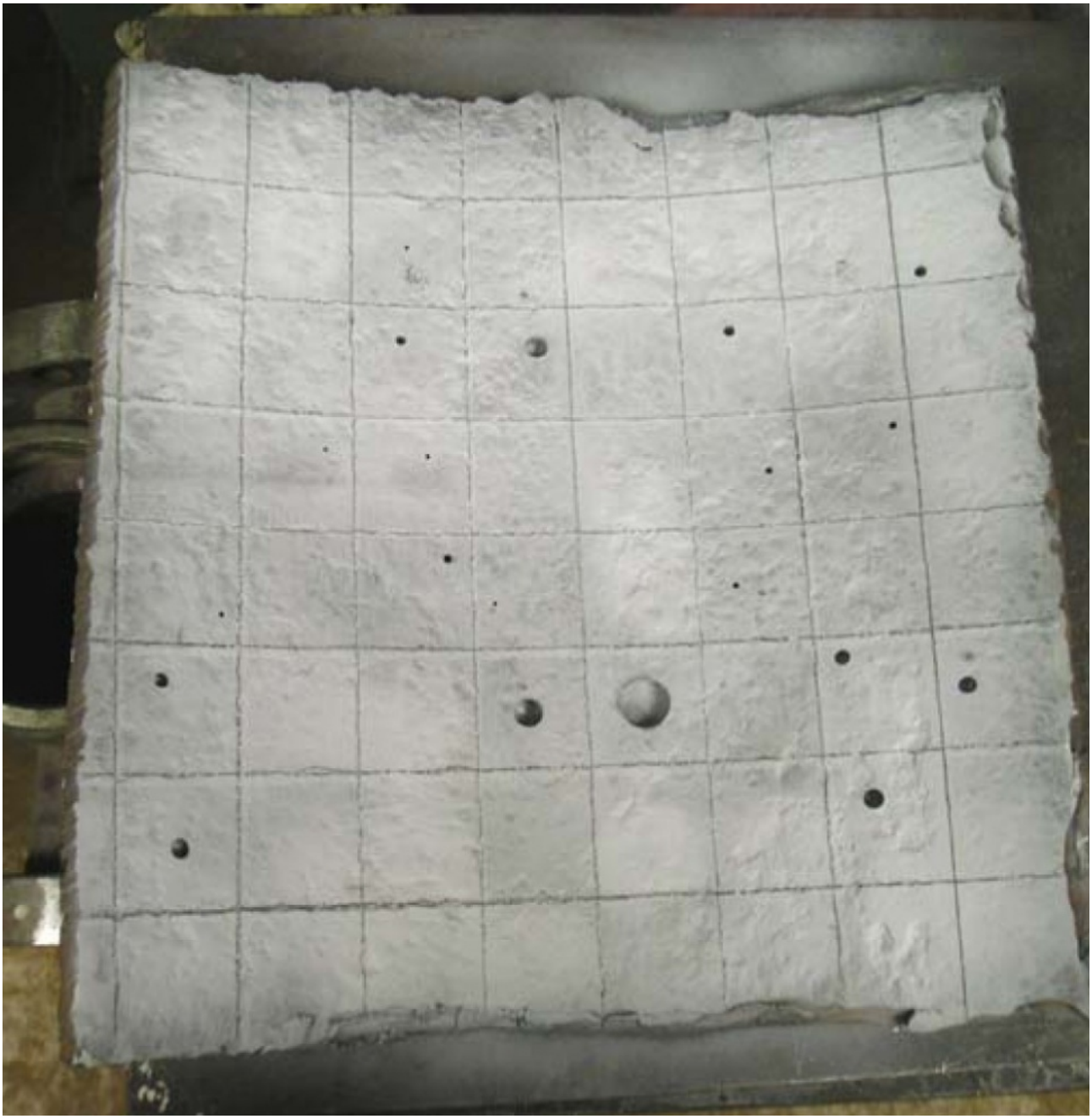

Рисунок 1 – Экспериментальный образец - фрагмент обечайки. Вид на внутреннюю поверхность с заложенными моделями дефектов типа ВИР

По аналогии с методикой определения выявляемости, предложенной в [7] выявляемость R_{11} определялась равенством

$$R_{11} = \frac{N_{выявл.}}{N_{контр.}}, \qquad (2)$$

где $N_{выявл.}$ - количество успешных выявлений дефекта, $N_{контр.}$ - общее число контролей.

Результат эксперимента представлен в таблице 1 и на диаграмме (рисунок 2).

№ квадрата	Площадь дефекта S, мм^2	Вероятность выявления, R_{11}, %
31	2	0,24
14	3,1	1,0
30	3,8	0,73
35	4,9	0,82
27	7,1	1,0
26	9,6	1,0
38	12,6	0,91
22	15,9	0,91
19	19,6	1,0

№ квадрата	Площадь дефекта S, мм^2	Вероятнос выявлени R_{11}, %
9	23,8	0,91
48	28,3	1,0
42	33,2	1,0
41	38,5	1,0
56	44,2	0,91
50	50,3	1,0
21	78,5	1,0
44	113,1	1,0
45	314,2	1,0

Таблица 1 – Результаты эксперимента по определению выявляемости дефектов различной площади

Среднее значение выявляемости дефектов S>4мм^2:

$$\overline{R_{11}} = 0{,}964$$

Выявляемость минимально регистрируемого дефекта S=4мм^2:

$$R_{11}(Smin) = 0{,}76$$

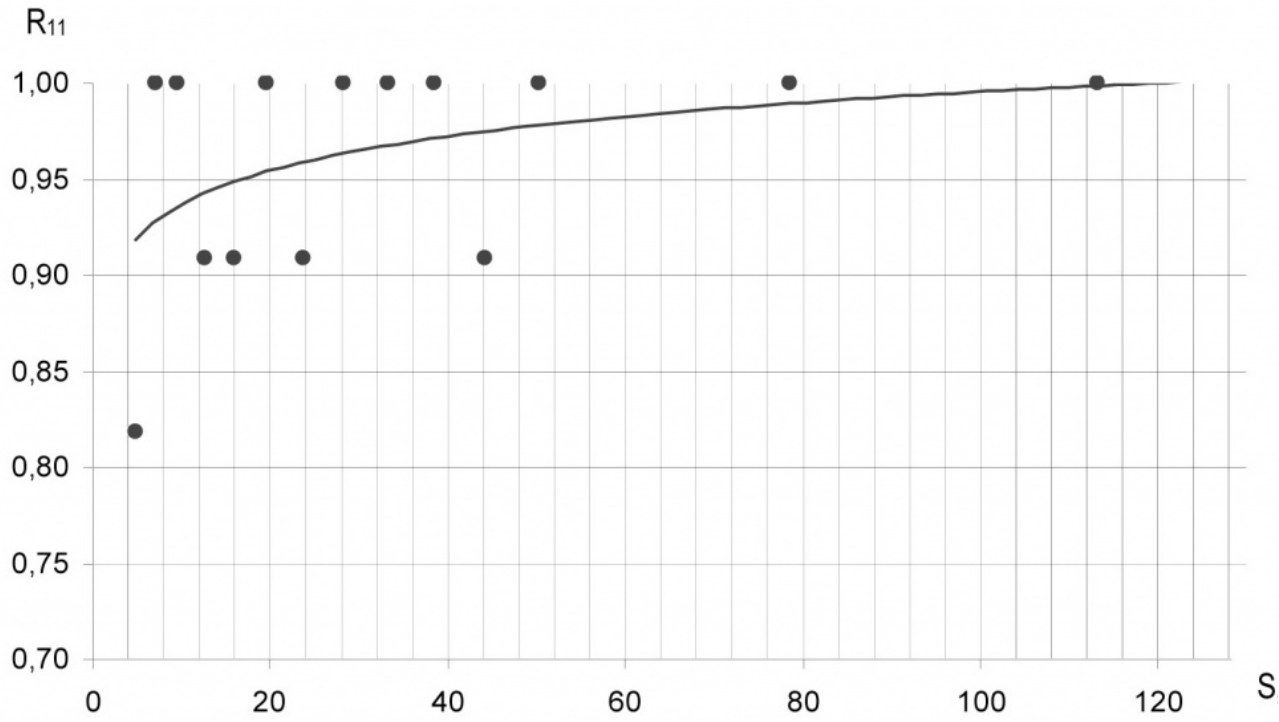

Рисунок 2 – График выявляемости дефектов в зависимости от их площади

Форма зависимости (см. рисунок 2) в целом соответствует классической [10] упрощенной модели выявляемости дефектов методами НК.

Уравнение кривой рисунка 5 имеет вид:

$$B(S) = 0.0255 \times \ln(S) + 0.8782 \quad (3)$$

Использование равенства (3) на практике позволяет прогнозировать выявляемость дефектов типа ВИР ультразвуковым контролем в обечайке теплообменника и аналогичных объектах контроля. Прогнозные значения выявляемости дефектов могут быть использованы для оценки вероятности пропуска дефекта, определяющего безотказность оборудования, т.е. при S > [S], а в случае неудовлетворительных значений выявляемости (R_{11} < [R_{11}]) принятия мер повышения выявляемости дефектов известными методами: увеличением числа независимых контролей (операторов), применением дублирующих методов НК и т.д.

Также мы можем иметь обратную ситуацию, когда коэффициент запаса прочности обечайки теплообменника позволяет задать достаточно большую норму отбраковки [S], а значение R_{11}, полученное с помощью равенства (3) для такой площади S, может оказаться существенно выше критериального [R_{11}]. В таком случае мы можем повысить эффективность контроля и снизить трудозатраты при НК применением ПЭП большей площади, использование которых дает существенный рост производительности труда за счет сокращения времени сканирования объекта контроля.

Предложенный метод определения выявляемости дефектов нефтегазового оборудования, оптимизации программ и повышения эффективности неразрушающего контроля может позволить снизить расходы эксплуатирующих организаций на диагностирование и выполнение требований и условий промышленной безопасности.

Список используемых источников

1. 116-ФЗ "О промышленной безопасности"
2. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. - М.: НТЦ "Промышленная безопасность", 2001
3. Митрофанов А.В. Методы управления состоянием технологического оборудования по критериям вероятности и риска отказа. — М.: Недра, 2007. – 380 с.: ил.
4. Дымкин Г.Я., Коншина В.Н., Нокеманн К., Тиллак Г.-Р. Применение показателей достоверности для валидации методик неразрушающего контроля. - Дефектоскопия, 2000, №3, с. 75-84
5. Гетман А.Ф., Козин Ю.Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. –М.: Энергоатомиздат, 1997 — 288 с.
6. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. — М.: Машиностроение, 1995. – 488 с., ил.
7. Лукьянов В.Ф. Технологическая наследственность как фактор надежности сварных соединений
8. Гафаров Н.А., Гончаров А.А., Кушнаренко В.М. Определение характеристик надежности и технического состояния оборудования сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2001. – 239 с. с ил.
9. ПБ 03-440-02. Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля
10. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. – М.: Металлургия, 1979. – 88 с.