

УДК 621.644.073

Рябов Алексей Олегович,

магистрант

Самарский государственный технический университет

Россия, г. Самара

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА (МТТ)

***Аннотация:** В статье рассматривается проблема повышения достоверности идентификации дефектов МТТ на основе изучения вероятности обнаружения дефектов известными методами НК путем построения математических моделей совместного применения нескольких методов НК с последующей вероятностной оценкой комплексного подхода.*

***Ключевые слова:** методы неразрушающего контроля, магистральный трубопроводный транспорт, внутритрубная диагностика, вероятность обнаружения дефекта, комплексный метод.*

***Annotation:** The article deals with the problem of increasing the reliability of the identification of MTT defects based on the study of the probability of detecting defects by known NDT methods by constructing mathematical models for the combined use of several NDT methods, followed by a probabilistic assessment of an integrated approach.*

***Key words:** non-destructive testing methods, main pipeline transport, in-line diagnostics, defect detection probability, complex method.*

Актуальность анализа и синтеза методов и средств обнаружения дефектов МТТ

В соответствии с современной технологией эксплуатации сложного оборудования, в частности МТТ, важным требованием является сохранение нормального состояния линейной части промышленных и магистральных трубопроводов, дающего возможность реализовать составные части актуальной в настоящее время РАМ-технологии, позволяющей содержать оборудование в состоянии надежности, безопасности и ремонтпригодности.

С целью реализации указанной выше технологии (в контексте основной темы представленного научного исследования) необходимо вовремя выявлять дефекты линейной части МТТ. Особое внимание уделяется дефектам типа «сквозное отверстие», приводящим к появлению утечек из МТТ. Заметим, что причинами появления утечек являются как естественные физические процессы, так и искусственные, обусловленные человеческой деятельностью (врезки) [1, 2].

Для достижения поставленной выше цели широко и обоснованно используют многочисленные диагностические методы неразрушающего контроля (НК) [3, 4].

С учетом случайного характера измерительного процесса, реализованного в любом методе неразрушающего контроля, вероятность определения дефекта достаточно мала и повышение достоверности результата измерения является актуальной задачей. Как известно, вероятность идентификации дефекта можно повысить путем многократного проведения измерений, что сильно затруднено в случае внутритрубной диагностики.

Для выхода из сложившейся ситуации предлагается комбинированное использование различных методов неразрушающего контроля с вероятностной оценкой комплексного использования методов НК [5].

Вероятностная оценка достоверности результатов диагностирования состояния МТТ при комплексном подходе

Любой метод неразрушающего контроля может считаться практически полезным только в том случае, если для него установлен ряд параметров, позволяющих оценить возможности контроля с вероятностной точки зрения методами теории вероятности. Важнейшим среди этих параметров является достоверность контроля, которая оценивается вероятностью принятия безошибочных решений по результатам неразрушающего контроля. Использование показателей достоверности позволяет оценить выгоду применения многократного контроля с использованием одного метода либо повышение достоверности выявления дефектов с параллельным использованием нескольких методов неразрушающего контроля.

Известно из практики, что различные типы дефектов выявляются разными методами диагностирования с определенной степенью достоверности. В таблице 1 представлены экспериментально установленные вероятности обнаружения различных дефектов известными методами НК.

Таблица 1

Экспериментально установленные вероятности обнаружения различных дефектов известными методами НК

Вид дефекта	Вид (метод) неразрушающего контроля				
	Р(Визуальный и измерительный (ВИК))	Р(Радиационный (Рад))	Р(Магнитопорошковый (МП))	Р(Вихре-токовый (ВТ))	Р(Ультразвуковой (УЗК))
Включения шлаковые	0,1	0,4	0,1	0,2	0,4
Закаты	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3
Коррозия	0,3	0,1	0,1	0,4	0,4

Непровары	0,1	0,3	0,3	0,1	0,4
Газовая пористость	0,1	0,4	0,2	0,4	0,3
Раковины	0,1	0,4	0,1	0,1	0,4
Расслоения	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
Трещины	0,4	0,3	0,5	0,4	0,5

Для обоснованного использования различных методов НК и повышения вероятности идентификации дефектов было проведено математическое моделирование обнаружения дефектов путем различного комбинирования методов. Рассмотрены следующие комбинации по двум, трем, четырем и пяти методам.

При сложении вероятностей двух методов определяется вероятность того, что будет выявлен дефект при проведении первого, или второго метода, или обоих вместе, результаты сведены в таблицу 2.

Вероятность определения дефекта двумя методами:

$$P(A+B) = P(A)+P(B)-P(AB). \quad (1)$$

Для каждой комбинации используются различные методы.

Например, А – Визуально - измерительный метод (ВИК);

В – Радиационный метод (Рад).

Для расчета будет использована формула

$$P(\text{ВИК}+\text{Рад}) = P(\text{ВИК})+P(\text{Рад})-P(\text{ВИК})\times P(\text{Рад}),$$

где $P(\text{ВИК}+\text{Рад})$ – вероятность обнаружения дефекта при использовании двух методов: (ВИК) и (Рад).

Аналогично получены формулы для других комбинаций сложения вероятностей двух методов.

В таблице 2 представлены вероятности определения дефекта комбинациями двух различных методов НК.

Таблица 2

**Вероятности определения дефекта
комбинациями двух различных методов НК**

Вид дефекта	Значения вероятностей сложения двух методов									
	P(ВИК+Рад)	P(ВИК+МП)	P(ВИК+ВТ)	P(ВИК+УЗК)	P(Рад+МП)	P(Рад+ВТ)	P(Рад+УЗК)	P(МП+ВТ)	P(МП+УЗК)	P(ВТ+УЗК)
Включения шлаковые	0,46	0,19	0,28	0,46	0,46	0,52	0,64	0,28	0,46	0,52
Закаты	0,28	0,28	0,44	0,44	0,19	0,37	0,37	0,37	0,37	0,51
Коррозия	0,37	0,37	0,58	0,58	0,19	0,46	0,46	0,46	0,46	0,64
Непровары	0,37	0,37	0,19	0,46	0,51	0,37	0,58	0,37	0,58	0,46
Газовая пористость	0,46	0,28	0,46	0,37	0,52	0,64	0,58	0,52	0,44	0,58
Раковины	0,46	0,19	0,19	0,46	0,46	0,46	0,64	0,19	0,46	0,46
Расслоения	0,19	0,19	0,19	0,46	0,19	0,19	0,46	0,19	0,46	0,46
Трещины	0,58	0,7	0,64	0,7	0,65	0,58	0,65	0,7	0,75	0,7

Как следует из анализа результатов, представленных в таблице 2, вероятность обнаружения дефектов различна для различных комбинаций методов НК и максимальна при использовании определенных методов, выделенных красным цветом.

Аналогичным образом проведен анализ эффективности для комбинаций из трех, четырех и пяти методов НК.

При сложении вероятностей трех методов определяется вероятность того, что будет выявлен дефект при проведении первого, или второго, или третьего метода, или трех вместе, результаты сведены в таблицу 3.

Получена формула вероятности определения дефекта тремя методами, имеющая вид

$$P(A+B+C) = P(A)+P(B)+P(C)-P(AB)-P(AC)-P(BC)+P(ABC). \quad (2)$$

Для каждой комбинации методов использованы переборы А, В, С.

Например, А – Визуальный и измерительный метод (ВИК);

В – Радиационный метод (Рад);

С – Магнитопорошковый метод (МП).

Получена следующая формула:

$$P(\text{ВИК}+\text{Рад}+\text{МП}) = P(\text{ВИК})+P(\text{Рад})+P(\text{МП})-P(\text{ВИК}\times\text{Рад})-P(\text{ВИК}\times\text{МП})- \\ -P(\text{Рад}\times\text{МП})+P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП}).$$

Таблица 3

Вероятности определения дефекта комбинациями трех методов

Вид дефекта	Значения вероятностей сложения трех методов								
	P(ВИК+Рад+МП)	P(ВИК+Рад+ВТ)	P(ВИК+Рад+УЗК)	P(Рад+МП+ВТ)	P(Рад+МП+УЗК)	P(МП+ВТ+УЗК)	P(ВТ+УЗК+ВИК)	P(ВТ+УЗК+Рад)	P(УЗК+ВИК+МП)
Включения шлаковые	0,51	0,57	0,68	0,57	0,68	0,57	0,57	0,71	0,51
Закаты	0,35	0,50	0,50	0,43	0,43	0,56	0,61	0,56	0,50
Коррозия	0,43	0,62	0,62	0,51	0,51	0,68	0,75	0,68	0,62
Непровары	0,56	0,43	0,62	0,56	0,71	0,62	0,51	0,62	0,62
Газовая пористость	0,57	0,68	0,62	0,71	0,66	0,66	0,62	0,75	0,50
Раковины	0,51	0,51	0,68	0,51	0,68	0,51	0,51	0,68	0,51
Расслоения	0,27	0,27	0,51	0,27	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51

Трещины	0,79	0,75	0,79	0,79	0,83	0,85	0,82	0,79	0,85
---------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Результаты сложения вероятностей четырех методов сведены в таблицу 4.

Вероятность определения дефекта четырьмя методами вычисляется по следующей полученной формуле:

$$P(A+B+C+D) = P(A)+P(B)+P(C)+P(D)-P(AB)-P(AC)-P(BC)-P(AD)-P(BD)-P(CD)+P(ABC)+P(ABD)+P(ACD)+P(BCD)-P(ABCD).$$

Например, для четырех методов А, В, С, D,

где А – Визуальный и измерительный метод (ВИК);

В – Радиационный метод (Рад);

С – Магнитопорошковый метод (МП);

D – Вихретоковый метод (ВТ),

формула примет вид

$$P(\text{ВИК}+\text{Рад}+\text{МП}+\text{ВТ})=P(\text{ВИК})+P(\text{Рад})+P(\text{МП})+P(\text{ВТ})-P(\text{ВИК}\times\text{Рад})-P(\text{ВИК}\times\text{МП})-P(\text{Рад}\times\text{МП})-P(\text{ВИК}\times\text{ВТ})-P(\text{Рад}\times\text{ВТ})-P(\text{МП}\times\text{ВТ})+P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП})+P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{ВТ})+P(\text{ВИК}\times\text{МП}\times\text{ВТ})+P(\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{ВТ})-P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{ВТ}).$$

В таблице 4 представлены результаты расчета вероятности определения дефекта комбинациями четырех методов.

Таблица 4

Результаты расчета вероятности определения дефекта комбинациями четырех методов

Вид дефекта	Значения вероятностей сложения четырех методов				
	P(ВИК+Рад + МП+ВТ)	P(ВИК+Рад + МП+УЗК)	P(ВИК+Рад + ВТ+УЗК)	P(ВИК+МП + ВТ+УЗК)	P(Рад+МП + ВТ+УЗК)
Включенные шлаковые	0,61	0,71	0,74	0,61	0,74
Закаты	0,55	0,55	0,65	0,65	0,60
Коррозия	0,66	0,66	0,77	0,77	0,71
Непровары	0,60	0,74	0,66	0,66	0,74
Газовая пористость	0,75	0,70	0,77	0,70	0,80
Раковины	0,56	0,71	0,71	0,56	0,71
Расслоения	0,34	0,56	0,56	0,56	0,56
Трещины	0,92	0,90	0,87	0,91	0,90

Вероятность определения дефекта с пятью методами вычисляется по формуле

$$\begin{aligned}
 P(A+B+C+D+E) = & P(A)+P(B)+P(C)+P(D)+P(E)-P(AB)-P(AC)-P(BC)-P(AD)- \\
 & -P(BD)-P(CD)-P(AE)-P(BE)-P(CE)- \\
 & -P(DE)+P(ABC)+P(ABD)+P(ACD)+P(BCD)+P(ABE)+P(ACE)+ \\
 & +P(ADE)+P(BCE)+P(BDE)+P(CDE)-P(ABCE)-P(ABCD)-P(ABDE)-P(BCDE)- \\
 & -P(CDEA)+P(ABCDE).
 \end{aligned}$$

Ниже в таблице 5 представлены результаты моделирования применения комбинации из пяти методов.

Например, если А – Визуальный и измерительный метод (ВИК);
 В – Радиационный метод (Рад);
 С – Магнитопорошковый метод (МП);
 D – Вихретоковый метод (ВТ);
 Е – Ультразвуковой метод (УЗК),

то формула примет вид

$$\begin{aligned}
 P(\text{ВИК}+\text{Рад}+\text{МП}+\text{ВТ}+\text{УЗК}) = & P(\text{ВИК})+P(\text{Рад})+P(\text{МП})+P(\text{ВТ})+P(\text{УЗК})- \\
 & -P(\text{ВИК}\times\text{Рад})-P(\text{ВИК}\times\text{МП})-P(\text{Рад}\times\text{МП})- P(\text{ВИК}\times\text{ВТ})-P(\text{Рад}\times\text{ВТ})- P(\text{МП}\times\text{ВТ})- \\
 & -P(\text{ВИК}\times\text{УЗК})-P(\text{Рад}\times\text{УЗК})-P(\text{ВТ}\times\text{УЗК})+P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП})+ \\
 & +P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{ВТ})+P(\text{ВИК}\times\text{МП}\times\text{ВТ})+P(\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{ВТ})+P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{УЗК})+ \\
 & +P(\text{ВИК}\times\text{МП}\times\text{УЗК})+P(\text{ВИК}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК})+P(\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{УЗК})+P(\text{ВИК}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК})+ \\
 & +P(\text{МП}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК})-P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{УЗК})-P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{ВТ})- \\
 & -P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК})-P(\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК})- \\
 & -P(\text{МП}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК}\times\text{ВИК})+P(\text{ВИК}\times\text{Рад}\times\text{МП}\times\text{ВТ}\times\text{УЗК}).
 \end{aligned}$$

Таблица 5

Вероятности определения дефекта комбинациями пяти методов

Вид дефекта	Значения вероятностей сложения пяти методов
	$P(\text{ВИК}+\text{Рад}+\text{МП}+\text{ВТ}+\text{УЗК})$
Включения шлаковые	0,74
Закаты	0,67
Коррозия	0,78
Непровары	0,75
Газовая пористость	0,77
Раковины	0,72
Расслоения	0,60
Трещины	0,91

Таким образом, анализ результатов моделирования показывает экспоненциальное увеличение вероятности обнаружения дефектов с увеличением числа методов в комплексном подходе.

Заключение

Результаты моделирования комплексного подхода подтвердили эффективность его использования в задачах обнаружения дефектов и позволяют оптимальным образом комбинировать методы для обнаружения конкретного дефекта.

Библиографический список:

1. ГОСТ 27518-87. Диагностирование изделий. Общие требования.
2. Абрамян, С.Г. Контроль качества систем трубопроводного транспорта на всех этапах строительства и эксплуатации, учебное пособие / С.Г. Абрамян, С.Н. Савеня, А. А. Савеня. – Волгоград, 2011.
3. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В.В. Ключев, В.Б. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1998. – 656 с.
4. Современные методы и средства технического диагностирования / Л.П. Узакова, Н.О. Каландаров // Молодой ученый. – 2014. – № 9. – С. 216–218.
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов / В.Е. Гмурман. – 12-е изд. – М.: Юрайт, 2023. – 479 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-00211-9.