

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.179:331.821.004.64.003

ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ РИСКА АВАРИИ

© В. И. Иванов¹, А. В. Корнилова², В. В. Мусатов³*Статья поступила 25 июля 2014 г.*

Для комплексной оценки техногенной безопасности опасных объектов используется показатель риска аварии. Существующие методики оценки риска не учитывают техническое состояние объекта, степень его дефектности. В данной работе показана возможность и необходимость более широкого использования неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) для оценки вероятности аварии, сформулированы требования к выполнению анализа риска и намечены пути развития данных подходов. Рассмотрены вопросы введения новых требований к НК и ТД, связанных с представлением количественных показателей НК, т.е. достоверных данных о размерах дефектов и погрешностях измерений. Показана необходимость использования методов вероятностной механики разрушения для оценки реальных значений вероятности аварии.

Ключевые слова: риск разрушения; вероятность; техническая диагностика; НК; достоверность.

Развитие методов неразрушающего контроля и технического диагностирования (НК-ТД) достигло такого уровня, который может позволить с использованием полученной с их помощью информации решать задачи оценки вероятности аварии технических устройств. Целью работы явилось обоснование возможности и необходимости использования методов НК-ТД для оценки риска аварии.

За последнее время принят ряд законодательных актов и нормативно-технических документов, которые существенно изменили подходы, регламентирующие техногенную безопасность. В законе РФ от 4 марта 2013 г. № 22-ФЗ, который явился последним по времени корректирующим законодательным документом в ряду развития подходов по обеспечению промышленной безопасности, имеется ряд принципиальных нововведений. В частности, введены классификация опасных производственных объектов, а также риск-ориентированный надзор, который направлен на принципиальное изменение методов оценки промышленной безопасности и экспертизы промышленной безопасности.

Введено принципиально новое требование «Обоснование безопасности опасного производственного объекта», которое оформляется в виде специального документа. Этот документ должен содержать сведения о результатах оценки риска аварии на опасном производственном объекте (ОПО) и связанных с ней

угрозах, а также условия безопасной эксплуатации ОПО, включая требования к эксплуатации технических устройств. Для реализации этих положений выпущен приказ Ростехнадзора (15.07.2013 г., № 306 г.) «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта», в котором особое внимание уделяется использованию понятия «риск аварии» для количественной характеристики промышленной безопасности. Тем самым понятие «риск аварии» активно внедряется в практику оценки промышленной безопасности.

Понятие «риска аварии» включено в систему обеспечения промышленной безопасности как необходимый инструмент, который позволяет идентифицировать опасности, прогнозировать возможность аварий технических устройств (ТУ) на ОПО, оценивать возможные потери, связанные с авариями. Показатель риска аварии можно использовать в качестве универсального индикатора, обеспечивающего всесторонний анализ безопасности, и инструмента для снижения вероятности и последствий аварий.

Методы оценки риска аварии

Все подходы по оценке риска аварии R основаны на использовании формулы

$$R = PV, \quad (1)$$

где P — вероятность или показатель частоты нежелательного события (аварии); V — оценка последствий

¹ НИИН МНПО «Спектр», Москва, Россия;
e-mail: ivi444@mail.ru

² ЗАО «Прочность», Москва, Россия;
e-mail: ANNA44@yandex.ru

³ ЗАО «ГИАП-ДИСТцентр», Москва, Россия.



Рис. 1. «Дерево отказа» заправочной операции [2]

аварии. Каждая составляющая этого уравнения представляет собой комплексный многомерный функционал, обладающий сложной многомерной структурой [1]. Выражение (1) несмотря на свою простоту включает в себя множество сложнейших процессов, каждый из которых оценить количественно весьма трудно. В оценку последствий включают сценарии развития событий, которые следуют за разрушением (полным или частичным) технического устройства, непосредственно подсчет убытков и возможных летальных исходов.

Оценка убытков и потерь — рутинная операция при оценке риска. Более сложной задачей является рассмотрение сценариев развития процесса аварии, но эта часть проблемы в настоящее время является достаточно проработанной. Построены модели и схемы, позволяющие оценить развитие аварии и состояние технического устройства после разрушения. Примером анализа процесса разрушения может послужить дерево событий аварии. Одно из них, взятое из РД 03-418-01 [2], представлено на рис. 1.

«Дерево» начинает свой «рост» с момента аварии. Причем для простоты оценки и определенности расчетов вероятность аварии принимают $P = 1,0$. Затем рассматривают траектории развития процесса, при этом каждую точку разветвления оценивают экспертно с присвоением отдельным этапам процесса некоторого числа — показателя реализации, имитирующего вероятность наступления того или иного события.

В представленной методике имеется ряд «слабых» мест, где надежность оценок риска катастрофически снижается. Следует сказать, что начинать анализ риска с выбора вероятности аварии $P = 1,0$ (см. рис. 1) нелогично. Промежуточным решением этой проблемы является использование вместо $P = 1,0$ показателя статистики (частотности) аварий. Однако исходя из данных работы [3], можно заключить, что простое использование показателя статистики аварий не является корректным. Это связано с тем, что динамика аварийности представляется зависимостью средней интенсивности аварий за предшествующие несколько лет (в частности, пять лет). А интенсивность (частота) ава-

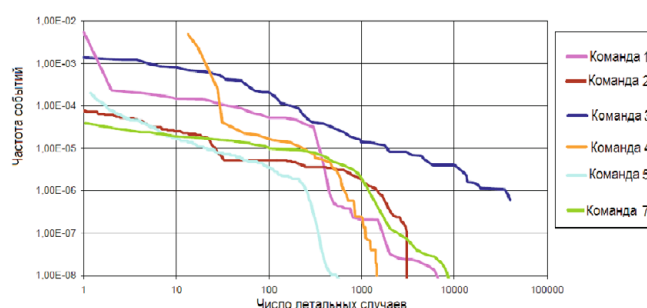


Рис. 2. Оценки социального риска, выполненные семью командами [4]

рий за год определяется с большим разбросом величины, которая в пределах 95 %-ного доверительного интервала достигает используемого значения интенсивности. В результате возникают большие разбросы в оценке риска аварии.

Для сравнения результатов оценки рисков, выполненных различными организациями, был осуществлен Европейский проект при координации Объединенным центром исследований европейской комиссии (Ispra) и Национальной лабораторией Riso (Дания, 2002 г. [4]). Проводили оценку риска аварии технических устройств химического производства. Сравнение результатов анализа риска, выполненного семью командами, выявило существенные расхождения в окончательных выводах относительно социального риска (рис. 2) [4].

Большие расхождения наблюдались в оценке как частот аварий, так и последствий аварий. Неопределенности при анализе риска имели место в фазе идентификации опасности, в ранжировании опасных сценариев вероятностным и детерминированным подходами, а также в траекториях развития процессов аварии. Все это приводило к совершенно различным заключениям. Как можно видеть из рис. 2, разница оценок социального риска (частоты событий гибели людей) достигала двух-четырех порядков. Поэтому определение (измерение) риска, которое имеет неустойчивость результатов, достигающих двух-четырех порядков, невозможно отнести к классу «измерений». Аналогичные критические замечания относительно надежности оценок современных методик количественной оценки риска аварии приведены в отечественной научно-технической литературе [5, 6].

Обобщая результаты проведенного выше краткого обзора методов анализа риска, можно заключить, что используемые методы дают, как правило, качественные (не количественные) результаты. Это связано со следующими причинами.

1. При оценке риска аварии используют статистику отказов, относящуюся к определенному классу объектов, но не к тому конкретному объекту, безопасность которого должна быть оценена экспертом. Статистика аварий отображает прошлый опыт, который позволяет определить тенденции, но не ситуацию

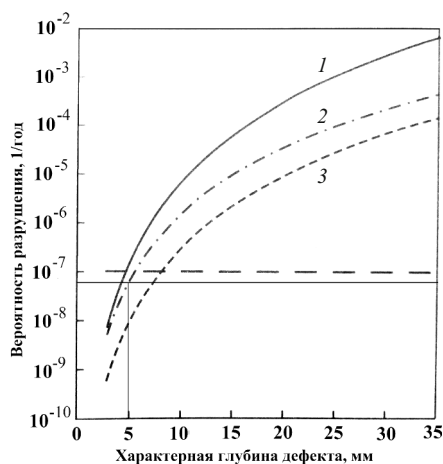


Рис. 3. Зависимости вероятности разрушения реактора АЭС от глубины дефекта при допустимом уровне вероятности разрушения (на реактор в год) $\times 10^{-7}$: 1 — консервативная оценка; 2 — реалистическая оценка; 3 — оптимистическая оценка [1]

с конкретным объектом, степень надежности которого необходимо определить.

2. Статистика аварий в большинстве случаев обладает ограниченной достоверностью, включает весьма неточные данные. Как показано в работе [3] разброс числа отказов в течение года для магистральных трубопроводов примерно равен числу отказов. Так, в 2011 г. средняя интенсивность аварий на магистральных нефтепроводах составляла $\sim 0,11$ (тыс. км $\cdot$ год) $^{-1}$, а 95 %-ный доверительный интервал — $0,17$ (тыс. км $\cdot$ год) $^{-1}$, т.е. разброс превзошел среднюю интенсивность аварий. При подобных разбросах невозможно результаты отнести к классу количественной оценки риска. Показатели статистики отказов, несомненно, представляют интерес. Но они в большой степени отражают уровень развития техники и культуру эксплуатации (менеджмент).

3. Отсутствуют однозначные алгоритмы оценки риска, использование которых дает устойчивый результат. Методики оценки риска аварии составлены таким образом, что их применение различными специалистами и командами приводит к существенно (на порядки) отличающимся результатам.

Несмотря на отмеченные ограничения оценка риска аварии с использованием принятых методик весьма полезна, поскольку позволяет повысить культуру эксплуатации для обеспечения промышленной безопасности.

Оценка риска аварии с использованием методов технического диагностирования

Риск аварии в полном объеме можно оценить с использованием дополнительной информации о техническом состоянии конкретного объекта, получаемой с применением комплекса методов технического диагностирования, в который входят неразрушающий кон-

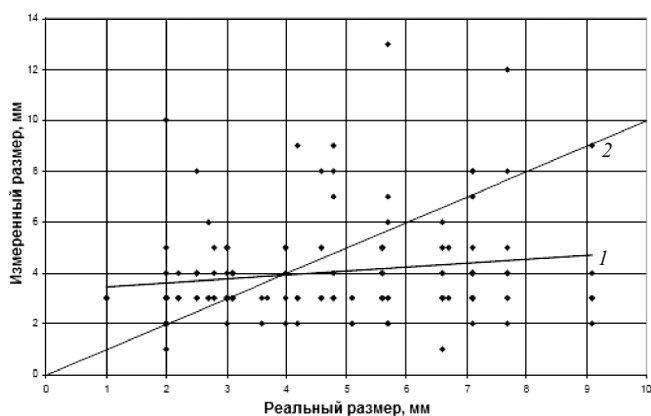


Рис. 4. Связь реального и измеренного размеров дефектов в практике УЗК [9]

троль, механика разрушения, методы металлографии и оценки коррозионного состояния.

Схема получения оценки вероятности аварии с использованием методов ТД следующая. Выполняют неразрушающий контроль, результатом которого является обнаружение дефектов и измерение их параметров. Проводят оценку коррозионного состояния объекта и металлографические исследования. Далее с использованием методов вероятностной механики разрушения определяют вероятность разрушения объектов с дефектами. В работе [1] приведены зависимости вероятности разрушения объекта от размера дефекта. Эти зависимости получены в результате обобщения влияния факторов неопределенности, учитываемых при расчетах прочности объекта с использованием методик вероятностной механики разрушения.

Из рис. 3 видно, что размер максимально допустимого дефекта, обеспечивающего вероятность разрушения, не превышающую допустимый уровень вероятности разрушения (10^{-7}), составляет 5 мм. При этом возникает задача измерения размеров дефектов объектов с оценкой погрешностей измерения и достоверности результатов контроля.

Отсюда следует, что необходим переход от рутинных методов дефектоскопии к современным дефектометрическим подходам, учитывающим вероятностные характеристики процессов обнаружения и оценки параметров дефектов [7, 8]. Вероятностная дефектометрия включает процесс обнаружения дефектов и измерение их параметров с определением погрешностей измерения и получением статистических распределенных параметров дефектов.

Используемые в практике методики НК не всегда удовлетворяют перечисленным требованиям. На рис. 4 представлены результаты ультразвукового контроля, которые свидетельствуют о том, что применяемые в промышленности штатные системы НК, включающие методики выполнения контроля, аппаратуру и операторов, не позволяют в требуемой мере измерить параметры дефектов [9]. Очевиден слишком



Рис. 5. Результаты ультразвукового контроля с использованием четырех различных методик [8]

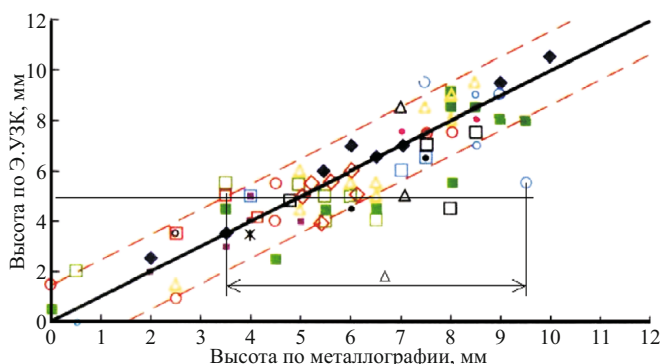


Рис. 6. Калибровочная характеристика экспертной ультразвуковой системы [10]

большой разброс размеров дефектов, свидетельствующий о влиянии случайностей на процесс НК. На рис. 4 линия 1 — зависимость среднеквадратических показаний размеров, линия 2 — идеальная калибровочная зависимость. Кроме того, в штатных технологиях отсутствуют данные о достоверности НК.

Аналогичные результаты получены отечественными исследователями [8]. На рис. 5 представлены данные УЗК при использовании четырех различных методик контроля, используемых в промышленности. Значение амплитуды сигнала, соответствующее 0 дБ, представляет норму браковки. Дефекты, превышающие значение 0 дБ (равные 3 мм по верхней шкале), должны быть забракованы. Из рис. 5 видно, что три из используемых штатных методик (кривые 1–3) не позволяют выявить недопустимые по принятым нормам дефекты и только одна экспертная методика — тандем (кривая 4) позволяет это сделать.

Из рис. 4 и 5 можно сделать вывод о необходимости использования при выполнении НК «калибровочных характеристик», которые связывают реальные размеры дефектов с измеренными. На рис. 6 представлена такая характеристика, полученная с применением экспертной системы УЗК, на которой видны разбросы показаний выполненных измерений высоты дефектов [10]. При этом максимальный разброс показаний не превышал двух раз, а погрешность измерений позволяла использовать полученные результаты для

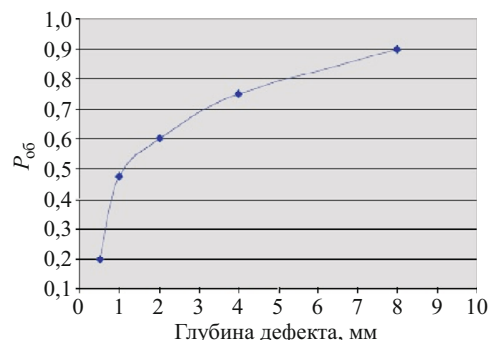


Рис. 7. Зависимость вероятности обнаружения дефектов ($P_{об}$) от их размеров [9]

оценки остаточного ресурса и вероятности разрушения (см. рис. 3) с приемлемыми ошибками.

Другим важным показателем, характеризующим качество НК, является функция выявляемости дефектов, представляющая собой зависимость вероятности обнаружения дефектов от их размеров. В зарубежной литературе эта характеристика носит название диаграмма вероятности обнаружения дефектов POD (Probability of Detection). На рис. 7 представлена типичная диаграмма ВОД (POD-диаграмма). Подобные диаграммы были приведены в документе по техническому диагностированию с оценкой риска (API RBI) и в документе по оценке пригодности к эксплуатации диагностируемого объекта (API FFS) [11]. Данная диаграмма может быть использована в качестве характеристики качества используемых систем НК.

Другим важным параметром качества системы НК является рабочая характеристика, связывающая вероятность правильного обнаружения дефектов и вероятность ложного обнаружения (вероятность ложной тревоги в терминах радиолокации) [7, 13]. На рис. 8 представлен пример рабочей характеристики с выделением рекомендуемой области работы системы НК. Цифрами 1, 2, 3 обозначены системы НК разного уровня по мере увеличения качества (квалификации) этих систем.

Качественной можно считать систему НК, которая обеспечивает попадание в зону $P_{об} \geq 0,8$ и $P_{ло} \leq 0,2$. На рис. 9 приведены характеристики для различных видов НК, полученные в эксперименте [12].

В отечественной литературе родственные характеристики, называемые достоверностью НК, представляют в матричной форме, где сравнивают исследуемую систему НК и эталонную систему через выявление ошибок правильного обнаружения дефекта и перебраковки [14]. Достоверность НК — показатель, связанный с вероятностью принятия правильных или ошибочных решений о наличии или отсутствии дефектов.

Таким образом, основная информация о техническом состоянии объекта при оценке риска аварии поступает в результате проведения неразрушающего контроля, который представляет необходимые данные

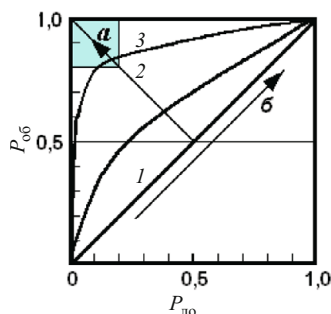


Рис. 8. Рабочая характеристика системы неразрушающего контроля: $P_{об}$ — вероятность обнаружения дефекта; $P_{ло}$ — вероятность ложного обнаружения [7]

о параметрах дефектов с требуемой достоверностью. С использованием описанных выше параметров и характеристик НК можно оценить риск аварии по следующей схеме.

1. При выполнении НК проводят измерение таких параметров дефектов, как его координаты, размер, форма, ориентация. Критически важным параметром является размер дефекта. При этом оценка риска может быть выполнена в случае, если получено распределение размеров с количественными значениями параметров.

2. С применением показателя вероятности обнаружения дефектов используемой системы НК (PoD) оценивают возможность присутствия в объекте необнаруженных дефектов соответствующих размеров.

3. При контроле особо опасных объектов дополнительным требованием является необходимость использования систем НК, которые обеспечивают выполнение следующих условий: $P_{об} \geq 0,8$; $P_{ло} \leq 0,2$.

4. Если система НК не обеспечивает требования $P_{об} \geq 0,8$, необходимо выполнять повторные контроли [15]. Количество этих контролей должно определяться выражениями

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_i)^m \quad (2)$$

или

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3), \quad (3)$$

где P_{Σ} — суммарная вероятность обнаружения дефектов; $P_{i,1,2,3}$ — вероятности обнаружения при контролях $i = 1, 2, 3, \dots, m$ (m — количество контролей). Выражение (2) используют при повторных контролях с использованием одной и той же системы НК, выражение (3) — при контролях с использованием разных систем или даже разных методов НК. Пример использования повторных контролей и комбинирования методов неразрушающего контроля для увеличения вероятности обнаружения большой номенклатуры дефектов приведен в работе [16].

5. С применением данных, полученных при выполнении ТД (см. пункты 1 – 4), рассчитывают статическую и/или циклическую прочность объекта, содержащего дефекты с учетом разбросов данных об их параметрах, а также погрешностей методик прочностных расчетов. С учетом параметров и условий нагру-

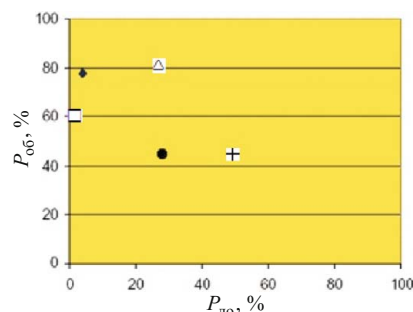


Рис. 9. Рабочие характеристики $P_{ло}$ для разных методов НК: Δ — ползучие волны; $\blacklozenge$ — автоматизированный А-скан; $\square$ — А-скан УЗК; $\bullet$ — телеконтроль; $+$ — метод магнитного потока [12]



Рис. 10. Обобщенная схема использования методов и средств технического диагностирования для оценки риска аварии

жения объекта оценивают скорость развития дефектов и ресурс эксплуатации с заданной вероятностью безотказной работы.

На рис. 10 приведена обобщенная схема использования методов и средств неразрушающего контроля, механики разрушения, технического диагностирования для оценки риска аварии технического устройства. Таким образом, неопределенность результатов НК и оценок прочности с использованием методов МР позволяет провести оценку вероятности разрушения с минимальными ошибками. В статье «убытки» (см. рис. 10) необходимо учитывать не только прямые убытки в результате аварии, но и затраты на обеспечение промышленной безопасности, включая затраты на НК + МР = ТД.

Для повышения достоверности оценок риска аварии необходима разработка методик неразрушающего контроля, в которые включены описанные выше показатели:

- 1) калибровочная характеристика с показателями точности измерения размеров дефектов;
- 2) вероятность обнаружения того или иного дефекта (функция выявляемости дефекта);
- 3) показатель достоверности системы НК (матрица достоверности или операционная характеристика).

Таким образом, техническое диагностирование следует определять как технологию установления технического состояния объекта с целью оценки его промышленной безопасности и прогнозирования ресурса. Из этого нового определения технологии ТД следует, что его цель непосредственно связана с определением риска аварии через оценку ее вероятности. Кроме того, ТД позволяет оценить риск аварии в процессе

работы технического устройства вплоть до окончания назначенного ресурса.

Использование методов НК-ТД позволяет существенно уменьшить погрешность оценки риска аварии, поскольку включает определение технического состояния конкретного объекта. Следует заметить, что на вероятность аварии, кроме дефектов материала, влияют и другие факторы, например, изменение состояния материала объекта (деградация структуры в результате, например, воздействия температуры, агрессивной среды и др.), условия нагружения. Анализ дополнительных факторов требует отдельного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

- Махутов Н. А., Фролов К. В., Драгунов Ю. Г. и др. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гаденина. — М.: Наука, 2009. — 499 с.
- Методические указания по проведению анализа риска на опасных производственных объектах. РД 03-418-01 (утв. Госгортехнадзором России 10.07.2001 № 30).
- Жулина С. А., Лисанов М. В., Савина А. В. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах / Безопасность труда в промышленности. 2013. № 1. С. 50 – 55.
- Lauridsen K., Kozine I., Markert F., et al. Assessment of uncertainties in risk analysis of chemical establishments. The ASSURANCE project. Final summary report. — Roskilde: National Laboratory, 2002. — 49 p.
- Лисанов М. В., Ханнин Е. В., Сумской С. И. О регулировании промышленной безопасности по количественным критериям допустимого риска / Безопасность труда в промышленности. 2012. № 12. С. 54 – 62.
- Гражданкин А. И. К рискориентированной промбезопасности / Методы оценки соответствия. 2012. № 7. С. 18 – 23.
- Иванов В. И., Власов И. Э. Некоторые проблемы неразрушающего контроля / Дефектоскопия. 2002. № 7. С. 82 – 93.
- Щербинский В. Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. Изд. 3-е, перераб. и доп. — Санкт-Петербург: СБЕН, 2014. — 495 с.
- McGrath B. A., Worrall G. M., Udell C. G. Programme For The Assessment of NDT In Industry — PANI 2, HSE Report On CD-Rom March. 2004.
- Бадалян В. Г., Вopilкин А. Х. Мониторинг сварных соединений трубопроводов с использованием систем АУЗК с когерентной обработкой данных. Автоматизированный ультразвуковой контроль объектов повышенной опасности: юбилейный сборник трудов ООО НПЦ «ЭХО+». — М. – СПб.: СБЕН, 2010. С. 12 – 16.
- American Petroleum Institute: a) Risk-Based Inspection Base Resource Document API 581; b) Recommended Practice for Fitness for Service API 579.
- Hardie F. Evaluation of the effectiveness of non-destructive testing screening methods for in-service inspection. HSE Research Report RR659, 2009. — 180 p.
- Иган Д. П. Теория обнаружения сигналов и анализ рабочих характеристик. — М.: Наука, 1983. — 216 с.
- Коновалов Н. Н. Нормирование дефектов и достоверность неразрушающего контроля сварных соединений. — М.: ГУП НТЦ ПБ, 2004. — 132 с.
- Власов И. Э., Иванов В. И. Полезность многократного контроля / Безопасность труда в промышленности. 2005. № 12. С. 50 – 53.
- Корнилова А. В. К вопросу о комбинировании методов неразрушающего контроля / Безопасность труда в промышленности. 2007. № 6. С. 49 – 54.

REFERENCES

- Mahutov N. A., Frolov K. V., Dragoonov Yu. G., et al. Analiz riska i povyshenie bezopasnosti vodo-vodyanykh йnergeticheskikh reaktorov [The analysis of risk and increase of safety of water-water power reactors]. — Moscow: Nauka, 2009. — 499 p. [in Russian].
- Methodical instructions on carrying out of the analysis of risk on dangerous industrial objects. RD 03-418-01 (Gosgortekhnadzor of Russia of 7/10/2001 N 30) [in Russian].
- Zhulina S. A., Lisanov M. V., Savina A. V. Metodicheskoe rukovodstvo po otsenke stepeni riska аварии na magistral'nykh nefteprovodakh i nefteproduktoprovodakh [The Methodical rule on Estimation of risk degree of failures on the main oil pipelines and oil-product pipelines] / Bezopasn. Truda Promyshl. 2013. N 1. P. 50 – 55 [in Russian].
- Lauridsen K., Kozine I., Markert F., et al. Assessment of uncertainties in risk analysis of chemical establishments. The ASSURANCE project. Final summary report. — Roskilde: National Laboratory, 2002. — 49 p.
- Lisanov M. V., Khanin E. V., Sumskey S. I. O regulirovanii promyshlennoi bezopasnosti po kolichestvennym kriteriyam dopustimogo riska [On regulation of industrial safety by quantitative criteria of admissible risk] / Bezopasn. Truda Promyshl. 2012. N 12. P. 54 – 62 [in Russian].
- Grazhdankin A. I. K riskorientirovannoi prombezopasnosti [About risk-focused industrial safety] / Metody Otsenki Sotvet. 2012. N 7. P. 18 – 23 [in Russian].
- Ivanov V. I., Vlasov I. E. Nekotorye problemy nerazrushayushchego kontrolya [Some problems of non-destructive testing] / Defektoskopiya. 2002. N 7. P. 82 – 93 [in Russian].
- Shcherbinsky V. G. Technology of ultrasonic testing of weldment. 3 edition. — St. Petersburg: SVEN, 2014. — 495 p. [in Russian].
- McGrath B. A., Worrall G. M., Udell C. G. Programme For The Assessment of NDT In Industry — PANI 2, HSE Report On CD-Rom March 2004.
- Badaljan V. G., Vopilkin A. H. Monitoring of welded connections of pipelines with use of systems AUZK with coherent data processing. The automated ultrasonic control of objects of the raised danger. The anniversary collection of works of Open Company «ECHO+». — M. – St. Petersburg: SVEN, 2010. P. 12 – 16.
- American Petroleum Institute: a) Risk-Based Inspection Base Resource Document API 581. b) Recommended Practice for Fitness for Service API 579.
- Hardie F. Evaluation of the effectiveness of non-destructive testing screening methods for in-service inspection. HSE Research Report RR659, 2009. — 180 p.
- Igan J. P. Signal Detection Theory and ROC Analysis. — Moscow: Nauka, 1983. — 216 p [in Russian].
- Konovalev N. N. Rationing of defects and reliability of non-destructive testing of weldments. — Moscow: Izd. GUP NTTs PB, 2004. — 132 p. [in Russian].
- Vlasov I. E., Ivanov V. I. Poleznost' mnogokratnogo kontrolya [Utility of repeated testing] / Bezopasn. Truda Promyshl. 2005. N 12. P. 50 – 53 [in Russian].
- Kornilova A. V. K voprosu o kombinirovanii metodov nerazrushayushchego kontrolya [To a question on a combination of methods of non-destructive testing] / Bezopasn. Truda Promyshl. 2007. N 6. P. 49 – 54 [in Russian].