УДК 620.179.1

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ

♦♦♦♦♦

METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENSURING THE SECURITY OF COMPLEX TECHNICAL FACILITIES IN CONDITIONS OF LIMITED RESOURCES

Стефанов Роман Евгеньевич
АО «Газпром газораспределение Тамбов»
r.stefanov@internet.ru

Аннотация. В статье приведены методологические аспекты обеспечения безопасности сложных технических объектов в условиях ограниченных ресурсов. Рассмотрены основы обеспечения безопасности сложных объектов и управления ограниченными ресурсами (критичность систем; анализ данных по критичным элементам; механизмы выявления различных дефектов; планирование восстановления критичных элементов); обеспечение безопасной эксплуатации сложных систем в условиях ограниченных ресурсов (причины аварий с разрушением трубопроводов и меры по их предотвращению; методология эксплуатационного контроля на основе концепции риска; ранжирование сегментов трубопроводов; оценка частот повреждения трубопроводов; анализ структурной надёжности; анализ эксплуатационных данных для трубопроводов; основные механизмы деградации трубопроводов; опыт применения RI-ISI). Выполнено моделирование централизованной системы обеспечения безопасности сложных технологических объектов.

Ключевые слова: анализ данных по критичным элементам; механизмы выявления различных дефектов; планирование восстановления критичных элементов; причины аварий с разрушением трубопроводов; методология эксплуатационного контроля на основе концепции риска; ранжирование сегментов трубопроводов; оценка частот повреждения трубопроводов; основные механизмы деградации трубопроводов.

Stefanov Roman Evgenievich
JSC «Gazprom Gas Distribution Tambov»
r.stefanov@internet.ru

Annotation. The article presents methodological aspects of ensuring the safety of complex technical facilities under conditions of limited resources. The article considers the fundamentals of ensuring the safety of complex facilities and managing limited resources (system criticality; analysis of data on critical elements; mechanisms for detecting various defects; planning the restoration of critical elements); ensuring the safe operation of complex systems under conditions of limited resources (causes of accidents with pipeline destruction and measures to prevent them; methodology of operational control based on the risk concept; ranking of pipeline segments; assessment of pipeline damage frequencies; analysis of structural reliability; analysis of operational data for pipelines; main mechanisms of pipeline degradation; experience of using RI-ISI (Risk Informed In-Service Inspection)). Modeling of a centralized system for ensuring the safety of complex technological facilities is performed.

Keywords: analysis of data on critical elements; mechanisms for identifying various defects; planning for restoration of critical elements; causes of accidents with pipeline destruction; methodology of operational control based on the risk concept; ranking of pipeline segments; assessment of pipeline damage frequencies; main mechanisms of pipeline degradation.

Сложные технические системы в своём развитии – от первоначальной идеи заказчика и генерального конструктора до её монтажа или вывода из эксплуатации (списания) – проходят ряд этапов: несколько стадий и циклов проектирования, изготовление опытных агрегатов и образцов систем, эксплуатация в различных режимах и внешних условиях. Неизбежное накопление инженерных или проектных ошибок, технологических отклонений, брака и физических дефектов в элементах конструкций и систем могут сокращать запланированный период нормального функционирования и эксплуатации, а также снижать безотказность функционирования. Сравнительные оценки затрат на устранения дефектов, которые обнаруживаются на различных стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации системы возрастают примерно в 10 раз при сохранении не выявленного дефекта в системе, при переходе из одной стадии жизненного цикла в другую.

Рассмотрим ошибки в отчёте по безопасности ядерных реакторов WASH-1400, которые возникли на этапе проектирования одной из систем. Ошибка была обнаружена в дереве отказов, хотя документы с данными графическими материалами многократно

проверялись и перепроверялись. Многолетняя практика эксплуатации сложных систем показывает, что важной задачей при поддержании объектов в состоянии работоспособности является организация и проведение технического обслуживания и различных видов ремонтов (восстановления) элементов систем. Организация «замедления» процессов старения дорогостоящих систем и обеспечение их безопасности требует пересмотра существующих методик и подходов, а также разработки качественно нового подхода – применения моделей и методов системного анализа, процедур принятия решений для эффективного планирования технического обслуживания, выявления неисправностей и дефектов, планомерной организации замен.

Всегда присутствующий недостаток материальных и финансовых ресурсов привёл к необходимости проведения исследований проблемы поддержки технического ресурса и безопасности систем с целью выявления возможных резервов как технического, так и организационного плана, анализа и совершенствования не всегда рациональных подходов и планирования продления ресурсов агрегатов и систем.

Основная идея по использованию существующих резервов ресурсных и финансовых возможностей состоит в том, чтобы к оцениванию технического состояния систем, планированию их технического состояния, планированию восстановления и ремонта элементов и систем подойти избирательно (индивидуально), оценивая состояние отдельного элемента, узла, системы.

Анализ сведений (данных об отказах оборудования) по эксплуатации сложных систем показывает, что с течением времени (старением) доля отказов элементов и агрегатов возрастает, приводя к значительному росту затрат на организацию и проведение контроля систем. Избирательный подход также важен для уменьшения затрат ресурсов при организации контроля.

Проблема продления ресурса стареющих систем с учётом критерия безопасности является комплексной и состоит в проведении ряда этапов. На рисунке 1 представлена схема взаимосвязей различных функциональных задач, которые вносят наибольший вклад в обеспечение безопасности сложных объектов.

Основы обеспечения безопасности сложных объектов и управления ограниченными ресурсами

Критичность систем

При анализе безопасности сложных объектов значительное внимание уделяется вопросам определения критичности узлов и агрегатов систем. Проблема выявления критичных элементов особенно актуальна при анализе безопасности систем в условиях ограниченных ресурсов. Поскольку системы содержат большое количество элементов, то в условиях жёстко ограниченных ресурсов обеспечить повышение надёжности путём улучшения качества одновременно всех элементов не представляется возможным.

Однако разные подсистемы, агрегаты или системы играют при функционировании объекта далеко не одинаковую роль, и отказы разных компонентов могут приводить к разным последствиям. Поэтому необходимо сосредоточить усилия на совершенствовании узлов, критичных элементов, играющих в обеспечении безотказности наиболее важную (ключевую) роль.

Вывод о возможности ремонта или замены только части элементов системы без необходимости проведения ремонтов других элементов базируется на методике анализа и ранжирования наиболее критичных элементов в составе системы.

Проблема ранжирования элементов системы может решаться различными способами и состоит в целенаправленном выявлении критичных элементов, подлежащих исследованию и выявлению дефектов на данном периоде восстановления.

Критичность системы (элемента) есть свойство элемента, отражающее возможность возникновения отказа и определяющее степень влияния на работоспособность системы в целом для данного ранга последствий.

Критичность не может быть определена только одними свойствами элемента, а должна определяться в рамках всего технического объекта, его функциональной структуры. Наиболее распространёнными показателями, характеризующими критичность, являются структурная важность и важность в смысле надёжности.

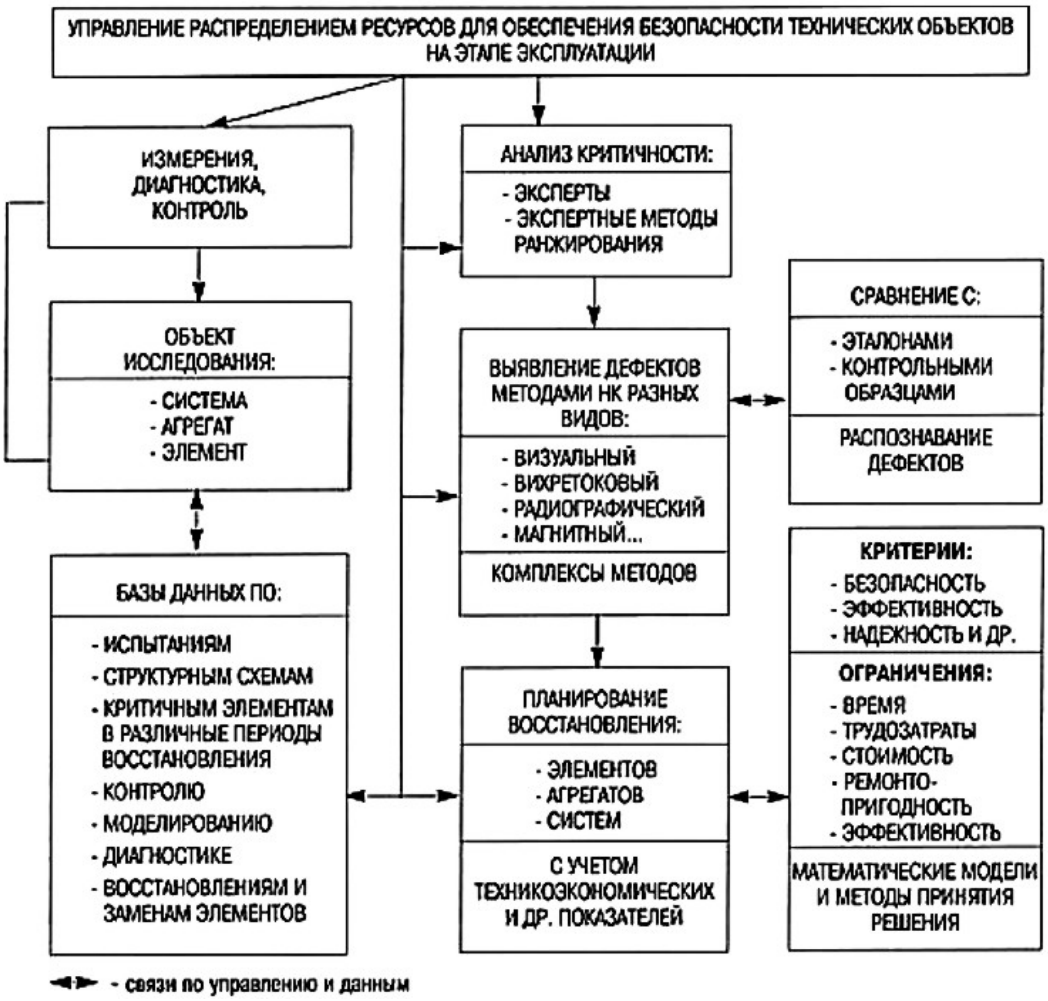


Рисунок 1 – Структурная схема процесса обеспечения безопасности при ограниченных ресурсах

Часто в инженерной практике при анализе систем различного функционального назначения (космических систем, энергетических установок, трубопроводов, электрических кабелей и т.д.) критичность рассматривается как более широкое понятие – векторное свойство. Выделяются 3 общих основных составляющих критичности:

1) надёжность (безопасность);
2) последствия отказа;
3) возможность уменьшения вероятности возникновения и тяжести последствий.

Пусть $K = (K_1, K_2, \ldots, K_j)$ – векторный показатель критичности, где K_j – j-й частный показатель, который отражает некоторую одну частную сторону, одну из характеристик объекта. Различные системы могут характеризоваться различными наборами частных показателей критичности. Эти частные показатели характеризуются как количественными показателями, так и могут принимать значения как лингвистические переменные.

Набор показателей K_j, принадлежащих K, может быть следующим:

- резервирование;
- возможность отказа;
- тяжесть последствий отказа;
- устойчивость элемента к воздействию внешних неблагоприятных факторов среды;
- контролируемость состояния элементов в ходе эксплуатации;
- продолжительность присутствия риска вследствие отказа;
- возможность локализации отказа и др.

Частные значения показателей критичности определяются различными видами шкал. Пример частных показателей критичности и их шкалы приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Частные показатели критичности и лингвистические шкалы оценивания

Показатели	Порядковые шкалы
Тяжесть последствий	1) отказ приводит к катастрофической ситуации; 2) в результате отказа возникает необходимость в принятии экстренных мер для предотвращения катастрофической ситуации; 3) отказ приводит к потере некоторых эксплуатационных свойств, в результате чего время эксплуатации может сократиться; 4) отказ приводит к потере некоторых эксплуатационных свойств, не влияющих на продолжительность эксплуатации; 5) отказ изменяет режимы работы зависимых элементов, что увеличивает вероятности их отказов
Резервирование	1) резервирование невозможно; 2) резервирование возможно, но отсутствует однократное резервирование без контроля состояния резерва; 3) однократное резервирование и состояние резерва контролируется; 4) двукратное и более резервирование без контроля состояния резерва; 5) двукратное и более резервирование, состояние резерва контролируется
Вероятность отказа	1) элемент обладает относительно высокой вероятностью отказа в течение эксплуатации; 2) отказ считается возможным и вероятным (конструкция прошла достаточный объём испытаний, обеспечивающий приемлемый уровень вероятности безотказной работы); 3) отказ считается возможным, но маловероятным (отказов данного элемента на предшествующих аналогах не наблюдалось); 4) отказ возможен, но крайне маловероятен (при проектировании приняты меры для исключения отказа, обеспечен высокий показатель безотказности, достигнута стабильность характеристик, отсутствуют предельные температурные, радиационные, вибрационные нагрузки и т.д.; 5) отказ считается невозможным (отсутствуют логические условия для возникновения отказа)
Устойчивость к воздействию внешних неблагоприятных факторов	1) из опыта эксплуатации известно, что в условиях воздействия внешних факторов ресурс меньше, чем проектный; 2) опыт эксплуатации в условиях воздействия внешних факторов отсутствует, но анализ предсказывает, что ресурс меньше проектного; 3) фактический ресурс в реальных условиях эксплуатации близок к проектному; 4) известно, что реальный ресурс больше проектного; 5) отсутствуют неблагоприятные факторы внешнего воздействия в период эксплуатации
Контроль состояния элемента	1) состояние элемента не контролируется; 2) предусмотрен контроль без прогнозирования; 3) предусмотрен прогнозирующий контроль
Контроль состояния элемента	Риск существует от начала функционирования до: 1) окончания эксплуатации; 2) завершения второго этапа функционирования; 3) завершения первого этапа функционирования
Возможность локализации	1) локализация нужна, но технически невозможна в данной конструкции; 2) предусмотрены меры к локализации отказа; 3) специальные меры к локализации отказа не нужны

Операция ранжирования элементов по степени критичности может осуществляться на различных уровнях структурирования объектов систем, агрегатов и узлов, частей конструкций и отдельных элементов на основе анализа морфологических бло-

ков и структурных взаимосвязей. Чем больше вес элемента, тем он важнее для обеспечения безопасности объекта.

Пусть в результате оценивания критичности элементов выделено множество критичных элементов $E = \{e_j, j \in J\}$ (где $J = \{1,...,n\}$), на надёжность которых следует обратить особое внимание при решении задачи обеспечения безопасности объекта.

Формально задача ранжирования элементов по степени критичности с учётом одного или совокупности критериев относится к классу задач определения предпочтений многомерных альтернатив. Её решение в каждом конкретном случае зависит от типов систем, выбранных частных показателей критичности, экспертной информации и т.д.

Анализ данных по критичным элементам

Для организации нормативно-технического обеспечения и сопровождения данными критичных элементов на различных этапах восстановления необходимо создание и ведение *баз данных* о дефектах и их положениях, размерах, результатах испытаний и диагностики, проблемах восстановления, структурных схемах систем и деревьях отказов и т.д. Эти данные являются важными как для оценки вероятности проявления дефектов, так и для более тщательного их изучения. Ведение «информационного паспорта» исследуемых критичных элементов с данными о технико-экономических показателях и операциях, которые выполнялись с элементами на предыдущих периодах восстановления, позволяют реализовать наиболее рациональные пути и способы устранения дефектов.

На основе анализа информационного паспорта элемента для различных периодов восстановления можно говорить о контроле над развитием дефекта, сравнивать обнаруженные дефекты с определёнными эталонами для их ранжирования, проводить классификационный анализ, принимая во внимание аспекты, связанные с безотказностью и ресурсами для системы. Информационный паспорт элементов – это также основа для выбора и построения принципов контроля с учётом технических характеристик и экономических показателей.

Отсутствие эксплуатационных данных и материалов диагностики и контроля не позволяет рационально организовывать эксплуатацию систем таким образом, чтобы расходовать технический ресурс как можно дольше, не снижая при этом уровень надёжности в целом.

Механизмы выявления различных дефектов

Проблема рационального использования технического ресурса для отдельных элементов и агрегатов системы ставит задачи исследования моделей и механизмов деградации элементов систем. Построение моделей для моделирования развития дефектов различного типа для различных типов элементов (кабели, трубы, двигатели и т.д.) с учётом различных внешних условий (окружающей среды) и возмущений является актуальной задачей.

Отметим также задачу выбора метода (инструментов) или комплекса методов неразрушающего контроля для проведения диагностики технического состояния как отдельных элементов, так и их совокупности с учётом технико-экономических показателей. Инженерная практика выдвигает ряд требований, которым должны удовлетворять методы, прежде всего, например, возможность визуализации дефектов, высокая выявляемость дефектов, чувствительность приборов, компактность и практичность оборудования. Для различных работ применяются как отдельные методы неразрушающего контроля, так и их комбинации (комплекты). Однако их совместное сочетание (например, визуальный и вихретоковый) позволяют получить более достоверную информацию о качестве металлоизделий.

Планирование восстановления критичных элементов

При решении задач восстановления актуальными являются модели и методы планирования восстановления элементов систем, которые учитывают возможности совмещения отдельных операций технического обслуживания, ремонта и технологических процессов, методы совершенствования расписаний обслуживания с учётом различных критериев и т.д. Для подготовки технического обслуживания критичных элементов необходимо также планировать обеспечение их различного рода ресурсами и разработать модели расходования ресурсов на основе теории управления запасами.

Важными являются задачи планирования объёмов и сроков проведения технического обслуживания, разработки оптимальных стратегий ремонтов по различным показателям готовности, стоимости и т.д. Основанием для назначения того или иного вида ремонта является выработка технологическим оборудованием технического ресурса, при котором создаётся угроза безопасности объекта.

При разработке таких моделей необходимо формировать показатели критериев и учесть ограничения на потребление различного рода ресурсов (численность специалистов, участвующих в проведении эксплуатационных процессов), оборудования, финансовых затрат, временных ограничений на восстановление.

Рассмотрим одну из задач принятия решений по выбору способов восстановления элементов систем. Предположим, что для фиксированного периода времени *T* в результате проведения исследования технического состояния выделенных критичных элементов и обработки результатов экспериментов по диагностике элементов (отдельных агрегатов или систем) с применением комплекса методов неразрушающего контроля определены возможные способы восстановления элементов и заданы ограничения по технико-экономическим показателям на проведение работ.

Обозначим через $E = \{e_j, j \in J\}$ (где $J = \{1,...,n\}$) множество элементов (агрегатов), у которых на данный период восстановления *T* необходимо проводить комплекс мероприятий, (техническое обслуживание различного уровня), восстановление (профилактику, замену и т.д.). Объёмы ремонтно-профилактических работ для каждого агрегата или системы зависят от экспертной информации о величине его остаточного ресурса, интенсивности отказов, результатов контроля систем, выделенных ресурсов и т.д.

Реализация восстановления работоспособности элемента e_j может осуществляться различными технологическими способами $x_{jk} \in X_j = \{x_{j1}, x_{j2},..., x_{jk}\}$. Тогда $x = (x_{1k1}, x_{1kj},..., x_{nkn})$ – перечень способов восстановления всех критичных элементов системы.

При проведении работ могут задействоваться: различное число бригад, ремонтных органов, оборудование различного типа и т.д., для различных элементов необходимы финансовые и ресурсные затраты. От этих затрат зависит качество и сроки проведения работ (замена узла новым или замена (восстановление) его части и т.д.), что и определяет показатель вероятности недостижения предельного состояния после их восстановления.

Определим для каждого способа восстановления x_{jk} показатели планируемых вероятностей не перехода в предельное состояние $p_j(x_{jk})$ и затрат ресурсов $g_j(x_{jk})$ (например, среднее время восстановления элементов и систем, стоимость ремонтно-профилактических работ, трудозатраты и т.д.).

Данные по ресурсам заносятся в таблицу, в которой для каждого элемента фиксируются возможные способы его восстановления – замена, частичное восстановление или резерв.

Пусть заданы ограничения $b_i, i \in I = [1,...,m]$ по каждому ресурсу для планового периода времени *T*. Тогда задача выбора способов восстановления элементов системы может быть сформулирована следующим образом:

- максимизировать надёжность:

$$P(x) = \prod p_j(x_{jk}) \to \max;$$

- при ограничениях на ресурсы восстановления:

$$g_i(x) = \text{SUM } g_{ij}(x_{jk}) \le b_i, i \in I;$$

$$x = (x_{1k1},...,x_{jkj},...,x_{nkn}) \in X = \prod X_j.$$

Результатом решения данной задачи являются фиксированные способы восстановления агрегатов или технологических систем в плановый период восстановле-

ния *T*, после выполнения которых надёжность системы является максимальной при выделенных ресурсах. Важно отметить, что при нахождении и интерпретации решений необходимо исследовать их корректность и адекватность. Для решения задачи могут быть использованы алгоритмы, базирующиеся на методе последовательного анализа и отсеивания вариантов.

Обеспечение безопасной эксплуатации трубопроводов в условиях ограниченных ресурсов

Рассмотрим конкретное воплощение указанных ранее методологических аспектов и концептуальных принципов на примере проблемы функциональных систем, важных для безопасности трубопроводов.

Причины аварий с разрушением трубопроводов и меры по их предотвращению

Эрозионно-коррозионный износ трубопроводов оказался одним из важнейших факторов старения оборудования и стало требовать целевых действий по его выявлению и предупреждению. Основной причиной разрушения трубопроводов явилось эрозионное повреждение защитного оксидного слоя из продуктов коррозии, которое в дальнейшем спровоцировало прямое коррозионное воздействие воды на внутреннюю поверхность трубопроводов.

Прямыми измерениями установлено, что наибольший износ наблюдается в местах локальных наибольших скоростей потока, в частности, в коленах и Т-образных переходах трубопроводов. Что касается кавитации, то её влияние на развитие аварий маловероятно, хотя и не исключается полностью при некоторых режимах эксплуатации.

Оказалось также, что эрозионно-коррозионный износ является слабым местом углеродистых (мягких) сталей, использовавшихся в качестве конструкционных материалов для трубопроводов, износ которых становится наиболее существенным как раз в области рабочих температур трубопроводов порядка 100–250 °С.

Изучение альтернативных материалов показало, что стойкость деталей к износу значительно (в несколько раз) повышается при наличии 1–2 % Cr и Mo в качестве легирующих элементов стали. Поэтому, в частности, в Великобритании изготавливают трубопроводы из стали, содержащей 2,25 % Cr и 1 % Mo.

Несомненно, также влияние кислорода в воде и водно-химического режима на износ трубопроводов, который для мягких сталей велик при pH ниже 5 или между 7–9. Поэтому для ограничения вредного влияния среды необходимо гарантированное поддержание pH в пределах 9,0–9,5.

Наиболее разумный компромисс обеспечивается использованием покрытия толщиной 0,5 мм из нержавеющей стали для трубопроводов достаточно большого диаметра (более 100 мм) из углеродистой стали или применением трубопроводов малого диаметра из нержавеющей стали. Такая идеология успешно реализована, в частности, в Швеции, в результате чего оказалось достаточным проводить инспекцию трубопроводов через 4 года. Кроме того, при этом значительно уменьшается перенос продуктов коррозии.

Следует, однако, отметить, что заменённые трубопроводы продолжают изнашиваться быстрее, чем ожидалось. В результате потребовалось дополнительно заменить более 100 участков трубопроводов, и появились сомнения в правильном понимании механизма этого явления.

Методология эксплуатационного контроля на основе концепции риска

В последнее время для повышения надёжности отдельных компонентов и систем, а также безопасности сложных технологических объектов в целом предложен и получил развитие подход, позволяющий применять концепцию риска при построении программ эксплуатационного контроля. Особенно актуальны такие разработки для ядерной и нефтегазовой отраслей, где часто стоит задача эффективного использования ограниченных материальных и финансовых ресурсов при проведении дистанционного или ручного неразрушающего контроля, продолжительность которого ограничена во времени. Развитие идеологии применения концепции риска для проведения эксплуатационного контроля (Risk Informed In-Service Inspection – RI-ISI) в плане выбора ме-

тодов неразрушающего контроля и разработки процедур самого контроля меняется в сторону интегрирования неразрушающего контроля в целостную программу управления сложным объектом, в рамках которой фундаментальным и обязательным является понимание механизмов деградации и повреждений, которые являются характерными для вполне определённого места той или иной системы. При этом, конечно же, процедура неразрушающего контроля подразумевает использование конкретных методов, вероятность обнаружения которыми дефектов, обусловленных одним из возможных механизмов деградации или их совокупностью максимальна.

Чрезвычайно интересен в этом плане опыт США по разработке и применению методологии RI-ISI для контроля трубопроводов. Речь идёт о разработке программ эксплуатационного контроля трубопроводов на основе результатов вероятностного анализа безопасности первого уровня (ВАБ-1). Основные этапы применения RI-ISI методологии приведены на рисунке 2.

Рисунок 2 – Методология применения RI-ISI

Рассмотрим основные этапы её выполнения более подробно.

На первом этапе необходимо определиться с объёмом программы RI-ISI по отношению к системам, т.е. необходимо выбрать системы и собрать данные для каждой системы по результатам их работы. Другими словами, требуется указать предварительный список систем, охватываемых в рамках программы RI-ISI, которые включали бы:

- системы трубопроводов (в т.ч. по классам), которые составляют границы контуров давления;
- системы трубопроводов, рассматриваемые в ВАБ 1-го уровня.

Результат отбора – категории систем по степени детализации, важной с точки зрения концепции риска.

Второй этап сопровождается выявлением режимов / механизмов отказа и их последствий. Для этого используют соответствующий метод FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). Необходимо отметить, что метод анализа режимов / механизмов отказов и их последствий является типичным примером индуктивного подхода к анализу влияния последствий отказов компонентов на работу системы в целом. Суть метода состоит в использовании систематического и логического процесса для идентификации

всех режимов / механизмов отказов на уровне системы, подсистемы, компонент либо процессов. Другими словами, метод индуктивным образом определяет эффекты и последствия влияния отказов на систему или процесс, которые находятся в стадии изучения, а также позволяет лучше понять механизм отказа.

В таблице 2 приведены основные источники данных по системам блоков.

Таблица 2 – Основные источники данных по системам блоков

Данные по системам трубопроводов		
Вероятностный анализ безопасности	Опыт эксплуатации	Конструкция трубопроводов
– анализ исходных событий (уровень 1); – частоты исходных событий; – анализ аварийных последовательностей; – модели деревьев событий / деревьев отказов; – базы данных по компонентам для ВАБ; – требования по контролю компонентов; – характеристики оборудования, важного для безопасности	– документация по выполнению программ контроля металлов; – хронология событий на трубопроводах; – документация по обслуживанию оборудования; – международные базы данных по отказам на трубопроводах; – данные по другим отраслям промышленности	– описание проекта и функционирования систем; – проектные и эксплуатационные параметры; – системные спецификации; – чертежи оборудования и трубопроводов; – расположение и описание сварных соединений; – результаты обхода / осмотра систем; – изометрические чертежи; – существующая программа контроля

Результатом выполнения этого анализа является кодификация способности системы, компоненты и т.д. функционировать с требуемыми параметрами надёжности. Наиболее полезным является возможность метода оценивать проектную адекватность системы выполнять свои функции, а также углублять понимание взаимосвязей на функциональном уровне между отдельными частями систем, подсистем и т.д.

Основными элементами метода являются:

- характеристика и назначение системы, подсистемы, компонента и т.д.;
- режимы / механизмы отказа;
- категория частот отказов;
- механизмы отказов и их причины;
- результат отказов (в т.ч. тяжесть последствий и время вынужденного простоя);
- последствия отказов;
- метод обнаружения отказов;
- средства и возможности (в т.ч. проектные) уменьшения вероятностей отказов.

Схема применения метода приведена в таблице 3.

Результаты и информация, собранные в ходе FMEA, используются затем для получения количественных и качественных оценок риска для сегментов трубопроводов.

Таблица 3 – Основные этапы проведения метода анализа режимов / механизмов отказов и их последствий

Метод анализа режимов / механизмов отказа и их последствий	
Оценка последствий	Оценка режимов / механизмов отказа / деградации
– прямые и косвенные эффекты; – размер течи; – возможность изолирования течи; – пространственные эффекты; – исходные события	– механизмы деградации; – проектные характеристики; – особенности монтажа; – эксплуатационные условия; – водно-химический режим; – опыт эксплуатации
Компоновка сегментов трубопроводов для оценки риска	
– целостность участков трубопроводов; – схожесть механизмов деградации; – схожесть последствий отказов; – близкая компоновка	

Для анализа безопасности трубопроводов применяют, в основном, два подхода: детерминистский и вероятностный. Не останавливаясь на преимуществах и недостатках каждого из них, отметим, что сегодня наибольшее распространение получил именно вероятностный метод – ВАБ. Выполнение первого уровня ВАБ позволяет на основе анализа проектных данных по системе в целом и отдельным системам на основе выделенных исходных событий построить деревья отказов и деревья событий, достаточно полно проследив возможные пути развития аварий. Конечной целью выполнения ВАБ первого уровня является получение условной вероятности повреждения трубопровода или частоты повреждения активной зоны, которая определена в соответствующих нормативных документах как количественная цель безопасности.

Ранжирование сегментов трубопроводов

Говоря о ранжировании сегментов, желательно, прежде всего, определить понятие сегмента. Под *сегментом* подразумевают непрерывный участок системы трубопроводов, для которого уровень последствий и/или механизм повреждений является тем же самым и определённым.

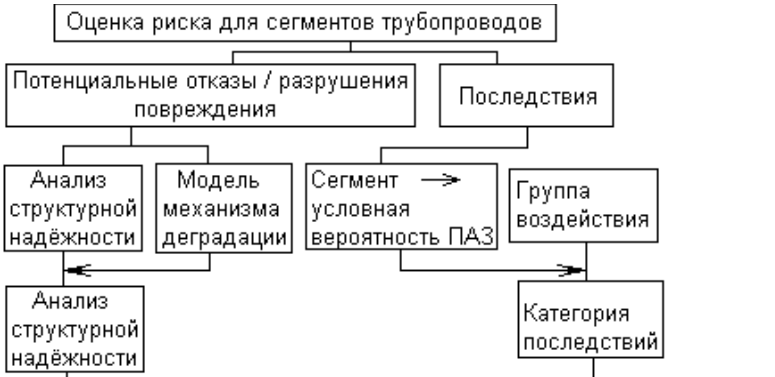
Сегменты образуются за счёт объединения примыкающих участков компонентов системы, для которых характерны либо те же уровни последствий, либо тот же механизм повреждений.

Выделяются 2 категории сегментов трубопроводов:

1) сегменты, важные для безопасности;
2) сегменты, не важные для безопасности.

При этом каждая из категорий ранжируется по вкладу в частоту проплавления активной зоны, которая и является принятой оценкой риска системы в целом.

Третий этап связан с проведением оценок риска отдельных сегментов трубопроводов. Последовательность шагов при оценке риска отдельного сегмента трубопровода приведена на рисунке 3.



МАТРИЦА РИСКА

		Уровень последствий		
		Малый	**Средний**	**Высокий**
		ЧПАЗ < 1x10 -6	ЧПАЗ < 1x 10 -6... 1x10 -4	ЧПАЗ > 1x 10 -4
Ранг разрывов потенциальных трубопроводов отказов	Высокий Условная частота отказов ~10 -4	Категория среднего риска 5	Категория высокого риска 3	Категория высокого риска 1
	Средний Условная частота ~10 -5	Категория низкого риска 6	Категория среднего риска 5	Категория высокого риска 2
	Низкий Условная частота ~10 -6	Категория низкого риска 7	Категория низкого риска 6	Категория среднего риска 4

Рисунок 3 – Последовательность этапов при оценке риска отдельного сегмента трубопровода

Высокий уровень последствий связан с нарушением границ контура давления, ведущим к существенному вкладу в суммарный риск. *Средний* – определяет события,

не относящиеся к высокому либо низкому уровням последствий. *Низкий* – нарушение границ контура давления, приводящее к ожидаемым эксплуатационным событиям и не ухудшающее возможности трубопровода по ослаблению последствий отказов.

Одна из «сильных» сторон рассматриваемого RI-ISI подхода состоит в том, что его применение невозможно без детального изучения и понимания механизмов деградации трубопроводов.

Оценка частот повреждения трубопроводов

Задача оценки частот повреждения трубопроводов является затратной с точки зрения как трудовых, так и финансовых ресурсов. Говоря об оценке частот, необходимо отойти от вероятностных повреждений трубопроводов и использовать частотные характеристики, которые, особенно для редких событий, являются более полными с точки зрения их использования при расчёте риска. Для оценки частот повреждения трубопроводов используется 2 подхода:

1) анализ структурной надёжности;
2) анализ эксплуатационных данных.

Анализ структурной надёжности

Этот подход подразумевает использование вероятностных оценок на основе техники механики разрушений для расчёта вероятностей отказа / разрушения участка трубопровода как функции времени, включая такие параметры, как частота проведения контроля и вероятность обнаружения дефекта.

Использование метода Монте-Карло позволяет моделировать возникновение и развитие трещин, а также оценивать, какая их часть не будет продетектирована и отремонтирована до момента отказа трубопроводов. При этом вероятность отказа основана на повторяющемся применении детерминистских моделей роста трещин.

Реализованные алгоритмы включают в себя также частоту проведения контроля и вероятность обнаружения дефектов неразрушающими методами.

Программное обеспечение для реализации такой вероятностной модели доступно в пользовании далеко не всем вследствие сложности алгоритма. Отдельно необходимо упомянуть о погрешностях и неопределённостях, оценка которых – далеко не простая процедура. Опубликованные результаты по оценкам, полученным в рамках анализа структурной надёжности, содержат оценки частот отказов трубопроводов, которые слишком малы для их верификации, но должны быть в согласии с данными по опыту эксплуатации.

Анализ эксплуатационных данных для трубопроводов

Альтернативный метод оценки частот повреждения трубопроводов состоит в разработке моделей на основе опыта эксплуатации. Этот опыт составляет несколько десятилетий эксплуатации и является бесценным источником информации относительно наиболее вероятных причин большого количества течей трубопроводов и относительно малого до сих пор количества больших течей и разрывов трубопроводов.

Разработан целый ряд моделей для оценки корреляций частот повреждения трубопроводов и физических характеристик самих механизмов, вызывающих повреждения трубопроводов. Как правило, механизмы повреждения трубопроводов достаточно полно учитывают условия и режимы эксплуатации, а также механизмы деградации, которые либо прямо ведут к повреждению трубопроводов, либо существенно уменьшают возможности трубопроводов противостоять различным условиям переходных процессов. Поэтому опыт эксплуатации может быть использован практически при рассмотрении потенциальных отказов трубопроводов посредством идентификации характерных механизмов деградации, либо их комбинаций, а также эксплуатационных параметров и условий. Исходя из анализа данных, полученных при эксплуатации трубопроводов, можно, создав соответствующую базу данных, на основе понимания характерных механизмов отказа ввести процедуру ранжирования потенциальных отказов сегментов трубопроводов по их значимости как **высокая**; **средняя**; **малая**.

Поскольку на данном уровне детализации условное разбиение потенциальных отказов на 3 категории является приемлемым, то здесь не обсуждаются погрешности при оценке численных величин частот, которые были бы актуальны при необходимости работы с их абсолютными значениями.

На основании баз данных отказы трубопроводов могут быть классифицированы по следующим режимам отказов:

- трещины / протечки: дефекты, проникающие по толщине трубопроводов и приводящие к видимым признакам;
- течи: дефекты, для которых характерно разрушение трубопровода, проявляющееся в ограниченных, но легко обнаруживаемых протечках (диапазон характерных протечек – от течей из микроотверстий до нескольких литров в минуту);
- повреждения: дефекты, для которых характерны скорости протечек с параметрами, которые выше установленных техническими требованиями. Как правило, этот тип повреждений с характерными скоростями протечек обнаруживается системой обнаружения протечек;
- разрыв, разрушение, гильотинный разрыв: трубопровод разрушается либо в значительной мере по сечению трубопровода, либо вплоть до двухстороннего отрыва части трубопровода по полному сечению.

Основные механизмы деградации трубопроводов

Наиболее характерные механизмы деградации определяются особенностями трубопроводов, материалами, условиями эксплуатации и т.д.

К основным механизмам деградации относятся:

- термическая усталость;
- коррозионное растрескивание;
- коррозионное растрескивание под напряжением (межкристаллитная коррозия, транскристаллитная коррозия и т.д.);
- щелевая коррозия и локальное коррозионное воздействие (микробная коррозия, питтинговая коррозия и др.);
- эрозия при кавитации;
- эрозионная коррозия;
- вибрационная усталость;
- гидроудар.

Определения частот отказов / повреждений разрывов трубопроводов на основе имеющихся данных по конкретным механизмам деградации является предметом отдельного направления при моделировании процессов и оценке самих частот.

Величины частот для потенциальных разрывов трубопроводов вследствие специфических механизмов деградации позволяют выделить наиболее важные из них и проранжировать их по трём ранее введённым категориям.

В таблице 4 приведено разбиение механизмов деградации по категориям риска для оценки потенциальных разрывов трубопроводов в рамках матрицы риска.

Таблица 4 – Категории механизмов деградации при оценке потенциального риска для трубопроводов

Потенциальный риск разрыва для трубопроводов	Условия течи	Механизм деградации	Типичные величины частот
высокий	большая	эрозионная коррозия, гидроудар, вибрационная усталость	~ 10^{-2}
средний	малая	тепловая усталость, усталостная коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением, локальная коррозия	≤ 10^{-3}
низкий	отсутствует	отсутствует	< 10^{-4}

Моделирование централизованной системы обеспечения безопасности сложных технологических объектов

Ранее нами сформулированы теоретические основы построения централизованных систем обеспечения безопасности сложных технологических объектов. Общий вид такой системы представлен на рисунке 4. Подобная система должна представлять собой многоуровневый программно-аппаратный комплекс.

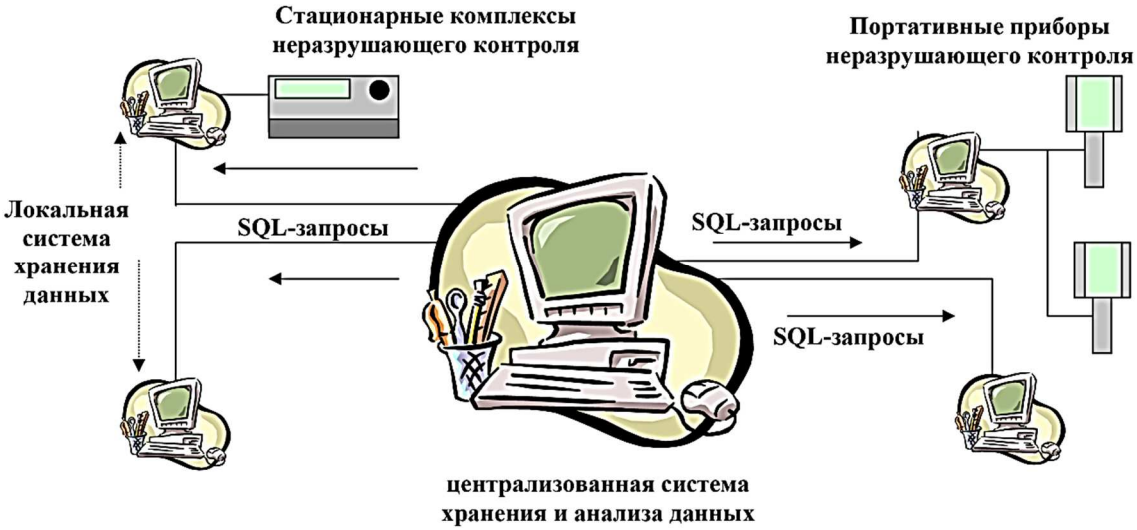


Рисунок 4 – Структурная схема системы обеспечения безопасности

На первом уровне системы находятся аппаратные комплексы, выполняющие непосредственную оценку технического состояния отказоопасных узлов объекта методами неразрушающего контроля. В качестве структурных элементов этого уровня могут выступать всевозможные портативные приборы, такие как УЗК и вихретоковые, дефектоскопы, толщиномеры, тепловизоры, дозиметры и т.п., а также различные стационарные комплексы неразрушающего контроля.

Информация об объекте, полученная на первом уровне системы обеспечения безопасности, поступает в базу данных локальных систем хранения данных, образующих второй уровень системы обеспечения безопасности. Большинство локальных систем хранения данных могут быть построены на базе обычных настольных персональных компьютеров, оснащённых соответствующими интерфейсными платами и программным обеспечением, при необходимости могут быть использованы мобильные персональные компьютеры. Данные с портативных приборов неразрушающего контроля заносятся в локальную систему хранения данных вручную, но чаще для этого используется RS 232-интерфейс. Стационарные комплексы неразрушающего контроля соединяются с локальной системой хранения данных посредством различных сетевых протоколов. Т.к. большинство подобных комплексов строятся на базе персональных компьютеров, то для связи с локальной системой хранения данных могут применяться стандартные протоколы локальных вычислительных сетей, но могут использоваться и специальные промышленные протоколы, например, HART-протокол.

Третьим уровнем является централизованная система хранения и анализа данных, собранных на первых двух уровнях системы обеспечения безопасности. В зависимости от масштабов системы это может быть один или несколько компьютеров, на которых находится распределённая база данных и программный комплекс анализа и обработки всей получаемой информации. Именно централизованная система хранения и анализа данных выполняет функцию интегрирования, превращая многочисленные системы неразрушающего контроля в целостную систему обеспечения безопасности объекта. В централизованной системе хранения и анализа данных заложены результаты многочисленных испытаний с целью определения применимости оценок состояния тех или иных контролируемых элементов на основе концепции риска.

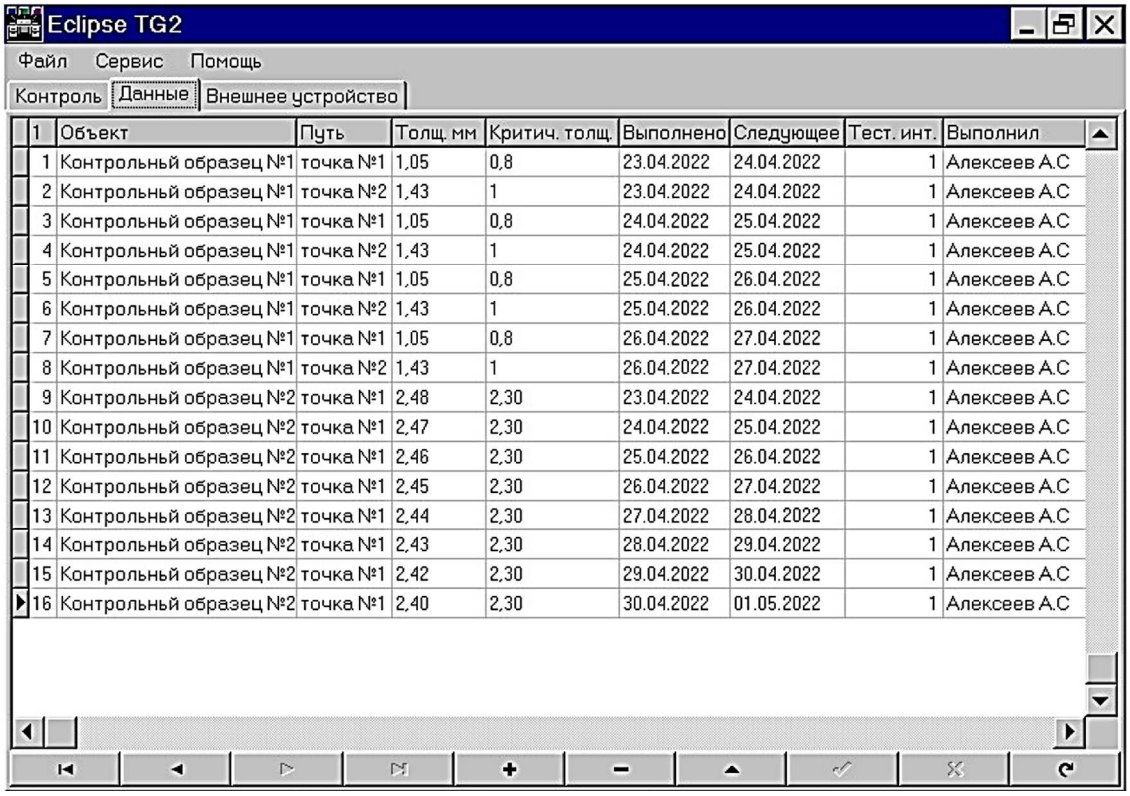
Ниже приведён алгоритм действия и задачи, возлагаемые на централизованную систему хранения и анализа данных. На основе теоретических и эксплуатационных данных выделяется ряд отказоопасных элементов и узлов контролируемой системы. Затем, на основе концепции риска, производится оценка и ранжирование выделенных элементов по тяжести последствий в случае их отказа, по механизмам возникновения отказов и по степени риска возникновения отказов. Таким образом, для каждого элемента системы определяется ряд предельно допустимых параметров и степень риска для работоспособности системы в целом в случае отклонения от этих параметров.

Одновременно с этим для каждого типа контролируемых элементов на основе ранее рассмотренных концепций определяется спектр методов неразрушающего контроля (т.е. структурный состав первого уровня системы обеспечения безопасности) для контроля этих параметров. Ведение с помощью базы данных дефектоскопического паспорта позволяет проводить объективный анализ тенденции деградации для каждого из контролируемых элементов. Постоянное сравнение текущих параметров контролируемых элементов с их критическим значением позволяет достоверно оценить техническое состояние контролируемого объекта. Использование подобной системы обеспечения безопасности даёт возможность достигнуть оптимального баланса между безопасностью и отказоустойчивостью всего объекта в целом и уровнем материальных вложений для поддержания работоспособности объекта. Как показала практика внедрения подобных систем, их применение позволило снизить эксплуатационные издержки в 5–8 и более раз.

Описание программного комплекса «Eclipse TG2»

Для иллюстрации изложенных выше принципов построения системы обеспечения безопасности нами написана программа в программном комплексе «Eclipse TG2». В структурной иерархии системы обеспечения безопасности данная программа является локальной системой хранения данных с элементами централизованной системы хранения и анализа данных. Программа предназначена для считывания данных тестирования с ультразвуковых дефектоскопов и толщиномеров компании «NDT Systems». Дефектоскопы серии «Quantum» и толщиномеры серии «Nova» и «Eclipse» являются многофункциональными приборами, предназначенными для широкого спектра дефектоскопических исследований. Приборы имеют сходный протокол передачи данных на персональный компьютер через интерфейс RS-232, поэтому программа может работать с приборами всех указанных серий.

Программа имеет базу данных, в которую заносится информация о тестируемом объекте (название объекта, количество и расположение точек, для которых выполняется контроль толщины, текущее считанное значение толщины и его критическое значение, а также дата проведения тестирования, дата следующего тестирования и имя дефектоскописта, выполнившего тестирование) (рис. 5).



1	Объект	Путь	Толщ. мм	Критич. толщ.	Выполнено	Следующее	Тест. инт.	Выполнил
1	Контрольный образец №1	точка №1	1,05	0,8	23.04.2022	24.04.2022	1	Алексеев А.С
2	Контрольный образец №1	точка №2	1,43	1	23.04.2022	24.04.2022	1	Алексеев А.С
3	Контрольный образец №1	точка №1	1,05	0,8	24.04.2022	25.04.2022	1	Алексеев А.С
4	Контрольный образец №1	точка №2	1,43	1	24.04.2022	25.04.2022	1	Алексеев А.С
5	Контрольный образец №1	точка №1	1,05	0,8	25.04.2022	26.04.2022	1	Алексеев А.С
6	Контрольный образец №1	точка №2	1,43	1	25.04.2022	26.04.2022	1	Алексеев А.С
7	Контрольный образец №1	точка №1	1,05	0,8	26.04.2022	27.04.2022	1	Алексеев А.С
8	Контрольный образец №1	точка №2	1,43	1	26.04.2022	27.04.2022	1	Алексеев А.С
9	Контрольный образец №2	точка №1	2,48	2,30	23.04.2022	24.04.2022	1	Алексеев А.С
10	Контрольный образец №2	точка №1	2,47	2,30	24.04.2022	25.04.2022	1	Алексеев А.С
11	Контрольный образец №2	точка №1	2,46	2,30	25.04.2022	26.04.2022	1	Алексеев А.С
12	Контрольный образец №2	точка №1	2,45	2,30	26.04.2022	27.04.2022	1	Алексеев А.С
13	Контрольный образец №2	точка №1	2,44	2,30	27.04.2022	28.04.2022	1	Алексеев А.С
14	Контрольный образец №2	точка №1	2,43	2,30	28.04.2022	29.04.2022	1	Алексеев А.С
15	Контрольный образец №2	точка №1	2,42	2,30	29.04.2022	30.04.2022	1	Алексеев А.С
16	Контрольный образец №2	точка №1	2,40	2,30	30.04.2022	01.05.2022	1	Алексеев А.С

Рисунок 5 – Окно данных программного комплекса «Eclipse TG2»

При запуске программа выдаёт окно со списком всех контролируемых объектов, информация о которых есть в базе. Из выпадающего списка можно выбрать объект, и для него будет выведено количество контролируемых точек, дата последнего тестирования и степень деградации в каждой из этих точек. На графике внизу окна отображается динамика изменения толщины.

При уменьшении толщины до критического значения график становится красного цвета и выдаётся окно с предупреждением. Панель управления программным комплексом «Eclipse TG2» приведена на рисунке 6.

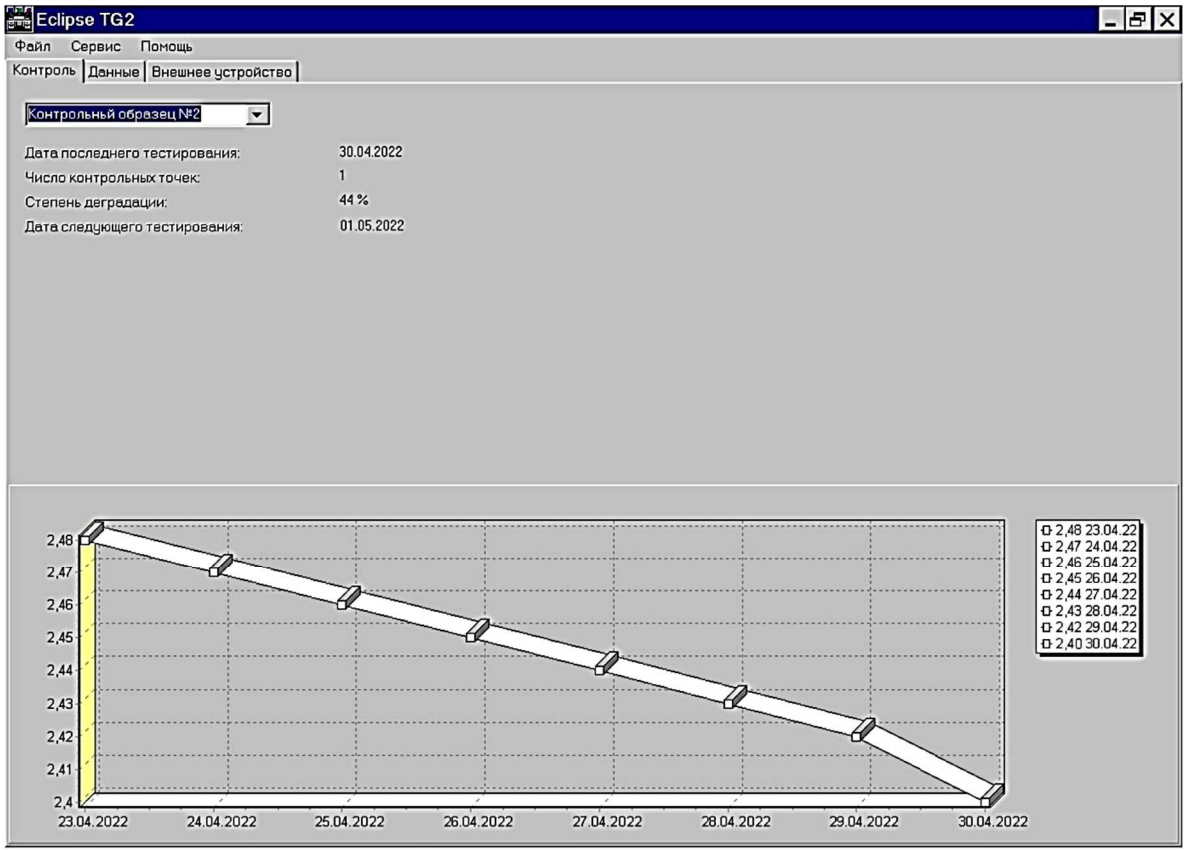


Рисунок 6 – Панель управления программным комплексом «Eclipse TG2»

Данные тестирования хранятся в базе данных в формате MS Access. Можно сделать HTML-страницу, на которую внедрён объект, связанный с базой данных. Если поместить такую страницу на веб-сервер, работающий под управлением Windows, то программный комплекс «Eclipse TG2» превращается в полноценную локальную систему хранения данных, выполняющую функции сбора, хранения и передачи в централизованную систему хранения и анализа данных, полученных от приборов ультразвукового контроля.

Литература

1. Баженов В.В. Диагностирование и неразрушающий контроль роторов электродвигателей нефтеперекачивающих агрегатов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2003. – № 62. – С. 59–67.
2. Болгарина Е.В. Среда разработки Eclipse / Е.В. Болгарина, О.В. Абрамова // Проблемы применения современных информационных технологий: материалы 7-й региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов (29 апреля 2014 года, г. Екатеринбург). – Екатеринбург : Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2014. – С. 5–8.
3. Галиева Р.А. Анализ методов неразрушающего контроля при обследовании участков трубопроводов // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 4. – С. 126–129.

4. Горпинченко А.Н. Анализ результатов коррозионного мониторинга Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Н. Горпинченко, Н.Х. Жарикова, О.В. Савенок, Л.Г. Кусова // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ – 2023: Материалы XXIV Международной молодёжной научной конференции (30–31 марта 2023 года, г. Ухта). – Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2023. – С. 352–359.
5. Дмитриева И.А. Особенности разработки мобильных приложений в среде Eclipse / И.А. Дмитриева, И.В. Гаврилова // Современные материалы, техника и технология: Сборник научных статей X Международной научно-практической конференции (30 декабря 2020 года, г. Курск). – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 136–139.
6. Заславский В.А. Роль и место методов неразрушающего контроля для обеспечения надёжности и долговечности сложных систем с высокой ценой отказа / В.А. Заславский, И.Н. Каденко // Неразрушающий контроль. – 1999. – № 1. – С. 15–22.
7. Коваленко А.Н. Неразрушающий контроль сварных швов магистральных газо- и нефтепроводов магнитным методом // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 10. – С. 51–56.
8. Коробкин С.В. Комплекс применения методов неразрушающего контроля и его эффективность / С.В. Коробкин, Д.Н. Торопкова // Студенческие научные достижения: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса (05 ноября 2018 года, г. Пенза). – Пенза : Издательство «Наука и Просвещение», 2018. – С. 36–38.
9. Неразрушающий контроль нефтегазопромыслового оборудования и трубопроводов – залог их надёжной работы / В.Ф. Мужицкий [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2006. – № 4. – С. 24–27.
10. Нагучева З.В. Сравнение методов неразрушающего контроля сварных соединений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / З.В. Нагучева, П.С. Кунина, М.А. Меретуков // Приоритетные направления современной науки и образования: актуальные вопросы и достижения: материалы Всероссийской научно-практической конференции (28 июня 2021 года, г. Чебоксары). – Чебоксары : Экспертно-методический центр, 2021. – С. 199–203.
11. Платонова М.В. Графическое моделирование на базе Eclipse в системах управления // Наукоёмкое программное обеспечение: сборник статей 12-ой Международной Ершовской конференции по информатике (ПСИ'19) (02–03 июля 2019 года, г. Новосибирск). – Новосибирск : Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2019. – С. 121–129.
12. Рагузин М.Г. Неразрушающий контроль при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств, применяемых на объектах добычи нефти и газа // Инженер-нефтяник. – 2014. – № 4. – С. 44–48.
13. Стефанов Р.Е. Анализ технического состояния нефтепровода при выборе способа капитального ремонта // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 196–214.
14. Стефанов Р.Е. Проведение капитального ремонта нефтепровода с заменой труб // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 215–241.
15. Стефанов Р.Е. Анализ состояния магистрального газопровода и моделирование системы «газопровод – массив грунта» // Технические и технологические системы: Материалы XIII Международной научной конференции «ТТС-22» (22–24 ноября 2023 года). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2023. – С. 315–323.
16. Тухватуллина Р.А. Неразрушающий контроль в нефтегазовом комплексе // Новые технологии – нефтегазовому региону: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (24–28 апреля 2017 года, г. Тюмень). – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. – Т. 5. – С. 330–331.
17. Рентгенографический метод контроля качества сварных соединений магистральных нефтепроводов, как фактор эффективной диагностики / С.И. Шиян [и др.] // REFERATOTECH: Материалы II Международной научно-практической конференции (23 октября 2021 года, г. Краснодар) : в 2 т. – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2022. – Т. 2. – С. 309–314.
18. Щипачёв А.М. Прогнозирование остаточного ресурса газонефтепроводов методом нейросетевого моделирования / А.М. Щипачёв, И.Р. Лапига // Булатовские чтения. – 2018. – Т. 4. – С. 119–124.

References

1. Bazhenov V.V. Diagnostics and non-destructive testing of rotors of electric motors of oil pumping units // Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products. – 2003. – № 62. – P. 59–67.

2. Bolgarina E.V. Eclipse development environment / E.V. Bolgarina, O.V. Abramova // Problems of application of modern information technologies: materials of the 7th regional scientific and practical conference of students and postgraduates (April 29, 2014, Yekaterinburg). – Yekaterinburg : Russian state professional pedagogical university, 2014. – P. 5–8.
3. Galiyeva R.A. The analysis of methods of nondestructive control at inspection of sites of pipelines // Readings of A.I. Bulatov. – 2017. – Vol. 4. – P. 126–129.
4. Analysis of the results of corrosion monitoring of the Urengoy oil and gas condensate field / A.N. Gorpinchenko [et al.] // SEVERGEOECOTECH – 2023: Proceedings of the XXIV International youth scientific conference (March 30–31, 2023, Ukhta). – Ukhta : Ukhta state technical university, 2023. – P. 352–359.
5. Dmitrieva I.A. Features of mobile application development in Eclipse environment / I.A. Dmitrieva, I.V. Gavrilova // Modern materials, equipment and technology: collection of scientific articles of the X International scientific and practical conference (December 30, 2020, Kursk). – Kursk : South-West state university, 2020. – P. 136–139.
6. Zaslavsky V.A. The role and place of non-destructive testing methods to ensure reliability and durability of complex systems with a high cost of failure / V.A. Zaslavsky, I.N. Kadenko // Non-destructive testing. – 1999. – № 1. – P. 15–22.
7. Kovalenko A.N. Non-destructive testing of main gas- and oil pipe lines welds by magnetic method // Control. Diagnostics. – 2008. – № 10. – P. 51–56.
8. Korobkin S.V. Complex application of nondestructive testing and its effectiveness / S.V. Korobkin, D.N. Toropova // Student scientific achievements: collection of articles of the International scientific research competition (November 5, 2018, Penza). – Penza : Publishing house «Science and Education», 2018. – P. 36–38.
9. Non-destructive testing of oil and gas production equipment and pipelines – the key to their reliable operation / V.F. Muzhitsky [et al.] // Territory of Neftegaz. – 2006. – № 4. – P. 24–27.
10. Nagucheva Z.V. Comparison of non-destructive testing methods for welded joints of storage tanks for oil and oil products / Z.V. Nagucheva, P.S. Kunina, M.A. Meretukov // Priority areas of modern science and education: current issues and achievements: Materials of the All-Russian scientific and practical conference (June 28, 2021, Cheboksary). – Cheboksary : Expert and methodological center, 2021. – P. 199–203.
11. Platonova M.V. Graphical modeling of control systems based on Eclipse technologies // High-tech software: collection of articles from the 12th International Ershov conference on informatics (PSI'19) (July 2–3, 2019, Novosibirsk). – Novosibirsk : Novosibirsk national research state university, 2019. – P. 121–129.
12. Raguzin M.G. Non-destructive testing during industrial safety examination of technical devices used at oil and gas production facilities // Petroleum Engineer. – 2014. – № 4. – P. 44–48.
13. Stefanov R.E. Analysis of the technical condition of an oil pipeline when choosing a method of overhaul repairs // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 3. – P. 196–214.
14. Stefanov R.E. Oil pipeline overhaul repair with pipes replacement // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 3. – P. 215–241.
15. Stefanov R.E. Analysis of the state of the main gas pipeline and modeling of the «gas pipeline – soil massif» system // Technical and technological systems: materials of the XIII International scientific conference «TTS-22» (November 22–24, 2023, Krasnodar). – Krasnodar : LLC «Publishing House – Yug», 2023. – P. 315–323.
16. Tukhvatullina R.A. Non-destructive testing in the oil and gas complex // New technologies for the oil and gas region: materials of the International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (April 24–28, 2017, Tyumen). – Tyumen : Tyumen industrial university, 2017. – Vol. 5. – P. 330–331.
17. X-ray method of quality control of welded connections of oil pipelines as a factor of effective diagnostics / S.I. Shiyan [et al.] // REFERATOTECH: Proceedings of the II International scientific and practical conference (October 23, 2021, Krasnodar) : in 2 vol. – Krasnodar : LLC «Publishing House – Yug», 2022. – Vol. 2. – P. 309–314.
18. Shchipachev A.M. Forecasting resources oil and gas pipelines by method of neuro network modeling / A.M. Shchipachev, I.R. Lapiga // Readings of A.I. Bulatov. – 2018. – Vol. 4. – P. 119–124.