МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет"

Кафедра систем автоматизации производства

Ю.Р. ВЛАДОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области автоматизированного машиностроения (УМО АМ) в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты», «Автоматизация технологических процессов и производств (в машиностроении)»

Оренбург 2005

УДК 681.5.015:621.64(075.8) ББК 32.965+39.7(я73) В 57

> Рецензенты доктор технических наук, профессор В.М. Кушнаренко доктор экономических наук, профессор Т.Д. Дегтярёва

> > Владов Ю.Р.

В 57 Автоматизированная идентификация состояния трубопроводных систем в машиностроении [Текст]: учебное пособие / Ю.Р. Владов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 101с: ил.

ISBN 5-7410-0544-6

В учебном пособии изложены основы автоматизированной идентификации и прогнозирования состояния трубопроводных систем, а также вопросы обеспечения надежности в процессе эксплуатации. Отражены результаты, полученные в разработанном программном комплексе.

ББК 32.965+39.7(я73)

В <u>2103000000</u> 6Л9-2005

> © Владов Ю.Р., 2005 © ГОУ ОГУ, 2005

ISBN 5-7410-0544-6

Введение

Системы трубопроводного транспорта газа составляют основу топливоснабжения страны. Трубопроводы (ТП) относятся к категории энергонапряженных объектов, отказы в которых сопряжены со значительным материальным и экологическим ущербом. Несмотря на существенное снижение количества коррозионных отказов, аварии трубопроводов по этой причине наиболее многочисленны. В современных работах в области анализа и прогнозирования отказов трубопроводов выделены наиболее типичные механизмы отказов, составлены физико-механические и математические модели коррозионных процессов на основе локальных параметров и ретроспективных сведений.

С появлением промышленных образцов внутритрубных дефектоскопов-снарядов стало возможным получение обширной информации о дефектах на протяжении многокилометровых участков ТП. Однако объективный анализ результатов внутритрубной дефектоскопии (ВТД) затруднен из-за локального характера используемых параметров и моделей.

Проблема формулируется следующим образом: несмотря на большой объем данных по отдельным дефектам, идентификация и прогнозирование коррозионного состояния (КС) поверхности трубопроводов недостаточно эффективны. Целью данного учебного пособия является анализ проблемы повышения эффективности идентификации и прогнозирования состояния трубопроводов на основе новых агрегированных параметров и моделей рельефности.

В учебном пособии освещены вопросы: классификации параметров и моделей кинетики коррозионных процессов ТП на основе характеристик рельефности; исследования основных статистических характеристик рельефности вырезок ТП; методики проведения автоматизированной идентификации состояния участков ТП на основе агрегированных моделей. Также нашли отражение вопросы прогнозирования и оценки эффективности функционирования ТП с автоматизированной идентификацией. Перечисленные задачи решены комплексно с применением современных информационных технологий.

В первой главе проведен анализ проблемы оценки кинетики коррозионных процессов трубопроводов и описан электрохимический механизм коррозии металлов. Выяснен локальный характер известных параметров и математических моделей коррозионных процессов ТП, недостаточно адекватно отражающих их физическую сущность. Отмечены преимущества автоматизированного метода внутритрубной дефектоскопии с помощью снарядадефектоскопа «Ультраскан».

Вторая глава посвящена классификациям параметров и моделей кинетики коррозионных процессов трубопроводов и описанию нового класса агрегированных параметров и моделей на их основе. С позиций термодинамики рассмотрено уравнение энергетического баланса в дифференциальной форме для описания кинетики коррозионного процесса как объекта управления.

В третьей главе описаны ряд приспособлений с механической оценкой рельефности вырезок ТП в лабораторных условиях; анализируются корреляционные и спектральные статистические характеристики параметров рельефности вырезок ТП.

Методика оценки состояния участков ТП обсуждается в четвертой главе. Идентификация состояния ТП между внутритрубными инспекциями, в соответствии с физическими представлениями о характере протекания процессов коррозии, проводится на базе аддитивных, мультипликативных и комбинированных моделей. Задача прогнозирования кинетики КС ТП решена с помощью ряда моделей в виде переходных характеристик инерционных звеньев первого и второго порядка с запаздывающим аргументом.

Автоматизированная идентификация и прогнозирование состояния ТП на базе программного комплекса, построенного с помощью современных информационных технологий, рассмотрены в пятой главе.

Оценка эффективности функционирования ТП с учетом идентификации состояния на примере типового участка по трем существенным характеристикам: надежности функционирования, стоимости эксплуатации и величины поставки газа дана в 6 главе.

В заключительной 7 главе рассмотрены вопросы обеспечения надежности в процессе эксплуатации с позиций надежности функционирования и прогнозирования изменений параметров технических объектов.

Решение поставленных задач предполагает использование современных теорий и методов: автоматического управления /1, 2, 3, 4/ и идентификации динамических систем /5, 6, 7/, надежности и эффективности систем /8, 9, 10/, случайных процессов /11, 12/, математической статистики /13, 14/ и моделирования /15, 16/, диагностирования /8, 17/, профилеметрии /18, 19/ и информационных технологий /20, 21, 22, 23/. В качестве информационной базы используются сведения о дефектах трубопроводов, полученные в результате внутритрубных дефектоскопий, проведенных последовательно через определенный временной интервал. С внедрением в инженерную практику современных методов идентификации объектов управления на основе системного подхода /24, 25/ целесообразно включение в учебный процесс вузов решение наиболее актуальных проблем в области идентификации и прогнозирования состояния ТП /26/.

Учебное пособие выполнено на кафедре системы автоматизации производств и предназначено для студентов высших учебных заведений, а также для специалистов, занимающихся диагностикой трубопроводных систем в различных отраслях машиностроения.

1 Современное состояние вопроса идентификации коррозионного состояния трубопроводных систем

1.1 Актуальность коррозионной проблемы

Известно, что актуальность коррозионной проблемы определяется тремя аспектами. Первый – экономический, учитывает материальные потери, происходящие из-за процессов коррозии. Второй аспект – снижение надежности оборудования, разрушающегося в результате коррозии, которое, особенно в случае аварии ТП, может повлечь катастрофические последствия. Третьим аспектом является сохранность металлического фонда. Потери от коррозии металла складываются из прямых и косвенных убытков /17/. Под прямыми убытками понимают полную стоимость замены прокорродировавших конструкций и безвозвратную потерю металла в виде продуктов коррозии. Помимо прямой потери продукта при авариях, недопоставка сырья и топлива потребителям, продолжительные остановки в работе влекут за собой потери за пределами трубопроводной системы.

Вынужденная остановка промыслов и предприятий – потребителей сырья и топлива обходятся народному хозяйству существенно дороже, чем прямые потери от аварийных ситуаций в системе транспорта. Повышение надежности приводит к дополнительным материальным затратам, а недооценка надежности - к существенным потерям. Непрерывно увеличивающаяся продолжительность эксплуатации трубопроводов существенно повышает риск их коррозионных разрушений. В то же время ни один из методов локального коррозионного контроля не оценивает реальную интенсивность коррозионного процесса ни в трубопроводной системе в целом, ни в отдельных ее элементах. Современными средствами диагностирования являются внутритрубные дефектоскопы-снаряды, позволяющие получать обширную информацию о дефектности многокилометровых участков ТП. Однако объективный анализ результатов внутритрубной дефектоскопии затруднен из-за неадекватности существующих моделей кинетики коррозионных процессов реальным.

1.2 Процесс электрохимической коррозии металлов

Электрохимическая коррозия представляет собой самопроизвольное разрушение металла из-за взаимодействия с окружающей электролитической средой. Электрохимическое растворение металла - сложный процесс, состоящий из анодного процесса; процесса перетекания электронов по металлу от анодных участков к катодным и соответствующего перемещения катионов и анионов в растворе и катодного процесса.. Причиной этого вида коррозии является термодинамическая неустойчивость /16,17/. Весь материальный эффект электрохимической коррозии металла является результатом анодного процесса, интенсивность которого определяется величиной протекающего между анодными и катодными участками корродирующей поверхности металла коррозионного тока. Скорость электрохимической коррозии металлов можно выразить посредством плотности коррозионного тока в виде отношения тока к площади коррозирующей поверхности металла. Таким образом, расчет скорости электрохимической коррозии металлов сводится к расчету коррозионного тока. Поверхность коррозирующего металла представляет собой многоэлектродный гальванический элемент и в первом приближении ее рассматривают, как двух электродную систему анодных и катодных участков.

В работах Н.Д. Томашова, Н. П. Жука и др. приведена классификация причин возникновения электрохимической гетерогенности поверхности металл-электролит. На первом уровне по критерию общая причина возникновения, гетерогенность определяется неоднородностью: поверхности металла, жидкой фазы, физических условий внешней среды. На следующем уровне конкретными причинами возникновения этих неоднородностей являются: макро- и микровключения, как включения с более положительным электродным потенциалом; наличие границ блоков и зерен кристаллитов; выход дислокации на поверхность металла; анизотропность металлического кристалла; неравномерные распределения на поверхности металла вторичных продуктов коррозии; различие концентраций собственных ионов данного металла в электролите; различие в pH, т.к. участки металла, соприкасающиеся с раствором с более низким значением pH, являются катодами; различие в концентрации кислорода или других окислителей; различие температуры.

Таким образом, электрохимическая гетерогенность поверхности металла приводит к ее дифференциации на анодные и катодные участки, а степень гетерогенности характеризуется разностью электродных потенциалов этих участков.

При аналитическом расчете процесса, проведенном в работах Н. П. Слугинова, Г. В. Акимова, В. П. Батракова и др., установившуюся величину коррозионного тока определяют из уравнения:

$$I=(V_{\kappa}-V_{a})/R, \qquad (1.1)$$

где V_к и V_a - эффективные электродные потенциалы;

І-ток коррозионной пары;

R—общее сопротивление замкнутого электрического контура коррозионной пары.

Известно, что потенциалы электродов, через которые проходит электрический ток, отличаются от ненагруженных током потенциалов:

$$\begin{cases} V_{a} = (V_{a})_{o\delta p} + \Delta V_{a}; \\ V_{\kappa} = (V_{\kappa})_{o\delta p} - \Delta V_{\kappa}. \end{cases}$$
(1.2)

При малых плотностях коррозионного тока, т.е. при линейной зависимости поляризации от плотности тока, для приближенных расчетов, учитывая (1.2) записывают:

$$\begin{cases} V_a = (V_a)_{o\delta p} + \Delta V_a = (V_a)_{o\delta p} + k_1 i_a; \\ V_\kappa = (V_\kappa)_{o\delta p} - \Delta V_\kappa = (V_\kappa)_{o\delta p} - k_2 i_\kappa; \ R \cong const. \end{cases}$$
(1.3)

Т.к. анодная и катодная плотности тока могут быть различны вследствие различия площадей анодных и катодных участков поверхности корродирующего металла, а сила тока для анодного и катодного процессов одна и та же, удобнее исключить i_a и i_k , выразив их отношением силы тока I к площади анодных и катодных участков поверхности корродирующего металла S_a и S_k . Тогда эффективные потенциалы электродных процессов будут определяться уравнениями:

$$\begin{cases} V_{a} = (V_{a})_{o \delta p} + k_{1} I/S_{a}; \\ V_{\kappa} = (V_{\kappa})_{o \delta p} - k_{2} I/S_{\kappa}, \end{cases}$$
(1.4)

где $k_1 I/S_a$ и $k_2 I/S_{\kappa}$ — смещение потенциалов электродных процессов V_a и V_{κ} соответственно, вследствие поляризации, при определенной силе тока I.

Подставляя значения эффективных потенциалов электродных процессов в уравнение (1.1) и решая его относительно I, получим уравнение для определения величины коррозионного тока:

$$I = [(V_{\kappa})_{o \delta p} - (V_{a})_{o \delta p}] / [R + P_{a} + P_{k}], \qquad (1.5)$$

где $P_a = k_1 / S_a P_k = k_2 / S_\kappa$ - удельные анодные и катодные поляризуемости.

Величина коррозионного тока максимальна при R≅0. При больших плотностях тока и логарифмической зависимости поляризации от плотности тока для приближенных расчетов можно принять

$$\begin{cases} V_a = (V_a)_{o\delta p} + \Delta V_a = (V_a)_{o\delta p} + \ln (I/S_a); \\ V_\kappa = (V_\kappa)_{o\delta p} - \Delta V_\kappa = (V_\kappa)_{o\delta p} - \ln (I/S_\kappa). \end{cases}$$
(1.6)

Подставляя уравнения (1.6) в уравнение (1.1), получим

$$(\mathbf{V}_{\kappa})_{\text{oбp}} - (\mathbf{V}_{a})_{\text{oбp}} = \mathbf{I} \mathbf{R} + \ln \frac{I^{k_{1}+k_{2}}}{S_{a}^{k_{1}} S_{k}^{k_{2}}}.$$
 (1.7)

Анализ уравнений (1.5), (1.7) Э. Х. Ленцем, А. С. Савельевым, Р. А. Колли и др. показывает, что коррозионный ток растет с увеличением разности электродных потенциалов и падает с ростом сопротивления и удельных поляризуемостей анодного и катодного процессов.

Из особенностей электрохимического коррозионного процесса следует отметить следующее: подразделение его на два одновременно протекающих, но достаточно независимых электродных процесса - анодный и катодный; зависимость кинетики анодного и катодного процессов от величины электродного потенциала металла, т.к. смещение потенциала металла в положительную сторону облегчает анодный процесс и тормозит катодный и наоборот; локализация электродных процессов на тех участках поверхности, где их протекание облегчено; растворение металла преимущественно на анодных участках поверхности металла при локализации процессов.

В работах /16,17/ рассмотрена дискретная природа коррозионного процесса. Если мысленно увеличить сечение коррозионной каверны, то ее можно представить как анодный участок, окруженный электролитом. С выступов каверны в электролит стекают единичные токи. Эти токи различны по величине, т.к. зависят от фактических значений локальных переходных сопротивлений и напряжений между анодами и катодами замкнутых контуров. Чем сложнее геометрический профиль поверхности коррозирующего металла, тем более разветвленной является система коррозионных токов, вследствие неоднородности и сложности поверхности металла и соответствующих элементарных токовых нагрузок в коррозионной каверне. Отсюда следует, что не существует идеальных условий кинетики в виде обобщенного коррозионного тока, приложенного ко всей анодной поверхности коррозионной пары. Дискретная природа коррозионного процесса является причиной возникновения эффекта неравномерности материальных потерь металла, это означает, что даже при идеализированной равномерной коррозии поверхность металла не может быть гладкой поверхностью.

Дискретный характер коррозионной кинетики вызывает сложные и недостаточно изученные явления, к числу которых можно отнести: наличие случайной закономерности распределения локальных токов на анодной поверхности коррозионной пары, каждый из которых зависит от локального переходного сопротивления и разности потенциалов анод-катод; общая тенденция изменения во времени локальных коррозионных токов, глубины каверн $d_k(t)$, потерь металла $G_k(t)$ - монотонное затухание. В результате действия множества коррозионных пар существенно увеличивается геометрическая неоднородность поверхности металла. Наличие избирательности в распределении локальных токов усиливает кинетику коррозионных процессов. Электронное микроскопирование коррозирующей поверхности с увеличением неровности поверхности металла это подтверждает.

В любом сечении можно определить характер и закон распределения локальных токов коррозионной пары как случайной величины. В реальных условиях измерить как общий, так и локальные токи коррозионной пары не

представляется возможным, так как расстояние между анодом и катодом находится в диапазоне 10^{-6} - 10^{-7} м.

Полагают, что локальные токи изменяются как по величине, так и по месту протекания. Стекание анодных токов в электролит происходит по избирательному принципу - в местах с наименьшим переходным сопротивлением. В этом процессе локальные токи перемещаются по анодной поверхности коррозионной пар и коррозия выступов начинается с вершины и распространяется вглубь металла. Скорость перемещения локальных токов определяется как неоднородной структурой металла, так и неравномерностью распределения этих токов по анодной поверхности коррозионной пары. Однако количественной оценки связи между дискретной природой коррозионного процесса и неровностью поверхности металла до сих пор нет.

В соответствии с принципом инвариантности коррозионной кинетики, сформулированным Е.Вигнером, Л.Я. Цикерманом и др., события в одной части пространства, например, в каверне коррозирующей поверхности трубопровода, зависят только от условий в окрестности именно этой каверны, то есть характеризуется отсутствием действия на расстоянии. В соответствии с этим принципом, выделение на поверхности металла какой-либо коррозионной каверны, развитие которой описывается определенным дифференциальным уравнением, не дает возможности приписывать данный локальный режим коррозии другой коррозионной каверне, удаленной от первой и находящейся в иных агрессивных условиях. Информацию, необходимую для описания кинетики коррозии одной каверны, можно получить только из локальных измерений, однако неизвестно то минимальное расстояние, для которого этот принцип справедлив. Очевидно, коррозионный процесс не мог бы существовать без принципа инвариантности, формулировка которого осуществлена в терминах непосредственных наблюдений и статистических обобщений.

Некоторые авторы указывают на корреляцию между условиями развития отдельных каверн, зависящих только от интервалов времени, разделяющих эти события, и не зависящих от момента времени, в который происходит возникновения отдельной каверны. Если в различные моменты времени возникли одни и те же агрессивные условия воздействия на поверхности металла, то вероятности образования коррозионных каверн, будут одинаковыми независимо от того, когда созданы внешние условия.

В опубликованных работах /16, 17/ приводятся экспериментальные кинетические кривые коррозия— время в экспоненциальном виде с постоянной времени и установившейся глубиной б_{ку} коррозионной каверны при бесконечно длительном времени коррозии металла. Если за б_{кі}(t) обозначить мгновенную глубину коррозионной каверны, то, учитывая свойство экспоненты, можно составить предел отношения текущей глубины коррозионной каверны б_к(t) к ее установившемуся значению б_{ку}, который при $t \to \infty$ стремится к единице.

Принцип инвариантности позволяет установить корреляцию между коррозионными процессами металла в различных внешних агрессивных ус-

ловиях. Например, если изменение удельного омического сопротивления грунта, разности потенциалов, тока коррозии влекут за собой событие, заключающееся в возникновении в металле коррозионной каверны δ_{κ} , то подобные события вызывают образование другой коррозионной каверны δ_{κ} . Коррозионный процесс протекает по нелинейным закономерностям, и поэтому равномерного и прямолинейного развития коррозионной каверны обнаружить в реальных условиях невозможно. Если бы кинетика коррозии трубопровода менялась бы от участка к участку по принципиально различным законам, то ее нельзя было бы прогнозировать. Все участки трубопровода подчиняются общей закономерности.

В соответствии с теорией замкнутых необратимых систем по П Шамбадалю и Э. Борелю, коррозионный процесс является типичным примером неорганизованной замкнутой системы, в которой металл в конечном счете превращается в продукты коррозии за счет разрушения упорядоченного состояния кристаллической решетки металла. Полное разрушение кристаллической решетки металла соответствует предельному росту энтропии замкнутой системы, какой и является коррозионная пара. Поскольку последняя изолирована от внешних источников энергии, то ее внутренняя энергия, определяемая фактической разностью потенциалов анод — катод, в пределе стремится к нулю и она является термодинамической замкнутой системой.

К этой системе применим принцип Карно—Клаузиуса, в соответствии с которым, энтропия коррозионной пары увеличивается. Если до начала электрохимического растворения металла, имеет место порядок в кристаллической решетке металла, то это соответствует условиям функционирования одно-емкостной системы. После начала процесса коррозии первоначальная организация кристаллической решетки металла нарушается, и наступает период ее дезорганизации, что является естественным законом природы. Переходный процесс в завершающей стадии характеризуется полным рассеянием внутренней энергии коррозионной пары, а следовательно, превращением, в конечном итоге, металла в продукты коррозии.

Работа коррозионной пары как замкнутой необратимой системы сопровождается увеличением энтропии, что определяется неизбежностью необратимого процесса. При исследовании самоуправления коррозионных пар и условий изменения во времени их степени организации, а также при изучении информативных свойств замкнутых систем, необратимость процесса коррозии необходимо учитывать и особенно при прогнозировании развития коррозии металлов.

С помощью неравенства Клаузиуса можно получить количественную оценку цикла эволюции коррозионной пары, как необратимого. Проведя интегрирование по замкнутому контуру коррозионной пары (анод—катод электролит), получим неравенство Клаузиуса в следующем виде:

$$\int_C \frac{dQ}{T} < 0, \tag{1.9}$$

где Q - количество тепловой энергии, вырабатываемой внутри замкнутого энергетического контура коррозионной пары. Оно пропорционально внутренней электрической мощности коррозионного элемента;

Т - абсолютная температура коррозионной пары.

Если обозначить через Q_0 и Q_1 , соответственно начальное и конечное значения тепла, а через T_0 и T_1 —температуры, то разность $(Q_1/T_1)-(Q_0/T_0)<0$. Рассматривая образованный коррозионной парой замкнутый необратимый цикл, можно установить, что осуществление такого цикла требует обязательного присутствия двух источников электрических потенциалов. Напряжение U между анодом и катодом коррозионной пары определяется законом Ома. Коэффициент термодинамической активности коррозионной пары при этих условиях будет определяться выражением

$$h_k = (f_A - f_\kappa) / f_A = 1 - f_\kappa / f_A$$
, (1.10)

где f_A и f_κ - потенциалы анода и катода;

Различают два основных граничных периода:

1) начальная стадия работы коррозионной пары, когда $|f_A| >> |f_\kappa|$. При этих условиях отношение $|f_\kappa/f_A| => 0$, следовательно, активность $h_k => 1$;

2) конечная стадия, при которой происходит «сближение» потенциалов, т. е. $|f_A| = |f_\kappa|$, и тогда $|f_\kappa/f_A| => 1$, следовательно, активность $h_k => 0$.

Таким образом, при определенных потенциалах коррозионной пары ее активность не может превзойти некоторых определенных значений ($h_k = 0$ и $h_k=1$), причем эти предельные значения зависят только от величины потенциалов анода и катода замкнутой системы, но не от природы металла.

Наибольший интерес представляет проблема электрохимической устойчивости металлов, т.е. способности противодействовать развитию коррозии. Принпиц Ле-Шателье, заключающийся в том, что любая физическая структура способна противодействовать внешним возмущениям, получил свое приложение и дальнейшее развитие в термодинамике. Однако в теории используются законы классической термодинамики, описывающие изменения, происходящие в заторможенных и фиктивно заторможенных процессах. При рассмотрении реальных необратимых процессов приняты следующие допущения /16/:

а) предполагают, что существуют определенные давления ($p_1, p_2, ..., p_n$), напряжения ($E_1, E_2, ..., E_n$) и температуры ($t_1, t_2, ..., t_n$);

б) считают, что все эти возмущающие воздействия существуют по крайней мере в элементарных объемах металла, например в элементарных объемах реально действующих систем (W₁, W₂, ..., W_n);

в) скорости протекания процессов в этих элементарных объемах реальной системы достаточно малы, например, по сравнению со скоростью перемещения всей системы в пространстве и времени;

г) полагают, что эти элементарные объемы являются очень малыми по сравнению с объемами реальных систем, но вместе *с* тем достаточно большими по сравнению с размерами атомной структуры материи (среднее междуатомное расстояние, средняя длина свободного пробега).

При вычислении термохимических функций применяют дифференциальные уравнения термодинамики, а также соотношения между параметрами состояния, вытекающими из этих уравнений:

$$d\Theta = \frac{du}{T} + p\frac{d\Delta w}{T} - \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_i}{T} d\left(\frac{\rho_i}{\rho}\right), \qquad (1.11)$$

где Э - удельная энтропия, отнесенная к единице массы металла, подвергающегося коррозионному разрушению;

и — удельная энергия, концентрируемая в элементарном объеме под влиянием внешней среды - электролита;

 Δw – удельный элементарный объем, подвергающийся электрохимической коррозии;

μ_i – электрохимический потенциал металла, ограниченного элементарным объемом;

T — абсолютная температура, установившаяся в данном элементарном объеме;

p_i — парциальные плотности элементарного объема металла,

р – сумма всех парциальных плотностей.

После деления выражения (1.11) на дифференциал времени dt и учитывая, что μ =const, а также, что отношения дифференциалов дают соответствующие скорости изменения удельной энтропии, удельной энергии, элементарного объема системы, можно получить уравнение, характеризующее действительные условия развития коррозионного процесса в элементарном объеме в следующем виде:

$$v_{s} = \frac{1}{T} [v_{u} + pv_{w} - (\chi v_{\mu} + \xi v_{p})], \qquad (1.12)$$

12

где χ и ξ - нелинейные коэффициенты.

Из (1.12) следует, что скорость роста энтропии увеличивается с ростом скорости v_u и v_w, однако две другие величины: скорость сближения (конвергенции) электрохимических потенциалов, а также скорость снижения парциальных плотностей металла, снижают интенсивность развития энтропии. Используя обозначения: v_{уск} = v_u + p v_w; v_{торм} = $\chi v_{\mu} + \xi v_{p}$. После преобразований получим:

$$v_{s} = \frac{1}{T} [v_{yc\kappa} - v_{mopm}].$$
(1.13)

Таким образом, это уравнение позволяет оценить влияние ускоряющих и тормозящих процессов локальных коррозионных изменений, проявляющихся в различных элементах коррозирующей системы. В последнее время уделяется большое внимание изучению и проектированию многоуровневых иерархических систем и в особенности поведение многоуровневой системы при ее переходе от одного уровня организации к другому /24, 25/.

Любую локальную коррозионную пару можно представить как замкнутую необратимую систему, в которой начальный уровень организации стремится снизиться. Причем процесс убывания уровней организации коррозионной пары является физическим свойством системы. Кинетика коррозии металла представляет собой множество локальных уровней организации, направленных во времени от более высокого уровня организации к менее организованным состояниям коррозионной пары и между двумя смежными уровнями организации коррозионной пары существует функциональная связь.

Существенными характеристиками коррозионной пары являются: последовательное расположение во времени и изменение уровней организации, приоритет в размещении локальных уровней напряжений от более высоких к более низким. При этом более высокий уровень организации определяет фактическое значение более низкого уровня действующего напряжения коррозионной пары. Этот процесс протекает с возникновением внутренних обратных связей в коррозионной паре.

М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара и др. обсуждают модель многоуровневой системы, характеризующей вертикальное взаимодействие между уровнями их иерархии, в которой, однако, не существует постоянно действующего уровня организации В кинетике коррозии любой уровень мгновенно возникает и мгновенно снижается до текущего значения. По этой причине говорят не о стационарных, а о динамических уровнях. Непосредственное и явно выраженное воздействие оказывает ближайший расположенный выше уровень. Связывая второй принцип термодинамики с условиями функционирования и организацией различного рода физических систем, Л. Я. Цикерман и др. говорят о том, что металл, превращаясь в процессе электрохимического растворения в продукты коррозии, исчезает. Из термодинамики известно, что возрастание энтропии замкнутой системы не бесконечно. Любая реальная коррозионная пара как изолированная замкнутая система достаточно быстро достигает состояния термодинамического равновесия, которое является весьма устойчивым.

Реальные кинетические кривые коррозия—время, приближенно описываемые той или иной математической моделью, несут важную информацию. Располагая экспериментальными зависимостями роста глубины локальной коррозионной каверны от времени $\delta_{\kappa}(t)$, можно дать характеристику: агрессивности внешней среды, с которой контактирует металл в исследуемом месте; локальной коррозионной устойчивости металла; степени опасности развития локальной коррозии; изменения во времени основных параметров коррозионного процесса.

В современной литературе приведено большое число математических моделей (ММ) коррозионного процесса, характеризующих состояние металла в месте дефекта. Подавляющее количество ММ кинетики электрохимической коррозии металла, характеризуют потерю массы металла или изменение глубины каверны. В приведенных ММ выходная переменная обозначена универсально /205/. Наиболее простые модели (Биккарис А., Веллнер Е., Годарт Х., Денисон И., Друм Г., Джонсон В., Мартин Е., Мор Е., Сутерланд И., Торнес Х., Упхам И., Фарадей М., Хейник В., Шванк В.и др.) имеют вид:

$$y = A \cdot t^{\alpha} ,$$

где A=1,...,3; α=0,25; 0,5; 1;..., 3 – параметры модели; у – потеря массы металла или изменение глубины каверны; t – время.

Более сложные модели с экспоненциальной составляющей (Азис П., Миткальф Ж., Цикерман Л.Я., Чемпион Ф. и др.) представлены двух типов:

$$y = y_0 [1 - \exp(-\alpha \cdot t)];$$

$$y = y_0 [1 - A_1 \exp(-\frac{t}{T_1}) - A_2 \exp(-\frac{t}{T_2})],$$

где $\alpha, A_1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, A_2 = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$ – параметры моделей.
(1.14)

ММ с логарифмом независимой переменной (Виттакер Б., Демин Ю.В., Жук Н.П., Лиддиард А., Хок П., Цихал Ф. и др.):

$$y = y_0 \lg(t_0 + t);$$

$$y = a_n \ln^n t + a_{n-1} \ln^{n-1} t + \dots + a_0 \ln t + d$$
(1.15)

14

Алгебраические многофакторные модели (Агниботи У.С., Дорофеев А.Г., Кац А.С., Лучина М.А., Налимов С.М., Нанда Н.Н., Шрейбер Г.К. и др.):

$$y = x_1(a_1 + a_2x_2 + \dots + a_7x_7);$$

$$y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_7x_7,$$
(1.16)

где $x_1, x_2, ..., x_7$ -факторы, $\alpha_1, ..., \alpha_7$ -параметры моделей.

Динамические модели коррозионного процесса (Агафонов В.В., Берукштис Г.К., Бурая М.В., Голубев А.И., Жук Ю.М., Журавлев Н.П., Кадыров М.Х., Кларк Г.Б., Михайловский Ю.Н., Притула В.А., Таиси М., Турковская А.В., Цикерман Л.Я., Штурман Я.П., Керимов А.М.и др.) имеют вид:

$$y = y_0 \frac{t}{t+T};$$

$$y = -A + (A^2 + Bt)^{1/2};$$

$$y = [A + B(t - D)]t - [a_1 - a_2(t - t_1) + a_3(r - E) - F];$$

$$y = \frac{A}{t_1}a_1 + \frac{B}{t_2}a_2;$$

$$y = A_1t_1 + A_2t_2;$$

$$y = y_0 \frac{A}{BC}t;$$

$$y = C_1e^{A_1t} + C_2e^{A_2t} + \alpha + \beta t + (\gamma + \theta t)\cos wt + (\varepsilon + Kt)\sin t,$$

(1.17)

где y, t, t₁, t₂ – зависимая и независимые переменные; остальные буквы – параметры моделей.

Некоторые модели скорости изменения выходной переменной (Горман И.В., Купер А.С.,Лысая А.И., Середа П., Пальмер И.Д., Цикерман Л.Я. и др.):

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{dy(0)}{dt} \exp(-\alpha \cdot t);$$

$$\lg(y') = Ay' + By + c;$$

$$y' = A \cdot \exp(-\frac{t}{T})C_{H2S}{}^{D}P^{E};$$

$$y' = y'_{0} \frac{A}{t+A}; y' = \frac{t}{At^{2} + Bt + C},$$
(1.18)

где у', t, C_{H2S,} P- зависимая и независимые переменные, остальные буквы – параметры моделей.

Модели ускорения изменения выходной переменной (Цикерман Л.Я. и др.):

$$y'' = \frac{C - At^2}{\left(At^2 + Bt + C\right)^2}; \ y'' = A\sin\frac{t}{T} \cdot \exp(-C\frac{t}{T}).$$
(1.19)

Анализируя ММ процесса коррозии, видно, что некоторые из них находятся в противоречии с действительным механизмом развития коррозии и не могут быть использованы для решения реальных задач. Другие ММ позволяют дать оценку состояния металла или прогнозировать скорость коррозии только в месте расположения дефектов. Общим недостатком существующих ММ является то, что они носят локальный характер, используют локальные параметры и не позволяют получить количественной оценки TC многокилометровых ТП. Для этого нужны более информативные агрегированные параметры и модели.

Под идентификацией в широком смысле понимают получение по экспериментальным данным модели реального объекта. В связи с тем, что научный прогресс сопровождается внедрением математического моделирования во многие отрасли знаний, значение идентификации возрастает. Идентификация в полной мере относится к области управления, в особенности к стадии функционирования систем в реальном времени. Идентификацией динамических объектов управления и процессов на основе экспериментальных данных занимались отечественные и зарубежные ученые: А. А. Красовский, В. В. Казакевич, Н.С. Райбман, Л. А. Растригин, , Рутковский В.Ю., Р. М. Юсупов а также П. Эйкхофф, Э. П. Сейджи, Дж. Л. Мелса и др. В области повышения надежности и эффективности функционирования динамических систем известны работы: И. А. Ушакова, Ю.К. Беляева, Г.В.Дружинина, Е. Ю. Барзиловича, Р. Барлоу, Б. С. Сотскова, И. И. Мазура, Ф. Байхельта, П. Франкена и др. Большое число публикаций посвящено обоснованию наличия связи коррозия – время независимо от вида металла и агрессивных свойств внешней среды. Исследователи П. Азиз, Ф. Чемпион, Ж. Миткальф рассматривали коррозию как переходный процесс, подчиняющийся закону апериодической функции первого порядка. В работах В.М. Кушнаренко и др. даны рекомендации по моделированию коррозии металлического оборудования газоконденсатных месторождений. Авторы С. М. Налимов, М. А. Лучина, А. С. Кац, Д. Е. Бугай и др. осветили вопрос прогнозирования скорости коррозии металлоконструкций на основе моделей с локальными параметрами.

1.3 Техническая диагностика трубопроводов

1.3.1 Анализ существующих методов диагностирования коррозионного состояния ТП

В настоящее время большинство ТП Оренбургского газоконденсатного месторождения (ОГКМ) выработали гарантийный срок эксплуатации, повероятности безотказной этому оценки ИХ работы проводят для диагностирования ТП. Особенно актуальна проблема оценки технического транспортирующих сероводородсодержащие состояния TΠ,

транспортирующих сероводородсодержащие нефтегазоконденсатные среды, т.к. их отказы приводят к значительным экономическим и экологическим потерям.

Диагностирование объектов включает: контроль технического состояния – проверку соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе вида его технического состояния в данный момент времени: работоспособного или неработоспособного; поиск дефектов и повреждений, выяснение причин их возникновения и оценка их влияния на работоспособность; прогнозирование технического состояния – определение технического состояния объекта с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени.

При оценке технического состояния ТП используют различные методы, основными из которых являются: нормативный; аналитический и статистический. Нормативный метод заключается в сравнении размеров дефектов и других нарушений характеристик ТП с нормативными ограничениями. Нормативный метод дает жестко фиксированные оценки – допустимый, недопустимый (критический) дефект.

Аналитический метод, при котором учитываются напряжения, возникающие в ТП при изменении текущих рабочих параметров, изменения в конструкции ТП и колебания внешних нагрузок. Результатом аналитического метода является определение превышения критических напряжений над допустимыми.

Статистический метод заключается в оценке вероятности отказа в зависимости от параметров работы трубопровода, конструктивных характеристик и свойств окружающей среды на основе опыта эксплуатации аналогичных ТП. Кроме того, определяется распределение количества отказов по причинам, их вызвавших. В результате находится вероятность отказа ТП за заданный промежуток времени.

Следует отметить многообразие факторов, действующих на ТП как независимых, так и взаимно коррелируемых, что существенно усложняет задачу статистической оценки и требует тщательного анализа используемых факторов. Нормативный и аналитический методы обладают более высокой достоверностью результатов по сравнению со статистическим, но их применение в реальных условиях эксплуатации ТП ограничено недостаточностью информации о реальном состоянии технического устройства (наличие и размеры дефектов, деформации, действующие нагрузки).

Заключение нормативного метода о критических размерах дефекта, аналитического о критических напряжениях, с одной стороны, требуют немедленного проведения ремонтных или профилактических работ, с другой – не означают однозначного наступления разрушения (аварии) трубы, а только показывают, что вероятность отказа выше, чем у трубы без дефектов и нарушений.

Возможны ситуации, когда на разных ТП имеются различного рода дефекты критических размеров, а ресурсы по проведению ремонтных работ

ограничены, и стоит вопрос об очередности проведения ремонтных работ. Кроме того, определить надежность как абсолютное значение вероятности отказа конкретного ТП зачастую невозможно из-за недостатка первичной информации для нормативного и аналитического методов и недостаточной глубины однородных выборок для статистического метода, т.е. требуется произвести оценку (принять техническое решение) при недостатке или неполноте исходной информации.

Обобщение материала приводит к заключению, что какой бы метод коррозионного контроля участка ТП не применялся, ни один из них не дает оценки реальной скорости коррозии ни в контролируемой системе в целом, ни в отдельных ее местах, а только позволяют весьма приближенно оценивать ее с той или иной степенью вероятности и регистрировать таким образом изменения коррозионной активности в системе.

В этой связи возникла острая необходимость в разработке качественно нового метода оценки при осуществлении контроля состояния ТП по всей дистанции.

1.3.2 Особенности обеспечения надежности трубопроводов

Современный период технического развития страны характеризуется массовым применением сложных систем и комплексов. Однако самые совершенные начальные технические характеристики системы являются хотя и необходимыми, но еще не достаточными условиями высоких эксплуатационных качеств системы. Начальные характеристики показывают потенциально технические возможности системы, которые могут быть полностью использованы в процессе эксплуатации или нет. Любая система должна наряду с хорошими начальными техническими характеристиками обладать способностью сохранять эти характеристики в течение всего срока эксплуатации. Способность любой системы сохранять свои первоначальные характеристики в процессе эксплуатации определяют ее надежность.

С позиций теории надежности трубопроводные системы представляют собой сложные технические системы с восстанавливаемыми элементами и комбинированным техническим обслуживанием. Надежность трубопроводных систем, как и большинство технических систем, характеризуется безот-казностью, долговечностью и ремонтопригодностью.

Низкий уровень автоматизации диагностирования не позволял рассматривать ТП с позиции управления его надежностью даже при применении современных средств диагностики. Поэтому, для повышения надежности ТП необходимо автоматизировать процесс диагностирования ТП, что позволит иметь эффективную систему сбора данных и оценку фактического состояния ТП. В этом случае управление надежностью ТП осуществляется через стратегию технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которая строится на основе:

- проведения работ ТОиР только в случае технической необходимости, определяемой состоянием элементов;
- оценки технического состояния элементов системы, обеспечивая тем самым максимальное использование их ресурса;
- решения задач распределения и интенсивности ремонтных работ.

1.3.3 Метод диагностики по параметрам рельефности

Данный метод представляет собой принципиально новый, следующий этап анализа состояния ТП. Причиной необъективной оценки коррозионного состояния ТП нормативным, аналитическим и статистическим методами являются локальные параметры, лежащие в основе этих методов.

Внутритрубная инспекция с помощью снаряда-дефектоскопа имеет ряд преимуществ, представленных в таблице 1.1.

	ложноети внутритрубной диагноетики
	Обнаружение и измерение геометрических параметров де-
Высокая разрешающая	фектов (вмятин, рисок, забоин, коррозии, расслоений, вклю-
способность	чений, трещин, непроваров, шлаковых включений в сварных
	швах)
Снижение затрат на	Исключение дорогостоящих гидроиспытаний, требующих
эксплуатацию	вывода трубопровода из эксплуатации на длительное время
Высокая	Проведение дефектоскопци с рисской скорости $0.5.2 \text{ M/c}$
производительность	проведение дефектоскопии с высокой скоростью 0,5-2 м/с
Безопасные условия	Исклонение опасных исполаций лоугих типов
инспекции трубопроводов	исключение опасных испытании других типов
Повторная прогонка	Возможность определения статических и динамиче-
снаряда	ских параметров коррозионного состояния трубо-
	проводов

Таблица 1.1 – Возможности внутритрубной диагностики

Внутритрубный ультразвуковой контроль впервые в России осуществлен в 1990-1995 г. в рамках контракта с германской фирмой Pipetronix. Семейство дефектоскопов-снарядов «Ультраскан» разработано фирмой Pipetronix и имеет опыт практического применения около 10 лет.

Ультраскан состоит из нескольких модулей, соединенных между собой карданными механизмами (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Конструктивная схема «Ультраскана»

Первый модуль – блок питания. Второй – мульти-микропроцессорная система для предварительной обработки данных и их ввода в запоминающее устройство. Третий модуль состоит из сенсороносителя и электронных элементов. Снаряд-дефектоскоп базируется на принципе многоканального сканирования. Измерение по каждому каналу производится последовательно с частотой 300-380 Гц, что обеспечивает достаточное разрешение около 2-3 мм по направлению движения снаряда-дефектоскопа при скорости 1 м/с. Измерения осуществляются в широком диапазоне скорости движения прибора, однако за оптимальный принимают диапазон скорости движения 0,2-1 м/с, как обеспечивающий необходимое разрешение. Основные технические характеристики снаряда-дефектоскопа приведены в таблице 1.2.

360
4100/3900
газ, жидкость
10
144
5
2 - 3
± 0.5
$\pm 0,5$
0,1-1
+0.3
-10 до +60

Таблица 1.2 – Технические характеристики снаряда-дефектоскопа

Специалисты Оренбурггазпром, ВНИИГаз, Техдиагностика, Лаборатории «Надежность» ОГУ, проводившие исследования по данным внутритрубной дефектоскопии, достаточно хорошо осветили проблему полноты и качества получаемой информации. Экспертная оценка полноты данных сканирования показала, что информация выдается практически по всей площади внешней и внутренней поверхности труб с очень малой областью неопределенности. Выявлено большое количество дефектов различного типа и категорий опасности. Анализ распределения количества дефектов внутренней поверхности ТП по результатам повторных прогонов внутритрубной дефектоскопии показал, что увеличение числа дефектов произошло неравномерно по всей длине ТП, а именно на тех участках, где при первом прогоне зафиксировано наибольшее их количество.

Следовательно, рост количества дефектов происходит не случайно. Несмотря на достаточно продолжительный период времени, прошедший с момента выполнения полного внутритрубного контроля ТП и наличия расшифрованных данных, подробного анализа, выявления закономерностей, попытки моделирования и прогнозирования потенциально-опасных участков на основе математических моделей практически не было. Хотя следует отметить, что проведение внутритрубной дефектоскопии само по себе не решает проблемы оценки технического состояния ТП. Это первый этап, где выявляются параметры и месторасположение дефектов, создается база данных, но только дальнейший анализ позволяет оценить фактическое состояние ТП.

Из проведенного обзора диагностирования ТП следует отметить увеличивающуюся продолжительность эксплуатации ТП в неблагоприятных коррозионных условиях, что повышает риск коррозионных разрушений и низкий уровень автоматизации обработки информации о состоянии ТП. В то же время ни один из методов коррозионного контроля не отражает реальной скорости коррозии ни в контролируемой системе в целом, ни на отдельных участках. Результаты коррозионного контроля и обследования состояния вырезанных участков дают основание предполагать наличие значительного количества коррозионных дефектов на всем протяжении ТП.

Применение внутритрубной дефектоскопии как наиболее эффективной, позволяет создать банк данных о техническом состоянии ТП, однако по этим данным, можно оценить только степень опасности отдельных дефектов. После внутритрубной диагностики распознаются различные типы дефектов. Несмотря на определенные успехи в разработке методов оценки и классификации локальных дефектов по степени опасности, практически нет методик определения потенциально-опасных участков ТП. Поэтому надежность ТП достигается за счет значительного увеличения объема работ по контролю поверхности труб.

Учитывая значительное количество дефектов поверхности на каждом ТП (например, по данным ВТИ на 1990 и 1995 г. для ТП УКПГ 8-1-ОГПЗ, их количество 413 и 635 соответственно), для комплексного анализа состояния ТП необходима система автоматизированной идентификации коррозионного состояния ТП.

Несмотря на большой объем данных по отдельным дефектам, идентификация и прогнозирование коррозионного состояния поверхности трубопроводов с общей и язвенной коррозией, изменяющей рельефность внутренней и наружной поверхности, недостаточно эффективны. Использование системных агрегированных параметров и новых математических моделей на их основе позволяет существенно повысить эффективность идентификации коррозионных состояния трубопроводов.

2 Агрегированные параметры и модели кинетики коррозионных процессов

2.1 Классификация модельных параметров

Для построения математических моделей коррозионного процесса трубопроводов обычно ведут наблюдения за изменением во времени какоголибо локального параметра, отражающего изменение свойств металла ТП. Предлагаемая классификация разделяет перечисленные локальные параметры по физико-механическим свойствам поверхности ТП на массовые, высотные, электрические, механические и оптические. Следующим уровнем иерархии по критерию изменения времени каждая группа локальных параметров разделена на статические и динамические. По каждой подгруппе, в соответствии с таблицей 2.1, определены абсолютные и относительные выражения.

Массовый - показатель изменения потери массы металла, кг/м². Под массовым статическим абсолютным показателем m понимается значение удельной потери массы металла. Под массовым статическим относительным показателем понимается значение удельной потери массы металла, отнесенное к максимальной глубине разрушения металла на единице площади: $m/m_{\delta a3}$. Под массовым динамическим абсолютным показателем понимается изменение удельной потери массы металла, отнесенное к максимальной потери массы металла в течение времени $\Delta m/\Delta t$. Под массовым динамическим относительным показателем понимается изменение удельной потери массы металла, в течение времени $\Delta m/\Delta t$. Под массовым динамическим относительным показателем понимается изменение удельной потери массы металла, отнесенное к базовому значению, в течение времени ($\Delta m/m_{\delta a3}$)/ Δt .

Высотный – показатель изменения глубины разрушения металла (толщины продуктов коррозии), м. Под высотным статическим абсолютным показателем h понимается значение удельной глубины разрушения металла (толщины продуктов коррозии). Под высотным статическим относительным показателем понимается значение удельной глубины разрушения металла (толщины продуктов коррозии), отнесенное к максимальной глубине разрушения металла на единице площади: h/h_{6a3} . Под высотным динамическим абсолютным показателем понимается изменение удельной глубины разрушения металла (толщины продуктов коррозии) в течение времени $\Delta h/\Delta t$. Под высотным динамическим относительным показателем понимается изменение удельной глубины разрушения металла (толщины продуктов коррозии), отнесенное к базовому значению, в течение времени ($\Delta h/h_{6a3}$)/ Δt ;

Объемный - показатель изменения объемной потери металла, м³. Под объемным статическим абсолютным показателем V понимается значение удельного объема разрушения металла. Под объемным статическим относительным показателем понимается значение удельного объема разрушения металла, отнесенное к объему максимального разрушения металла: V/V_{баз}. Под объемным динамическим абсолютным показателем понимается измене-

ние удельного объема разрушения металла в течение времени $\Delta V/\Delta t$. Под объемным динамическим относительным показателем понимается изменение удельного объема разрушения металла, отнесенное к базовому значению, в течение времени ($\Delta V/V_{6a3}$)/ Δt .

Электрический - показатель изменения сопротивления металла, R/M^2 (анодной плотности тока, A/M^2). Под электрическим статическим абсолютным показателем R понимается значение сопротивления металла (анодной плотности тока). Под электрическим статическим относительным показателем понимается значение сопротивления металла (анодной плотности тока), отнесенное к сопротивлению металла при нулевой коррозии: R/R_{6a3} . Под электрическим динамическим абсолютным показателем понимается изменение сопротивления металла (анодной плотности тока), отнесенное к сопротивлению металла при нулевой коррозии: R/R_{6a3} . Под электрическим динамическим абсолютным показателем понимается изменение сопротивления металла (анодной плотности тока) в течение времени $\Delta R/\Delta t$. Под электрическим динамическим относительным показателем понимается изменение сопротивления металла/анодной плотности тока, отнесенное к базовому значению, в течение времени ($\Delta R/R_{6a3}$)/ Δt .

Толщина металла во все время испытаний должна быть одинаковой и по этой причине чаще всего определяют удельное сопротивление, т.е. изменение электрического сопротивления на единицу площади образца при длине равной единице. Этот метод имеет ограничения применения (для листового металла не более 3мм).

Механический - показатель изменения предела прочности металла при растяжении после коррозии, H/m^2 . Под механическим статическим абсолютным показателем τ понимается значение предела прочности металла. Под механическим статическим относительным показателем понимается значение предела прочности при растяжении с нулевой коррозией: τ/τ_{6a3} . Под механическим динамическим абсолютным показателем понимается изменение предела прочности металла в течение времени $\Delta \tau/\Delta t$. Под механическим динамическим относительным показателем казателем понимается изменение предела прочности металла в течение времени $\Delta \tau/\Delta t$. Под механическим динамическим относительным показателем казателем понимается изменение предела прочности металла в течение времени $\Delta \tau/\Delta t$. Под механическим динамическим относительным показателем понимается изменение предела прочности металла, отнесенное к

Оптический – процентный показатель изменения отражательной способности поверхности металла. Под оптическим статическим абсолютным показателем Q понимается значение коэффициента отражения поверхности металла. Под оптическим статическим относительным показателем понимается значение понимается значение коэффициента отражения, отнесенное к пределу отражательной способности поверхности металла: Q/Q_{баз}. Под оптическим динамическим абсолютным показателем понимается изменение отражательной способности поверхности металла в течение времени $\Delta Q/\Delta t$.

Под оптическим динамическим относительным показателем понимается изменение отражательной способности поверхности металла, отнесенное к базовому значению, в течение времени ($\Delta Q/Q_{\text{баз}}$)/ Δt .

		in interpos	
		абсолютные	m
Маааарыза	Статические	относительные	m/m _{баз}
Массовые		абсолютные	$\Delta m/\Delta t$
	динамические	относительные	$(\Delta m/m_{6a3})/\Delta t$
D		абсолютные	h
Высотные	статические	относительные	$h/h_{\delta a_3}$
(ГЛУОИННЫЕ, ТОЛЩИНЫ	пинаминеские	абсолютные	$\Delta h/\Delta t$
продуктов коррозии)	динамические	относительные	$(\Delta h/h_{\delta a3})/\Delta t$
		абсолютные	V
	Статические	относительные	V/V _{6a3}
Ооъемные		абсолютные	$\Delta V / \Delta t$
	динамические	относительные	$(\Delta V/V_{6a3})/\Delta t$
D	OTOTULOOKUO	абсолютные	R
Электрические	Статические	относительные	R/R _{6a3}
(сопротивления, токо-		абсолютные	$\Delta R/\Delta t$
BBIC)	динамические	относительные	$(\Delta R/R_{6a3})/\Delta t$
Механические	отатинеские	абсолютные	τ
(прочностные)	Статические	относительные	τ/τ_{6a3}
		абсолютные	$\Delta \tau / \Delta t$
	динамические	относительные	$(\Delta \tau / \tau_{6a3}) / \Delta t$
_	0707111001410	абсолютные	Q
Оптические	статические	относительные	Q/Q _{6a3}
(зеркальное и диф-		Абсолютные	$\Delta Q/\Delta t$
фузное отражение)	динамические	относительные	$(\Delta Q/Q_{6a3})/\Delta t$

Таблица 2.1 – Классификация локальных параметров

В работах по исследованию кинетики коррозионного процесса используются локальные параметры того или иного уровня предложенной иерархии. Рассмотренные показатели в полной мере не отражают дискретную природу коррозионного процесса и недостаточно описывают неравномерность поверхности коррозирующего металла, потому что носят локальный характер. При использовании этих показателей большой объем данных, полученный внутритрубной инспекцией, остается невостребованным, априорно ухудшая погрешность математических моделей, разработанных на его основе. Поэтому целесообразно ввести агрегированные параметры, учитывающие неравномерность поверхности трубопровода, возникающую в результате выполнения технологических процессов изготовления и последующей эксплуатации, т.к. при коррозии ТП на поверхности металла появляются и изменяются дефекты, что приводит к целому ряду количественных и качественных изменений их состояния. Технологические факторы, вызывающие неровность поверхности, одновременно влияют на другие показатели физического состояния поверхности: остаточные напряжения, микротрещины, структурное состояние и др. С другой стороны, в ряде работ упоминается, что основные факторы, определяющие работоспособность труб, такие как усталостное сопротивление; герметичность сварных швов; термическое и электростатическое контактное сопротивление; трение и износ зависят от качества коррозионной поверхности трубопровода.

На основе проведенного анализа проблемы и ряда исследований предложено к рассмотрению такое свойство коррозионной поверхности, как рельефность, обладающее большей системностью и информативностью. Под рельефностью поверхности понимаем совокупность неровностей с относительно малыми шагами, создающими неравномерность и рассматриваемыми в пределах базовой длины, выбирающейся в зависимости от характера поверхности.

В соответствии с системным анализом /24, 25/ техника агрегирования основана на использовании определенных моделей исследуемой или проектируемой системы. Именно избранные модели жестко определяют, какие части должны войти в состав системы и как они должны быть связаны между собой. Разные условия и цели агрегирования приводят к необходимости использовать разные модели, что в свою очередь определяет как тип окончательного агрегата, так и технику его построения. Как известно, в общем виде агрегирование определяют как установление отношений на заданном множестве элементов. Благодаря свободе выбора в том, что именно рассматривается, как образуется множество элементов и какие отношения устанавливаются на этом множестве, получается множество задач агрегирования.

Из типичных для системного анализа агрегатов: конфигуратор; агрегаты-структуры и агрегаты-операторы, последние применяются в наиболее часто встречающихся ситуациях, требующих агрегирования. Эта ситуация состоит в том, что совокупность данных, с которыми приходится иметь дело, слишком многочисленна и плохо обозрима. В данном случае на первый план выступает такая особенность агрегирования, как уменьшение размерности. Из возможных агрегированных параметров в таблице 2.2 приведены рациональные для рельефности поверхности, причем переменная X характеризует результаты предыдущего, а Y - последующего диагностирований.

Рельефность поверхности можно характеризовать той же системой параметров, как и известный в машиностроении показатель шероховатость, но с увеличением диапазона изменения в 10^2 раз. Таким образом, если в пространстве распределить параметры по определенной шкале измерений, то параметры рельефности непосредственно следуют за параметрами шероховатости.

Наименование	Обозначение	Выражение
Степень равномерности	Na	$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left x_i - \overline{x} \right ; \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left y_i - \overline{y} \right $
Степень рассеивания	Nq	$\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_{i}-\overline{x})^{2}}$; $\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{i}-\overline{y})^{2}}$
Степень экстремальности	Nz	$\frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{k} x_i - \overline{x} _{max} + \sum_{i=1}^{k} x_i - \overline{x} _{min} \right);$ $\frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{k} y_i - \overline{y} _{max} + \sum_{i=1}^{k} y_i - \overline{y} _{min} \right), k = 5, 7, \dots$
Дог	полнительные	
Степень асимметрии	Ns	$\sqrt[3]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i - \overline{x} ^3}; \sqrt[3]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i - \overline{y} ^3}$
Степень островершинности	No	$\sqrt[4]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_{i}-\overline{x})^{4}}; \sqrt[4]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_{i}-\overline{y})^{4}}$

Таблица 2.2 - Классификация агрегированных параметров рельефности

Для проведения профилизации поверхности определена единая система отсчета. За начало отсчета ординат принята средняя линия профиля y, за базовую длину $L_{\text{баз}}$ принято расстояние между точками на поверхности, на котором однозначно могут быть определены все три параметра рельефности (рисунок 2.1). Для трубопроводов наиболее употребительными базовыми длинами считаем 0,25 и 0,8 м (таблица 2.4).

Рельефность поверхности определяется совокупностью высотных показателей, которыми служат: параметры глубины, характеризующие размеры неровностей и параметры шага. В качестве параметров глубины использованы три параметра: степени равномерности, рассеивания и экстремальности поверхности металла, полнее описывающие рельефность поверхности.



Рисунок 2.1 – Геометрическая интерпретация глубинных параметров рельефности

Степень равномерности:

$$Na = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |y_i(L) - \overline{y}(L)|; \qquad (2.1)$$

Степень рассеивания:

$$Nq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(y_i(L) - \overline{y}(L) \right)};$$
 (2.2)

Степень экстремальности:

$$Nz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{5} \left| y_{i \max}(L) \right| + \sum_{i=1}^{5} \left| y_{i \min}(L) \right| \right), \qquad (2.3)$$

где L – абсцисса профиля, отсчитываемая вдоль базовой линии;

 $y_i(L)$ и y(L) – ординаты точек профиля поверхности и среднее значение; $y_{imax}(L)$, $y_{imin}(L)$ – экстремумы ординат точек профиля поверхности; n – количество измеренных точек.

В качестве параметров шага регламентируем шаг дискретизации, как интервал измерения и базовую длину L_{6a3} , как шаговый предел. Перечисленные параметры используем для определения рельефности поверхности вырезок и участков трубопроводов, считая, что для вырезок шаг дискретизации равен одному сантиметру, базовая длина зависит от класса рельефности, а для участков трубопроводов учитываем, что базовая длина перешла в длину участка и параметры рассчитываются на основе значений, расположенных в местах нахождения дефектов.



Рисунок 2.2. – Модели представления дефектов

На следующем иерархическом уровне агрегированные параметры по критерию представительности подразделены на параметры для оценки рельефности вырезок и участков ТП. Значение выбираемой базовой длины для соотношений (2.1)-(2.3) зависит от объекта идентификации. По критерию «модель дефектов» параметры рельефности разбиты по 3 подгруппам: учитывающие глубину, площадь и объем дефектов.

Для идентификации коррозионного состояния поверхности используем 3 совокупности параметров, характеризующих рельефность по глубине, площади и объему. Для перехода от локальных параметров, таких как длина а, ширина b и высота дефекта h, к плоскостным (по вертикальной S_в и горизонтальной S_г плоскости) и объемным V, более полно описывающих коррозионные потери металла, в соответствии с рисунком 2.2, рассматриваются несколько вариантов геометрического представления дефектов: шаровой сегмент; шаровой слой; эллиптический параболоид и усеченный прямой конус.

Исходя из анализа погрешностей, приведенных в таблице 2.3, в качестве наиболее приемлемой модели дефекта предпочтительнее использовать эллиптический параболоид.

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1 1 1		
Модель дефекта	$\frac{\Delta V}{V} 100\%$	$\frac{\Delta S_{s}}{S} 100\%$	$\frac{\Delta S_{e}}{S}$ 100%
Шаровой сегмент	0,0032	0,291	2,512
Шаровой слой	0,0051	0,563	2,512
Эллиптический параболоид	0,0048	0,291	0,637
Усеченный прямой конус	0,0049	0,563	2,512

Таблица 2.3 – Погрешности моделей дефектов

Классификация параметров, относящаяся к оценке рельефности вырезок и участков, представлена в таблице 2.4.

1 Глубинная рельефность, м - показатель изменения глубины разрушения металла, определяемый тремя параметрами:

а) степень равномерности поверхности металла по глубине:

$$Na^{h} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| h_{i} - \overline{h} \right|}{n}.$$
(2.8)

б) степень рассеивания поверхности металла по глубине:

$$Nq^{h} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_{i} - \overline{h})^{2}}{n}}.$$
 (2.9)

в) степень экстремальности неровности поверхности металла по глубине;

$$Nz^{h} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{5} \left| h_{i} - \overline{h} \right|_{\min} + \sum_{i=1}^{5} \left| h_{i} - \overline{h} \right|_{\max} \right).$$
(2.10)

2 Плоскостная рельефность, м² – показатель изменения разрушения металла по площади в вертикальном (иногда горизонтальном) сечении, определяемый тремя параметрами:

а) степень равномерности поверхности металла по площади:

$$Na^{-s} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |S_i - \overline{S}|}{n}.$$
 (2.11)

б) степень рассеивания поверхности металла по площади:

$$Nq^{s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (S_{i} - \overline{S})^{2}}{n}}.$$
 (2.12)

29

в) степень экстремальности поверхности металла по площади:

$$Nz^{S} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{5} \left| S_{i} - \overline{S} \right|_{\min} + \sum_{i=1}^{5} \left| S_{i} - \overline{S} \right|_{\max} \right).$$
(2.13)

3 Объемная рельефность, м³ - показатель изменения объемного разрушения металла по объему, определяемый тремя параметрами:

а) степень равномерности поверхности металла по объему:

$$Na^{V} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |V_{i} - \overline{V}|}{n}.$$
 (2.14)

б) степень рассеивания поверхности металла по объему:

$$Nq^{V} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (V_{i} - \overline{V})^{2}}{n}}.$$
 (2.15)

в) степень экстремальности поверхности металла по объему:

$$Nz^{S} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{5} \left| V_{i} - \overline{V} \right|_{\min} + \sum_{i=1}^{5} \left| V_{i} - \overline{V} \right|_{\max} \right).$$
(2.16)

Таблица 2.4 – Классификация агрегированных параметров рельефности ТП

	Глубиннов	степень равномерности по глубине	Na ^h _r
	1 Лубинная	степень рассеивания по глубине	Nq ^h _r
	рельефность	степень экстремальности по глубине	Nz ^h _r
	Плоокоотноя	степень равномерности по площади	Na ^s _r
Вырезки ТП	плоскостная	степень рассеивания по площади	Nq ^s _r
	рельсфность	степень экстремальности по площади	Nz ^s _r
		степень равномерности по объему	Na ^v _r
	Объемная	степень рассеивания по объему	Nq ^V _r
	рельсфность	степень экстремальности по объему	Nz ^v _r
	Глубиннов	степень равномерности по высоте	Na ^h u
	1 Лубинная	степень рассеивания по высоте	Nq ^h _u
	рельсфность	степень экстремальности по высоте	Nz ^h _u
	Плоскостиал	степень равномерности по площади	Na ^s u
Участки ТП	плоскостная	степень рассеивания по площади	Nq ^s _u
	рельефность	степень экстремальности по площади	Nz ^s _u
		степень равномерности по объему	Na ^v _u
	решефиости	степень рассеивания по объему	Nq ^V _u
	рельефность	степень экстремальности по объему	Nz_{u}^{V}

В таблице 2.5 значения параметров рельефности сгруппированы по классам и группам.

Группи	Vпосотт	Параметры рельефности				
трушы	Классы	Na, мм	Nq, мм	Nz, мм	L _б , м	
	1	8-4	10-5	32-16		
1	2	4-2	5-2,5	16-8	1,6	
	3	2-1	2,5-1,25	8-4		
2	4	1-0,5	1,25-0,625	4-2	0.5	
2	5	0,5-0,25	0,625-0,32	2-1	0,5	
	6	0,25-0,125	0,32-0,16	1-0,063		
3	7	0,125-0,063	0,16-0,08	0,063-0,32	0,16	
	8	0,063-0,032	0,08-0,04	0,032-0,16		
4	9	0,032-0,016	0,04-0,02	0,16-0,08		
	10	0,016-0,008	0,02-0,001	0,08-0,04	0.05	
	11	0,008-0,004	0,001-0,005	0,04-0,02	0,03	
	12	0,004-0,002	0,005-0,002	0,02-0,01		

Таблица 2.5 - Распределение глубинных параметров рельефности Na и Nz по классам и группам

2.2 Классификация моделей кинетики коррозионного процесса

Существующие модели используют только перечисленные выше локальные параметры. Классификация имеющихся моделей по критерию степень описания подразделяет их на локальные и агрегированные в соответствии с таблицей 2.5. В свою очередь, локальные модели классифицируются:

1 По линейности на линейные (М. Фарадей, Г. К. Шрейбер, Л. С. Саакиян, Е. В. Маркова, А. Г. Дорофеев и др.) и нелинейные (И. Денисон, Ф. Чемпион, Л. Я. Цикерман и др.). Модель коррозионного процесса может быть либо линейной, либо нелинейной. Если связь между входным и выходным параметром линейна с точки зрения обеих переменных, то модель линейна. В обратном случае модель является нелинейной;

2 По виду уравнения на алгебраические, дифференциальные, интегральные и др. (Е. Д. Мор, А. М. Биккарис, Ю. В. Демин и др.);

3 По изменению во времени на статические и динамические. Модель коррозионного процесса является статической, если она описывается только функциональными зависимостями, которые не учитывают скорость и ускорение процесса коррозии. Если в модель входят первая и вторая производные по времени, описывающиеся дифференциальными членами, то модель является динамической;

4 По роду получения на аналитические (П. Азиз, Ф. Чемпион, Ж. Миткальф и др.) и экспериментальные (М. Фарадей, П. Середа и др.);

5 По соотношению входов и выходов на модели с одним входом и выходом (М. Фарадей, В. Швенк, Г. Торнес и др.), с несколькими входами и одним выходом (Г. К. Берукштис, Г. Б. Кларк, А. И. Голубев, М. Х. Кадыров и др.), с одним входом и несколькими выходами и модели с несколькими входами и выходами (7). Процесс коррозии происходит под влиянием множества входных воздействий. Если учитывается влияние одного воздействия из этого множества на единственный выходной параметр, то модель является с одним входом и выходом. Такие модели являются простейшими и определенным образом идеализируют кинетику коррозионных процессов. Основная масса исследователей разрабатывает модели, учитывая влияние нескольких входных воздействий на единственный выходной параметр. Примером модели с соотношением 1-много является случай, когда на входе принимается во внимание наиболее существенное воздействие, а на выходе учитываются многочисленные последствия коррозии металла. Модели с соотношением многих входов и выходов являются комбинацией моделей 2-го и 3-го типов;

6 По степени определенности на детерминированные (Л. Я Цикерман, Б. Г. Тер-Акопов и др.) и стохастические (Р. К. Трипати, И. С. Агниботи, И. Н. Нанда и др.). В любой агрессивной среде действуют совместно как детерминированные, так и случайные факторы. Модель является детерминированной, если она не учитывает влияние случайных возмущений. При введении случайных входных воздействий модель становится стохастической;

7 По представлению информации на дискретные и непрерывные. В дискретных моделях исходная информация представлена временными рядами, т.е. в виде дискретных величин. Этот временной ряд обычно имеет постоянный шаг изменения - шаг дискретизации. Можно условно считать, что дискретная модель коррозионной каверны подвержена импульсному воздействию среды. Модель является непрерывной, если потоки данных изменяются непрерывно в течение времени.

Агрегированные модели разделяем по степени агрегированности на модели с одиночными параметрами агрегирования и с комплексом этих параметров. Модели на основе комплекса параметров учитывают значимость входящих в них одиночных следующим образом:

a) аддитивные модели: $S_{add} = \alpha_1 Nz + \alpha_2 n_{d} + \alpha_3 Na + \alpha_4 Nq;$ б) мультипликативные модели: $S_{Myn} = Nz^{\alpha 1} + n_{d}^{\alpha 2} + Na^{\alpha 3} + Nq^{\alpha 4};$ (2.18)

в) комбинированные модели: $S_{\text{комб}} = \xi S_{\text{адд}} + (1-\xi) S_{\text{мул}}$,

α_i – весовые коэффициенты; где

ξ - коэффициент, учитывающий степень комбинации моделей;

п_л – количество дефектов.

	Пинайнаатт	Линейные			
-	Линеиность	Нелинейные			
		Алгебраическ	ие		
		Дифференциа	льные		
	Вид уравнения	Интегральные			
		Интегро-дифф	Интегро-дифференциальные		
	Измецецие времеци	Статические			
	Изменение времени	Динамические	e		
Локальные	Род получения	Аналитически	le		
	тод получения	Эксперимента	льные		
		1-1			
	Соотношение входов и	Много-1			
	выходов	1-много			
		Много-много			
		Детерминирон	занные		
	степень определенности	Стохастически	ие		
	Представление инфор-	Дискретные			
	мации	Непрерывные			
		На основе	Na		
A		одиночных	Nq		
	Степень	параметров	Nz		
Агрегированные	агрегированности	На основе	Аддитивные		
		комплекса	Мультипликативные		
		параметров	Комбинированные		

Таблица 2.6 – Классификация моделей кинетики коррозионного процесса

Модели на основе комплексов агрегатов названы коррозионным состоянием (КС) поверхности ТП - S, которое в дальнейшем определяется комбинацией четырех параметров: Na, Nq, Nz и количества дефектов n_д в пределах соответствующей базовой длины.

Многоплановость моделей наглядно отражается иерархической схемой. На верхнем уровне составленной иерархической схемы процесса идентификации (рисунок 2.3) определяем КС по идентификационным моделям (выражения 2.18) первого уровня. Параметры рельефности, входящие в идентификационные модели, определяются по уравнениям (2.14 - 2.16). В свою очередь, величины рельефности поверхности соответствуют глубинной (h), плоскостной (F) или объемной (V) модели представления дефектов третьего уровня иерархической модели.

0.	0. Коррозионное состояние трубопровода S						
1.	I. Sадд Sмул Sкомб						
2.	Na		Nz	Nq		n _д	
3.	h		I			V	

Рисунок 2.3 – Иерархическая схема процесса идентификации КС ТП

Трехуровневая схема процесса идентификации демонстрирует сложность выбора рациональной модели и нуждается во введении критериев оценки. В этом качестве выбран известный критерий минимума среднего риска, получаемый как минимум разности между эталонным значением, оцениваемым по среднеарифметическому КС и средними значениями по аддитивной, мультипликативной и комбинированной моделям.

2.3 Сравнительная идентификация коррозионного состояния ТП

Обоснование использования совокупности параметров рельефности получено путем проведения сравнительной идентификации в коррозионного состояния соответствии с рисунком 2.4.



Рисунок 2.4 - Схема сравнительной идентификации КС

При сравнительном анализе погрешностей оценки КС с помощью Na, Nq и Nz по отдельности за эталонную взята модель на основе комплекса агрегатов. В качестве критерия оценки принят модуль разности значений эталонной идентификации и идентификации на основе каждого агрегированного параметра. Погрешность идентификации оценивается отношением критерия к относительному значению каждого параметра в процентах. Таким образом для Na E=14 %, для Nq E=13,4 %, для Nz E=33 % относительно эталонной оценки КС аддитивной моделью. Точность оценок весьма различна для Na, Nq и Nz. Это учтено при выборе весовых коэффициентов моделей КС. Можно упростить модель КС за счет использования Na и Nz или Nq и Nz, но дальнейшие исследования ТП показывают, что для отдельных ТП необходимо наличие всех трех параметров рельефности и количества дефектов.

Группа	Na _{cp}	Na _{баз}	Nq _{cp}	$Nq_{\delta a 3}$	Nz _{cp}	Nz _{баз}
3	0,11	8	0,14	10	0,273	0,012
S	J= Na _{cp} -S	J= Nq _{cp} -S	J= Nz _{cp} -S	E=J/Na _{cp}	E=J/Nq _{cp}	E=J/Nz _{cp}
0,012	0,002	0,0025	0,003	0,14	0,134	0,33

Таблица 2.7 - Результаты сравнительной идентификации КС ТП

Этот вывод подтверждается также литературными данными (Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. /18/, Дунин-Барковский И.В. и др.), показывающими, что исчерпывающе оценить рельефность поверхности с помощью одного критерия невозможно. Именно поэтому возникает задача разработки комплекса параметров рельефности.

2.4 Уравнение энергетического баланса кинетики коррозии

Процесс коррозии является необратимым процессом и модели кинетики коррозии, особенно решающие задачу прогнозирования, должны учитывать это свойство. Коррозионная устойчивость металла определяется способностью металла противостоять агрессивным воздействиям окружающей среды. Принцип Ле-Шателье, заключающийся в том, что любая физическая структура способна противодействовать внешним возмущениям и законы термодинамики объясняют физическую сущность механизма противодействия металла процессу коррозии.

На базе основного уравнения термодинамики и работ Л. Я. Цикермана предлагается уравнение энергетического баланса в дифференциальной форме для описания кинетики коррозионного процесса как объекта управления:

$$A\frac{dS(t)}{dt} = U(t) + W(t) - M(t) - R(t), \qquad (2.19)$$

где S-коррозионное состояние поверхности;

dS(t)/dt – скорость изменения коррозионного состояния поверхности, год⁻¹;

A(t) – коэффициент коррозионной устойчивости металла, Дж год;

U(t) – энергетический поток, концентрирующийся в металле, Дж;

W(t) – изменение энергетического потока за счет изменения рельефности поверхности участка ТП, Дж;

M(t) – поток энергии за счет изменения электрохимического потенциала металла, Дж;

R(t) – энергия за счет неравномерности парциального давления на участке ТП, Дж. Соотношение четырех составляющих правой части уравнения (2.19), характеризующих изменение энергии, определяет кинетику КС ТП. Отметим, что величины U(t) и W(t) ускоряют коррозионный процесс, а величины M(t) и R(t) тормозят. Особо выделим величину W(t), которая вносит наибольший вклад в кинетику коррозии при определенных значениях КС S.

Литературные /16, 17/ и опытные данные показывают, что любая реальная коррозионная пара как изолированная замкнутая система достаточно быстро достигает состояния термодинамического равновесия, которое является весьма устойчивым. Это объясняется тем, что если бы замкнутая система была «неиссякаемой» в энергетическом отношении, т.е. обладала бы способностью непрерывно восстанавливать израсходованную энергию, то в этом случае независимо от времени внутренняя энергия U(0) коррозионной пары будет величиной постоянной. В действительности расход энергии коррозионной парой приводит к непрерывному сближению уровней потенциалов анода и катода, что приводит к затуханию процесса коррозии металла и наличию непрерывного роста энтропии (дезорганизации) системы. Кроме того, продукты коррозии более устойчивы по сравнению с устойчивостью металла.
3 Рельефность поверхности вырезок трубопроводов

3.1 Датчики для измерения рельефности

Для проведения лабораторных измерений разработан ряд датчиков с механической оценкой рельефности вырезок ТП. Одним из них является датчик для механического измерения глубин рельефности поверхности вырезок ТП со средними повреждениями. Малая погрешность при измерении глубин рельефности вырезок ТП достигается за счет использования индикатора часового типа и опорной поверхности. Конструктивная схема датчика включает в себя: индикаторную головку типа ИЧ-10 на 100 делений; стопорные винты. Для жесткости конструкции предусмотрено 2 винта; установочную скобу с высокой степенью обработки опорной поверхности. Для смены игл разного диаметра и конфигурации в концевой части предусмотрен в державке завинчивающийся механизм.

Чтобы оценить глубину дефекта, с помощью стопорных винтов и установочной скобы выставляется базовый уровень на ровной металлической поверхности, вращением шкалы индикаторной головки на базовом уровне устанавливается нулевая отметка и проводятся непосредственные измерения глубин поверхности вырезки. Диапазон измерения такого приспособления составляет 0-10 мм, цена деления 0.01, точность измерения 0.05 мм.

Для лабораторных измерений вырезок ТП со значительными повреждениями предлагается профилометр на основе реечного механизма поднятия и опускания градуированного стержня с микрометрической шкалой. Конструктивная схема датчика представлена на рисунке 3.1а.

При оценке рельефности поверхности вырезка ТП вкладывается в крепежный механизм 3 и устанавливается в нужной плоскости, передвигаем подвижный стол 4 на шаг дискретизации, реечным механизмом опускаем стержень 2 и снимаем показания. Для определения точности измерений с помощью профилометра проведен специальный эксперимент /14/: построен массив измерений одной и той же величины глубины рельефности (0,15; 0,075; 0,085; 0,082; 0,042; 0,049; 0,115; 0,129; 0,137; 0,036). Найдено значение математического ожидания этой случайной величины равное 0,09 и отклонения каждого измерения от мат. ожидания: (0,06; -0,015; -0,005; -0,008; -0,048; -0,041; 0,025; 0,039; 0,047; -0,054). Проведена оценка дисперсии и среднего квадратического отклонения, равного 0,041, которое и является ошибкой измерения профилометра.



- 1 станина;
- 2 градуированный стержень с микрометрической шкалой;
- 3 реечный механизм;
- 4 крепежный механизм;
- 5 подвижный стол;
- 6 вырезка трубопровода.

Рисунок 3.1а – Профилометр

Чтобы оценить поверхность вырезок ТП с минимальными повреждениями, предлагается использовать двухканальный электронный блок измерения линейных величин с добавленной установочной скобой с опорной поверхностью.



Рисунок 3.1б - Двухканальный электронный прибор

Конструктивная схема датчика представлена на рисунке 3.16. Электронный прибор включает в себя следующие элементы: 1 - индикатор с двумя шкалами измерений; 2 – кнопки выбора диапазона измерений; 3 – кнопка выбора единиц измерения; 4 – ультразвуковой щуп; 5 – установочная скоба.

Для производства измерений на ультразвуковой щуп 4 одевается установочная скоба 6 и регулятором нуля выставляется нулевой уровень на ровной поверхности. Выбираем диапазон измерения из шести возможных диапазонов кнопками 2 и единицы измерения кнопкой 3, производим измерения ультразвуковым щупом и снимаем показания по выбранной шкале 1. Диапазон измерения составляет 3-1000 мкм, максимальная погрешность 0,05 мкм.

3.2 Корреляционный анализ параметров рельефности

Оценку параметров рельефности получаем измерением поверхностей вырезок ТП. С помощью датчиков, описанных в 3.1, проводится их профилизация с получением случайных функций рельефности y(L) от длины L. При профилировании поверхности вырезок ТП возникает задача выбора интервала дискретизации непрерывной функции y(L), и следовательно, установления необходимой базовой длины L_{6a3} , которая достаточна для оценки рельефности.

Чтобы построить корреляционную функцию вырезок трубопроводов задаемся интервалом дискретизации, равным 1 м⁻² и строим корреляционную матрицу на основе ряда равноотстоящих точек, полученных при профилировании поверхности вырезок. Значениями этой матрицы являются отклонения глубин неровностей поверхности вырезок ТП. Каждая строка таблицы соответствует определенной реализации, а число столбцов равно количеству опорных значений аргумента L. Процесс коррозии считаем стационарным случайным процессом, т. к. изменением его математического ожидания можно пренебречь. Следовательно, его корреляционная функция зависит только от разности аргументов L' и L – сечений корреляционной функции и обладает свойством симметрии: R(L, L')=R(L',L), т. е. корреляционную функцию можно определять только для положительных значений L'-L. Степень зависимости величин y(L) и y(L') характеризуется их корреляционным моментом, который является функцией двух аргументов L и L', при этом аргументы L и L' имеют размерность длины [м]. Эта корреляционная функция R(L, L') при каждой паре значений L, L' равна корреляционному моменту соответствующих сечений случайной функции:

$$R(L,L')=M[(y(L)-m(L))(y(L')-m(L'))].$$
(3.1)

На первом шаге, при нулевом сдвиге, значение корреляционного момента определяем как математическое ожидание от суммы квадратов всех отклонений глубин рельефности. Для получения k-того значения корреляционного момента (k=0,1,2,...n) производим k-тый сдвиг на единицу относительно первого столбца и считается сумма произведений значений i-го столбца на значения i+k столбца. Таким образом получаем корреляционные функции для каждой вырезки.

Так как корреляционная функция характеризует степень связи между сечениями L и L', то при анализе сечений графиков корреляционных функций, видно, что при близких значениях L и L' величины y(L) и y(L') тесно связаны: если величина y(L) приняла какое-то значение, то и величина y(L') с большой вероятностью примет значение, близкое к нему. С другой стороны, при увеличении интервала между сечениями L и L' связь величин y(L) и y(L') ослабевает.

Чтобы сравнить поведение корреляционных функций всех вырезок, перешли, в соответствии с соотношением (3.2), к нормированным корреляционным функциям (НКФ) (рисунок 3.2), абсолютная величина которых не превышает единицы.

$$\rho(L,L') = \frac{R(L,L')}{R(0)},$$
(3.2)

где D=R(0) – постоянная дисперсия стационарного процесса.



Рисунок 3.2 – Нормированные корреляционные функции для вырезок ТП, построенные по экспериментальным данным

Наличие скрытой периодической составляющей сказывается на характере протекания нормированных корреляционных функций (НКФ). Соответствующий вид НКФ для параметров рельефности типичен для прикладных стационарных случайных процессов. С ростом интервала корреляционная связь ослабевает. При некотором значении аргумента НКФ пересекает ось абсцисс и далее наблюдается затухание колебаний кривой относительно оси.

Полученные статистические результаты, отраженные на рисунке 3.2, позволяют аппроксимировать НКФ математической моделью (рисунок 3.3) с

минимальной среднеквадратической погрешностью:

$$\rho(L) = e^{-\alpha|L|} \cos(\beta L), \qquad (3.3)$$



где α и β - модельные коэффициенты.

Рисунок 3.3 – Нормированные корреляционные функции для вырезок ТП, построенные по моделям аппроксимации

Значения модельных коэффициентов, интервала корреляции и полупериода колебаний для некоторых вырезок ТП сведены в таблицу 3.1.

№ вырез- ки	α, cm ⁻¹	β, см ⁻¹	L ₀ , см	Т _{ср} , см
1	0,453	0,615	2,773	2,514
4	0,441	0,565	2,521	2,511
15	0,425	0,742	2,347	2,698
Диапазон	0,4200,464	0.5610,751	2,0002,773	2.5112,70

Таблица	3	.1	-	Результаты	і корреляционного аналі	43a
---------	---	----	---	------------	-------------------------	-----

3.3 Спектральный анализ параметров рельефности

Проведем исследования характеристик рельефности в частотной области, в которую перейдем путем вычисления спектральной плотности по найденной корреляционной функции. Спектральную плотность характеризует функция S(w), которая связана с корреляционной функцией R(Δ L) взаимно обратными комплексными преобразованиями Фурье:

$$R(L) = 2 \int_{-00}^{00} S(w) e^{iwL} dw; \qquad S(w) = \frac{1}{\pi} \int_{-00}^{00} R(L) e^{-iwL} dL, \qquad (3.4)$$

где w - частота, м⁻¹.

Спектральная плотность реализации случайного процесса является положительной функцией аргумента w и не может принимать отрицательных значений, кроме того, в нашем случае она является четной. Уравнение нормированной спектральной плотности (НСП) находим по формуле (3.4), подставляя в нее R(L) из выражения (3.3):

$$S(w) = \frac{1}{2\pi} \int_{0}^{\infty} e^{-\alpha |L|} \cdot \frac{e^{i\beta L} + e^{-i\beta L}}{2} e^{-iwL} \cdot dL = \frac{1}{4\pi} \left[\int_{-00}^{0} e^{\alpha L} (e^{-i\beta L} + e^{-i\beta L}) e^{-iwL} dL + \int_{0}^{00} e^{-\alpha L} (e^{-i\beta L} + e^{-i\beta L}) e^{-iwL} dL \right] \cdot \frac{1}{2\pi} \left[\int_{0}^{0} e^{-\alpha L} (e^{-i\beta L} + e^{-i\beta L}) e^{-iwL} dL \right]$$

После преобразований, путем разбиения пределов интегрирования, использования выражений для гиперболического sin и cos, а также с помощью алгебраических группировок можно получить:

$$S(w) = \frac{\alpha}{2\pi} \left(\frac{1}{\alpha^2 + (w + \beta)^2} + \frac{1}{\alpha^2 + (w - \beta)^2} \right)$$
(3.5)

Поведение НСП (рисунок 3.4) зависит от соотношения модельных параметров α и β, т. е. от того, что преобладает в НКФ - убывание по закону экспоненты или колебание по закону косинуса. В данном случае налицо преобладание экспоненциальной компоненты.



Рисунок 3.4 - Спектральный анализ параметров рельефности ТП

При оценке спектральной плотности случайного процесса основными параметрами являются: частота среза w_c , ширина спектра Δw , частота w_0 , при которой спектральная плотность достигает максимума, само значение $S(w_0)$ и значение S при w=0 Частота среза w_c – существенная характеристика СП, определяющая верхнюю границу спектра частот процесса. Т к. в данном случае СП является непрерывной функцией частоты w, причем 0<w<00, то частота

среза w_c определяет и ширину полосы частот, характерной для данного процесса – т.е. ширину спектра дисперсий. В соответствии со значением ширины спектра Δw устанавливают широкополостность случайного процесса. Результаты анализа графиков нормированной спектральной плотности приведены в таблице 3.2.

№ вырез- ки	W _c , см ⁻¹	W_0, CM^{-1}	So	$\Delta w, cm^{-1}$
1	2,2	0,0	0,245	4,4
4	2,3	0,0	0,271	4,6
15	2,1	1,0	0,214	4,2
Диапазон	2,102,53	0,01,0	0.20.31	4,05,2

Таблица 3.2 – Результаты спектрального анализа вырезок ТП

Таким образом, на основе статистического анализа получаем оценки значений параметров рельефности Na, Nq, Nz (таблица 3.3), которые показывают, что исследованные вырезки относятся к 2 и 3 группе предлагаемого распределения параметров рельефности по глубине (таблица 2.3).

Таблица 3.3 – Распределение вырезок по классам и группам рельефности

	Na, M	4M		Nz,	MM		Nq,	MM	
№ образца	значение	группа	класс	значение	группа	класс	значение	группа	класс
1	0,283	2	5	0,674	3	6	0,386	2	5
4	0,461	2	5	0,657	3	6	0,562	2	5
15	0,664	2	4	1,211	2	5	0,857	2	4
Диапазон	0,250,71	2	4-5	0,541,46	2-3	5-6	0,380,97	2	4-5

Значение интервала корреляции говорит о том, что оценка рельефности для вырезок этих групп должна проводиться с шагом не менее 2.7 см. Проведено сравнение коррозионных состояний вырезок, рассчитанных с шагом дискретизации 3 см, полученным в результате статистического анализа и 1 см (эталонное КС). Схема и результаты сравнения приведены на рисунке 3.5 и таблице 3.4.



Рисунок 3.5 – Сравнительная идентификация вырезок ТП с различным шагом дискретизации измерений

Таблица 3.4 – Результаты сравнительной идентификации

№ вырезки	$\mathbf{S}_{\mathtt{PT}}$	S	$ \mathbf{J} $	Е, %
1	0,504	0,541	0,037	7,3
4	0,584	0,533	0,051	8,7
15	0,985	0,902	0,083	8,4
Диапазон	0,5010,989	0,5000,954	0,0310,092	7,19,2

Полученный диапазон погрешности Е говорит о независимости данных и справедливости сделанных выводов. Таким образом, по рельефности поверхности вырезок ТП установлено, что шаг дискретизации для вырезок ТП группы 2-3 должен быть не меньше 2,7 см, полупериод колебаний составляет 2,51-2,72 см, частота среза, определяющая верхнюю границу спектра частот дисперсий, равна 2,10-2,53 см⁻¹. 4 Идентификация коррозионного состояния трубопроводов

4.1 Идентификация коррозионного состояния трубопроводов на основе данных внутритрубной инспекции

С помощью внутритрубного снаряда-дефектоскопа получена значительная база данных, содержащая вид и местонахождение дефектов, их длину, ширину и глубину. Предложенные агрегированные параметры, характеризующие коррозионную поверхность позволяют модифицировать базу данных. Здесь рационально использовать аддитивные, мультипликативные и комплексные модели (2.18), характеризующие коррозионное состояние ТП, созданные на основе системы параметров рельефности Na, Nq, Nz и количества дефектов на рассматриваемом участке.

Проведение идентификации коррозионного состояния ТП предусматривает на первом этапе разбиение всей длины ТП на двухкилометровые участки. Длина участка обусловлена предварительными исследованиями удельного количества дефектов вырезок ТП. На втором этапе, на каждом совмещенном по инспекциям участке, определяются параметры рельефности по глубине: Na, Nq, Nz и количество дефектов, считая что длина участка соответствует базовой длине.

Таблица 4.1 Результаты расчета глубинных параметров рельефности ТП УКПГ 8-1-ОГПЗ

N⁰		<u>I ВТИ</u>					II ВТИ				
уч	Na, мм	Nq, мм	Nz, мм	n	SI	Na, мм	Nq, мм	Nz, мм	n	SII	
1	0,3681	0,4308	1,0801	20	0,5662	0,3200	0,3841	0,823	15	0,5800	
4	0,3659	0,5773	1,3421	27	0,7064	0,2681	0,3446	1,0824	38	0,7400	
7	0,3600	0,5933	1,4425	30	0,7481	0,2621	0,3531	1,1698	42	0,7700	
12	0,2444	0,2995	0,8100	24	0,4491	0,2235	0,2818	0,8485	34	0,4943	
15	0,2646	0,3098	0,8580	23	0,4520	0,3242	0,4752	1,6447	53	0,8572	

Таблицы 4.1 и 4.2 содержат значения параметров рельефности для некоторых участков ТП УКПГ 8-1 и 8-2-ОГПЗ соответственно.

Таблица 4.2 - Результаты расчета глубинных параметров рельефности ТП УКПГ 8-2-ОГПЗ

No		І ВТИ					ІІ ВТИ				
уч	Na, мм	Nq, мм	Nz, мм	n	S I	Na, мм	Nq, мм	Nz, мм	n	SII	
3	0,4106	0,5643	1,1230	15	0,4074	0,2249	0,2599	0,7696	51	0,47	
4	0,2666	0,2925	0,6853	18	0,2637	0,2493	0,3133	1,1001	57	0,4177	
8	0,4263	0,5761	1,2970	17	0,4304	0,2536	0,3547	1,2414	71	0,4983	
11	0,3532	0,4638	1,8454	107	0,7214	0,2655	0,3619	1,5245	117	0,77	
14	0,2984	0,4261	1,2875	31	0,4120	0,1861	0,2544	0,8687	73	0,4215	

Для оценки коррозионного состояния участков проводим нормализацию, т.е. определяем базовые значения для Na, Nq, Nz (мм) и количества дефектов n (шт), выбрав максимальные значения из двух соответствующих ВТИ.

На третьем этапе на основе аддитивной модели рассчитываем КС S(L) каждого парного участка для первой и второй внутритрубной инспекции по длине ТП и интенсивность коррозионного процесса v(L) относительно второй инспекции, графики которых приведены на рисунках 4.1 и 4.2.



Рисунок 4.1 – Идентификационные кривые коррозионного состояния и скорости коррозии по длине ТП УКПГ 8-1-ОГПЗ



Рисунок 4.2 - Идентификационные кривые коррозионного состояния и интенсивности коррозии по длине ТП УКПГ 8-2-ОГПЗ

Коэффициенты весомости аддитивной модели выбраны по результатам статистических исследований вырезок ТП.

В соответствии с физической картиной процесса коррозии, для адекватного описания кинетики КС между диагностированиями выбираем временную модель экспоненциального вида:

$$S(t) = A \exp(-B/t), \qquad (4.1)$$

где А и В – коэффициенты;

t – время, год.

Для аддитивной модели (4.1) запишется в виде:

$$A_1 \exp(-B_1 / t) = \alpha_1 \ \overline{N}_Z + \alpha_2 \ \overline{n}_{_{\mathcal{I}}} + \alpha_3 \ \overline{N}_a + \alpha_4 \ \overline{N}_q. \tag{4.2}$$

Для мультипликативной модели:

$$A_2 \exp(-B_2 / t) = \overline{N} z^{\alpha 1} * \overline{n}_{\alpha}^{\alpha 2} * \overline{N} a^{\alpha 3} * \overline{N} q^{\alpha 4}.$$
(4.3)

Для комбинированной модели:

A₃ exp(-B₃ / t) =
$$\xi (\alpha_1 \ \bar{N}z + \alpha_2 \ \bar{n}_{\mu}) + (1-\xi) Na^{\alpha_3} * \bar{N}q^{\alpha_4}$$
. (4.4)

Коэффициент ξ в выражении 4.4 равен отношению количества агрегированных параметров, взятых в аддитивную модель, к общему количеству использованных параметров и в данном конкретном случае равен 0.5.

Таблица 4.3 - Значения параметров идентификационных моделей

тп	Параметры модели								
111	A_1	B_1	A_2	B_2	A_3	B ₃			
8-1	0,658	0,132	0,659	0,155	0,669	0,059			
8-2	0,550	0,122	0,554	0,194	0,606	0,030			

Уравнение связи скорости коррозии и КС запишется в виде решения обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка:

$$V(S) = V_u (1 - \exp(-S/C)), \qquad (4.5)$$

где V_u – предельная интенсивность коррозионного процесса участков ТП при последнем диагностировании, год⁻¹;

С – постоянная, характеризующая кривизну графика v(S).

Решение задачи интерполяции методом наименьших квадратов относительно КС ТП позволило подобрать параметры модели (4.5), приведенные во фрагменте таблицы 4.3 для ТП УКПГ 8-1 и 8-2-ОГПЗ с максимальной погрешностью не превышающей 5,6%, считая узлами известные точки v(S) (таблица 4.1 и 4.2), рассчитанные в компьютерной интегрированной системе Eureka. График зависимости скорости коррозии от КС $V_{MOZ}(S)$ для разных ТП приведен на рисунках 4.3 и 4.4.



Рисунок 4.3 – Экспериментальная модель связи V(S) ТП УКПГ 8-10ГПЗ



Рисунок 4.4 – Экспериментальная модель связи V(S) ТП УКПГ 8-2 ОГПЗ

Таким образом, состояние коррозионной поверхности по длине трубопровода для различных участков показывает, что если при проведении первой ВТД величина коррозионного состояния принадлежала диапазону (0,294 - 0,678), то при проведении второй, диапазон существенно сдвинулся вверх, в сторону больших S и составил (0,529 – 0,814).

№ ТП	V _u , год ⁻¹	С, год	Погрешность, %
8-1	0,0966	1,2	3,29
8-2	0,1071	1,4	3,19

Таблица 4.4 – Сводные значения параметров модели v(S)

Интенсивность коррозионного процесса по дистанции - величина переменная (рисунки 4.1 и 4.2), что соответствует физическим представлениям о протекании коррозионного процесса в ТП. Поведение v(L) соответствует изменению состояния коррозионной поверхности S(L) (рисунки 4.1 и 4.2) на каждом участке, а зависимость скорости коррозии от состояния коррозионной поверхности V(S) (рисунки 4.3 и 4.4) носит экспоненциальный характер и описывается дифференциальным уравнением первого порядка. Если значение КС участка ТП меньше 0,68, то интенсивность коррозионного процесса на этом участке имеет максимальную величину и КС является определяющим ее фактором, а если значение КС участка ТП больше 0,68, то скорость коррозии стабилизируется и коррозионный процесс переходит в установившийся режим, потому что в соответствии с уравнением энергетического баланса (2.19), на процесс коррозии преобладающее влияние оказывают тормозящие факторы.

4.2 Модели прогнозирования коррозионного состояния ТП

Для оценки остаточного ресурса, обеспечения надежной работы, совершенствования системы технического обслуживания и ремонта ТП, решается задача прогнозирования КС и скорости коррозии ТП во времени. Процесс коррозии, в соответствии с физическими представлениями о его кинетике, является затухающим во времени, т.е. при t => оо S(t) стремится к установившемуся значению S_u. Следовательно, в первом приближении в качестве математической модели прогноза КС ТП может служить обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$T\frac{dS(t)}{dt} + S(t) = S_u x(t),$$
(4.6)

где Т-постоянная времени, год; S_u – установившееся значение КС участка; t - время прогнозирования с момента последней инспекции, год; x(t) – входное возмущение.

В этом случае коррозионная реакция металла, подвергающегося скачкообразному изменению внешнего воздействия, определяется экспоненциальной зависимостью первого порядка:

$$S(t) = S_u (1 - e^{-\frac{t}{T}}).$$
(4.7)

В реальных условиях, после изменения внешнего воздействия, переходный процесс в системе начинается спустя некоторое время, которое является временем чистого запаздывания т. Поэтому в используемой модели необходимо учесть время т:

$$T\frac{dS(t+\tau)}{dt} + S(t+\tau) = S_u x(t).$$
(4.8)

Соответствующей структурной моделью коррозионного процесса являются два динамических звена, соединенных последовательно: звено чистого запаздывания и инерционное звено первого порядка.

Решение уравнения имеет вид:

$$S(t) = S_u (1 - e^{\frac{t - \tau}{T}}).$$
(4.9)

Из графической интерпретации этой зависимости можно определить основные параметры коррозионного процесса. Так, время запаздывания – интервал времени от момента скачкообразного изменения внешнего воздействия до начала увеличения величины КС поверхности участка ТП. Постоянная времени Т равна интервалу времени между точкой начала изменения экспоненты и точкой пересечения асимптоты и касательной, проведенной к точке начала изменения экспоненты. S_u – установившееся значение КС, является асимптотой к графику, т.е. предельным значением S при t $\rightarrow \infty$.

Задачу прогнозирования решаем в два этапа: на первом находим параметры S_u и T; а на втором этапе определяем прогнозные значения S(t).

4.3 Нахождение параметров моделей прогнозирования и результаты

Для определения параметров модели составим систему из двух уравнений (4.9), подставляя в правую часть первого уравнения рассчитанное КС участка ТП при первой ВТИ, а в качестве времени t_1 в левой часть подставляя время первого обследования. Для второго уравнения вместо $S(t_2)$ и t_2 подставим КС участка и время второй ВТИ соответственно. Значения параметра т для каждого участка взято по экспериментально-эксплуатационным данным. Определим дополнительные ограничения, исходя из физического смысла искомых параметров.

В общем виде система с ограничениями запишется в виде:

$$\begin{cases} S_{1}(t_{1}) = S_{u}(1 - e^{\frac{-t_{1} - t}{T}}); \\ S_{2}(t_{2}) = S_{u}(1 - e^{\frac{-t_{2} - \tau}{T}}); \\ \end{cases}$$
(4.10)

$S_u > 0; T > 1; t > \tau.$

Для поиска значений параметров модели, приведенных в таблице 4.5, используем Excel из программного семейства Microsoft Office /20/, а также интегрированную систему автоматизации научно-технических расчетов Eureka.

Таблица 4.5 – Параметры модели прогнозирования первого порядка с запаздыванием для УКПГ 8-2-ОГПЗ

№ уч	КС І ВТИ	КС II ВТИ	Установившийся режим S _u	Постоянная времени Т, год	Время запаздыва- ния т, год	Интенсивность коррозионного процесса V, год ⁻¹
3	0,6982	0,9652	0,9732	1,4501	0,8318	0,0534
4	0,2637	0,4177	0,4473	2,7644	1,4526	0,0308
8	0,4572	0,6549	0,6672	1,8225	1,1024	0,0395
11	0,5151	0,5207	0,5212	1,8491	1,1270	0,0011
13	0,3312	0,6759	0,7010	1,8691	0,1952	0,0689

Чтобы получить прогнозные значения КС на каждом участке, подставим найденные параметры в уравнение модели (4.9). Результаты расчета для некоторых участков ТП приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты прогнозирования коррозионного состояния для УКПГ 8-2-ОГПЗ

N⁰	Коррозионное состояние по-	Время прогнозирования t, год							
уч	S(t)	1	2	3	4	5	6	7	
1	$S_1(t)$	0,9681	0,9701	0,9712	0,9721	0,9727	0,9728	0,9729	
4	$S_4(t)$	0,4253	0,4322	0,4362	0,4392	0,4422	0,4431	0,4441	
7	S ₇ (t)	0,4512	0,4531	0,4554	0,4563	0,4564	0,4566	0,4568	
12	$S_{12}(t)$	0,5207	0,5208	0,5209	0,5209	0,5209	0,5209	0,5209	
13	$S_{13}(t)$	0,6851	0,6912	0,6948	0,6970	0,6982	0,6989	0,6993	

Для уточнения прогноза используем модель кинетики коррозионного процесса в виде обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка с учетом известного времени запаздывания:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 S(t+\tau)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{dS(t+\tau)}{dt} + S(t+\tau) = S_u x(t), \qquad (4.11)$$

где Т₁, Т₂, год – постоянные времени, год;

S_u – установившееся коррозионное состояние;

t – время прогнозирования, год.

Структурной моделью уравнения (4.11) являются два динамических звена, соединенных последовательно: колебательное звено и звено чистого запаздывания.

Решение данного уравнения имеет вид:

$$S(t) = S_u \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{\frac{t - \tau}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{\frac{t - \tau}{T_2}}\right).$$
(4.12)

Т.к. получены два уравнения с тремя неизвестными, определены дополнительные ограничения, исходя из физического смысла искомых параметров. В общем виде система с ограничениями запишется в виде:

$$\begin{cases}
S_{1}(t_{1}) = Su(1 - \frac{T_{1}}{T_{1} - T_{2}}e^{-\frac{t_{1} - \tau}{T_{1}}} + \frac{T_{2}}{T_{1} - T_{2}}e^{-\frac{t_{1} - \tau}{T_{2}}});\\
S_{2}(t_{2}) = S_{u}(1 - \frac{T_{1}}{T_{1} - T_{2}}e^{-\frac{t_{2} - \tau}{T_{1}}} + \frac{T_{2}}{T_{1} - T_{2}}e^{-\frac{t_{2} - \tau}{T_{2}}});\\
(T_{1} + T_{2})^{2} > 4T_{1}T_{2};\\
S_{u} > 0; T_{1} > 1; T_{2} > 1; t > \tau.
\end{cases}$$
(4.13)

Значения параметров модели, приведенные в таблице 4.7, рассчитаны с помощью тех же программных систем.

Таблица 4.7 – Параметры модели прогнозирования второго порядка с запаздыванием для УКПГ 8-2-ОГПЗ

№ уча- стка	Установившийся режим, S _u	Постоянная	Время запазды- вания	
UTRU		T_1	T ₂	τ, год
3	0,4726	0,6371	0,7700	1,4441
4	0,4197	1,0362	0,8844	1,0377
8	0,5007	0,8036	0,6441	1,4939
10	0,6127	0,5357	0,5188	1,1890
11	0,7721	0,6334	0,5709	1,6518

Для расчета прогнозных значений КС на каждом участке, найденные параметры подставляем в уравнение модели (4.12). Результаты расчета прогнозных КС для некоторых участков приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты прогнозирования коррозионного состояния УКПГ 8-2-ОГПЗ

№ уча- стка	Коррозионное состояние по-		E	Время про	гнозирова	ания t, год	Į	
	S(t)	1	2	3	4	5	6	7
3	S ₃ (t)	0,4714	0,4721	0,4724	0,4725	0,4725	0,4725	0,4726
4	S4(t)	0,4185	0,4192	0,4195	0,4196	0,4196	0,4196	0,4196
8	$S_8(t)$	0,4995	0,5002	0,5004	0,5006	0,5006	0,5006	0,5007
11	$S_{11}(t)$	0,7712	0,7717	0,7719	0,7720	0,7720	0,7720	0,7721
13	$S_{13}(t)$	0,6779	0,6791	0,6796	0,6798	0,6799	0,6799	0,6799

На основе полученных данных рассчитываем прогнозную интенсивность коррозионного процесса по моделям I и II порядков (рисунки 4.5 и 4.6), учитывая что $v_i(t)=dS_i(t)/dt$.



Рисунок 4.5 – Временные зависимости прогнозной скорости коррозии по модели первого порядка для ТП УКПГ 8-1-ОГПЗ



Рисунок 4.6 – Временные зависимости прогнозной скорости коррозии по модели второго порядка для ТП УКПГ 8-2-ОГПЗ

4.4 Решение задачи прогнозирования на основе уравнения энергетического баланса

Другой оценкой состояния ТП является коэффициент коррозионной устойчивости металла ТП, определяемый из уравнения энергетического баланса (2.19). Считая, что Su фактически является предельным КС в установившемся режиме, в первом приближении можно заменить правую часть уравнения (2.19) разностью Su и рассчитанного прогнозного значения S(t):

$$A_{i}(t)\frac{dS_{i}(t)}{dt} = S_{u_{i}} - S_{npen}(t).$$
(4.14)

Для определения коэффициента коррозионной устойчивости металла выразим его из (5.11), считая, что скорость изменения КС рассчитывается как разность между і – тым прогнозным значением S_{іпрогн}(t) и КС, полученным на основании данных последней инспекции для каждого участка:

$$A_{i}(t) = \frac{S_{u_{i}} - S_{npz\mu}(t)}{v(t)},$$
(4.15)

где v(t), год⁻¹ – прогнозная интенсивность коррозионного процесса;

Sui и S_{пргн}(t) – значения КС, найденные по моделям I и II порядков.

t, год – время прогнозирования, отсчитываемое с момента последней инспекции.

Изменение коэффициента коррозионной устойчивости металла во времени для моделей I и II порядка представлены на рисунках 4.7, 4.8.



Рисунок 4.7 – Временные зависимости коэффициента коррозионной устойчивости металла по модели первого порядка для УКПГ 8-2-ОГПЗ



Рисунок 4.8 – Временные зависимости коэффициента коррозионной устойчивости металла по модели второго порядка УКПГ 8-2-ОГПЗ

Таким образом, оценка коррозионного состояния трубопроводов произведена с помощью созданных агрегированных моделей на основе параметров рельефности Na, Nq, Nz и количества дефектов. Построенные зависимости коррозионного состояния по длине трубопроводов, позволяют выявить потенциально-опасные участки. Зависимость скорости коррозии от коррозионного состояния, описывается моделью обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка.

Решение задачи прогнозирования путем сопоставления данных о коррозионном состоянии трубопроводов на основе двух инспекций, проведенных через определенный временной интервал, позволило установить, что прогнозная интенсивность коррозионного процесса описывается моделями апериодических звеньев 1 и 2 порядков с запаздыванием. На основе предложенного уравнения энергетического баланса в дифференциальной форме рассчитан коэффициент коррозионной устойчивости металла трубопроводов.

5 Автоматизированная идентификация КС ТП

5.1 Структура программного комплекса

Поскольку разрабатываемая программа представляет собой систему автоматизированного моделирования (САМ), необходимо с учетом специфики этих систем в целом, а также специфики ее области применения, выделить следующие основные требования:

- наличие пользовательского интерфейса, поддерживающего надежное и удобное взаимодействие инженера, занимающегося эксплуатацией и ремонтом ТП (в дальнейшем – просто пользователя), с программой;
- обеспечение хранения и надежного использования данных;
- наличие механизма логического вывода;

Необходимо также отметить, что успешная реализация вышеперечисленных требований возможна лишь при грамотной организации структур данных, используемых программой.

В соответствии с блочно-иерархическим подходом при проектировании сложных объектов их описание разбивается на иерархические уровни и аспекты. На высшем иерархическом уровне отражаются только общие черты и особенности проектируемых систем. На следующих уровнях степень детализации возрастает, причем система рассматривается не в целом, а отдельными блоками. При разработке структуры САМ использовался принцип нисходящего проектирования, то есть система разрабатывалась в условиях, когда ее элементы еще не были определены, сведения об элементах и их свойствах носили предположительный характер.

Автоматизированная система решает следующие основные задачи:

- преобразование данных;
- определение рационального числа участков разбиения трубопроводов;
- определение параметров рельефности;
- нормализация параметров рельефности и числа дефектов;
- определение состояния трубопровода на каждом участке;
- определение скорости коррозии на каждом участке;
- прогнозирование состояния трубопровода;
- оценка точности расчетов и вычисление критериев сближения моделей;

- вывод информации.

Идентификацию и прогнозирование КС ТП, проводимые с помощью предложенного программного комплекса (ПК) называем автоматизированными. Область применения ПК– обработка и анализ базы данных, полученной внутритрубными инспекциями с помощью снарядов-дефектоскопов типа «Ультраскан». Структурная схема разработанного ПК, в соответствии с рисунком 5.1, состоит из трех основных модулей: идентификации (1) и прогно-

зирования (2) КС ТП, расчета эффективности идентификации с учетом КС ТП (3).



Рисунок 5.1 – Структурная схема программного комплекса

На следующем иерархическом уровне первый модуль подразделяется на блоки: чтение и преобразование исходных данных во внутренний формат базы; выявления оптимальной длины участков разбиения ТП, с достаточным количеством дефектов для анализа состояния КС ТП; выбора оптимальной

модели дефектов по глубине, площади и объему; вычисления параметров рельефности и их нормализация с помощью базовых значений; выбора пользователем аддитивной, мультипликативной и комбинированной модели КС ТП; моделирования текущего КС и скорости коррозии ТП. По желанию пользователя можно перейти к решению задачи прогнозирования или оценки эффективности функционирования ТП. Модуль 2 подразделяется на блоки: выбора модели прогнозирования на основе решений дифференциальных уравнений первого и второго порядка с запаздыванием; определения параметров выбранной модели; прогнозирования кинетики КС, скорости коррозии и коэффициента коррозионной устойчивости металла по длине участка П; анализа прогнозного КС ПП по уравнению связи скорости коррозии и КС. Блоки, входящие в третий модуль, решают задачу моделирования надежности функционирования, стоимости эксплуатации, поставки газа, эффективности идентификации и функционирования ТП. Для корреляционного и спектрального анализа поверхности ТП разработан аналитический блок. Блок вывода результатов в графической и табличной форме является общим для всего комплекса.

I	FEATU	URES LIS	SΤ	Thu	Nov 15	12:22:	54 1990		
USSR, Gas 28" Pig Run: 2GPR MOLDAU Vers. 2.28 Odofac: 0.9974557 Offset: 0.00 m Line: II UGP 8 Medium: water (1450 m/s)									
Picture: all groups Editor:									
File	Distance [m]	Comment	Wt [mm]	Dpth [mm]	Lngth [mm]	Dgr [°]	Sgrp	Туре	Doc
1330	530,26	metal loss adj. Weld width: 90 mm	21,7	1,4	16	350	1	ext	
1369	630,65	Inclusions	22,3		1720		2,3	mid	
1454	674,57	metal loss width: 18 mm	22,3	2,6	154	301	4	ext	
1819	849,99	dent, width:27mm	21,5		217	91	2	int	

Таблица 5.1 – Файл системы "Ультраскан".

Исходными данными блока чтения и преобразования данных являются текстовые файлы, соответствующие таблице 5.1, полученные на этапе внутритрубной ультразвуковой дефектоскопии от системы "Ультраскан". Назна-

чение блока – преобразование исходного текстового файла во внутренний формат базы данных программы.

Для исследования состояния ТП программный комплекс из исходного текстового файла выделяет следующую информацию:

- длина дефектов выбирается из поля "Lngt" исходного текстового файла;

- ширина дефектов выбирается из поля "Comment" исходного текстового файла;

- глубина дефектов выбирается из поля "Dpth" исходного текстового файла;

- дистанция, т.е. удаление данного дефекта от базовой точки выбирается из поля "Distance" исходного текстового файла;

Для выполнения поставленной задачи разработан алгоритм преобразования текстового файла в формат БД программы.

LENGTH	WIDTH	DEPTH	DISTANCE
"Длина"	"Ширина"	"Глубина"	"Расстояние"
36,000	22,500	1,400	22,860
67,000	18,100	1,600	113,030
58,000	18,300	1,400	308,980
23,000	18,100	2,800	498,250
222,000	18,100	1,800	649,160
18,000	17,700	1,800	681,010
9,000	17,700	2,200	681,070
28,000	17,700	1,400	683,260
15,000	17,900	2,000	781,570
17,000	17,900	2,000	803,860

Таблица 5.2 - Пример БД программы

Для автоматизации идентификации КС ТП создан программный комплекс (ПК), работающий по следующей методике: на основе задаваемых пользователем данных о количестве дефектов и длине участка ТП, ПК определяет минимальную длину участка, на которой встречается достаточное количество дефектов и количество дефектов каждого участка разбиения. Если выявляется несоответствие подсчитанного числа дефектов заданному, то происходит увеличение минимальной длины участка на 100 м и повторное проведение анализа до тех пор, пока не достигнуто значение длины, при котором каждый интервал будет содержать не меньше заданного пользователем количества дефектов.

Исходными данными в блоке выбора рациональной модели представления дефектов являются: базы данных, содержащие информацию о дефектах по всей протяженности ТП; количество дефектов, присутствующих на участке. Блок включает процедуры определения параметров рельефности по глубине, площади и объему дефектов; сравнение значений этих параметров для выбора рациональной модели представления дефектов.

Для определения параметров рельефности по глубине дефектов используются значения глубин дефектов на каждом участке, которые содержатся в поле "DEPTH" ("ГЛУБИНА") базы данных, а также число дефектов на данном участке. Параметры рельефности по площади дефектов определяются с учетом дополнительных значений длины дефектов на каждом участке, содержащиеся в поле "LENGTH" ("ДЛИНА"). Для определения параметров рельефности по объему дефектов в дополнение используются значения ширины дефектов на каждом участке, содержащиеся в поле "WIDTH" ("ШИРИНА").

Каждый из представленных методов дает различную точность оценки коррозионного состояния ТП, так как характеризует его по разному количеству параметров. В качестве параметров процедурам также передаются номер участка ТП; номер таблицы, хранящей данные за тот или иной год исследования. Рациональная модель представления дефектов из трех возможных выявляется при обращении к аналитическому блоку, содержащему набор критериев.

В блоке вычисления параметров рельефности и их нормализации в качестве исходных данных используются параметры рельефности каждого участка и число дефектов на участке, значения которых приводятся к относительному виду с помощью формул:

$$\overline{N}a = \frac{Na_i}{Na_{\delta a3}}; \quad \overline{N}q = \frac{Nq_i}{Nq_{\delta a3}}; \quad \overline{N}z = \frac{Nz_i}{Nz_{\delta a3}}; \quad \overline{n}_{\partial} = \frac{n_i}{n_{\delta a3}}.$$
 (5.1)

В качестве базовых Na_{баз}, Nq_{баз}, Nz_{баз}, n_{баз} выбираются наибольшие значения параметров рельефности и числа дефектов по всей протяженности ТП.

Исходными данными блока идентификации коррозионного состояния ТП на каждом участке являются относительные значения параметров рельефности и общего числа дефектов на каждом участке ТП и весовые коэффициенты. Задача блока заключается в определении КС каждого участка ТП по аддитивной, мультипликативной и комбинированной моделям. Рациональная идентификационная модель выявляется с помощью критериев аналитического блока. В блоке определения скорости коррозии ТП на каждом участке для анализа используется значение КС ТП за исследуемый период и количество лет между внутритрубными исследованиями.

Минимальной конфигурацией аппаратных средств является IBMсовместимый персональный компьютер, оснащенный:

-процессором Intel 80486 или совместимый с ним (например AMD, Cyrix);

- с объемом ОЗУ не менее 8 мегабайт;

- объемом свободной памяти на жестком диске не менее 50 мегабайт;

- графический дисплей с разрешающей способностью 640 на 480 точек отображающий одновременно 256 цветов.

Программа работает под операционными системами Windows 9x; Windows NT 4.0; Windows 2000.

Для разработки программного продукта использовались следующие программные средства:

- среда программирования Delphi 3.0;

- язык программирования Object Pascal 7.0;

- библиотека доступа к БД – SuccessWare Database Engine (SDE) фирмы Luxent;

- библиотека визуальных компонентов RX Library 2.75.

Связь программы с другими программами осуществляется посредством вывода получаемых данных в текстовый файл, который может быть импортирован в другие программные средства (например, полученные данные легко переводятся в табличную форму программой "Excel").

Перед началом работы с программой необходимо выполнить ее инсталляцию (установку) на жесткий магнитный диск с дискет. Инсталляция производится в следующей последовательности:

- запуск файла "install.exe";

- выбор каталога, куда будет установлен программный продукт;
- подтверждение установки в выбранный каталог.

5.2 Эксплуатационно-технологическое описание программного комплекса

5.2.1 Описание меню

Согласно функциональному назначению классы задач, решаемых системой, следующие:

- автоматизация расчетов;
- анализ полученных данных;
- идентификация КС трубопроводов;
- прогнозирование на основе выбранной модели.

При работе программы накладываются следующие функциональные ограничения:

- импорт исходных данных только из файлов системы "Ультраскан";
- возможность одновременной работы с данными за два периода исследования трубопроводов;
- не учитываются некоторые параметры дефектов;
- для анализа используются дефекты, соответствующие типу "ext" ("наружный") и "int" ("внутренний").

Связь программы с другими программами осуществляется посредством вывода получаемых данных в текстовый файл, который может быть импор-

тирован в другие программные средства (например, полученные данные легко переводятся в табличную форму программой "Excel").

После запуска программы на экране появится основное окно системы. Окно содержит следующие элементы управления:

- заголовок окна служащий для отображения загруженного в данный момент проекта;
- меню программы, в котором перечислены основные действия, производимые программой;
- панель управления, содержащая кнопки быстрого вызова действий, перечисленных в меню программы;
- рабочая область программы, куда выводятся сообщения и результаты работы блоков;

- строка состояния, где отображается режим работы программы.

Меню программы представлено следующими пунктами (рисунок 5.2):

"Файл" – содержит список основных действий:

"Новый проект" – создает новый проект;

"Открыть проект" – открытие существующего проекта;

"Сохранить данные" – сохранение полученных результатов;

"Просмотр" – предварительный просмотр полученных данных;

"Печать" – вывод данных на принтер;

"Выход" – завершение работы с программой.

"Действия" – содержит список режимов работы:

"Работа с БД" – осуществляет доступ и редактирование баз данных программы, задает параметры разбиения ТП;

"Параметры рельефности" – расчет параметров рельефности;

"Состояние участков" – определение коррозионного состояния трубопровода;

"Интенсивность коррозионного процесса" – определение скорости коррозии трубопровода;

"Прогноз состояния" – нахождение коррозионного состояния трубопровода в заданный момент времени.

5.2.2 Описание эксплуатации программного продукта

Начало работы с программой подразумевает выбор одного из двух вариантов действий:

- создания нового проекта;

| | | 1 | | 1 |

 | |

 |

 | | |
 | | | | | | |
 | | F
 | | | | | | |
|---------------|----------------------|--|---|--
--
--
---|--
--
--

--
--
--	---	---	--	--	---
--
---|--|--|---|---|---|
| | | ик V(L) Бло <mark>і 4</mark> | | Расстояние | 27653,34

 | 27683,4 | 27683,94

 | 27685,45

 | 27686 | 27686,25 | 27745,16
 | 27755,5 | 28050,53 | 28053,88 | 28055,13 | 28056,07 | 28057,73 | 28068,89
 | 28131,3 | 28280,37
 | | | | | | |
| | | оррозии Графі | | Глубина | 3,2

 | 2,8 | 2,4

 | 2,2

 | 1,6 | 1,4 | 1,6
 | 1,8 | 1,8 | 1,6 | 1,4 | 1,6 | 1,8 | 1,4
 | 2 | 1,6
 | | | ן ר
ר | Далее 📫 | | |
| | • | корость ко | | E H | 18,9

 | 19,1 | 19,1

 | 18,9

 | 18,9 | 18,9 | 18,7
 | 19,1 | 19,1 | 19,3 | 19,1 | 19,1 | 19,1 | 19,1
 | 19,1 | 19,5
 | | | 1 | о данные | | |
| | | ти Состояние участков ТП График S(L) С | 1995 год | Открыть проект 🛛 🛛 | poekt N*1

 | poek⊤ №2 | роект 1930-90гг.

 | DOEXT 90.90

 | | | 2
 | We | ew2 | oject3 | | | |
 | | < OK X OTMEHA
 | | : 1)410 2)593 [4] | нция: 30,958,00 м | ов : 1)13 2)14 Изменить | | |
| | | и рельефност | | Глубь 🐹 |

 | |

 |

 | | | -
-
 | ц
Ч | и
И | P. | | | |
 | |
 | | о дефектов | нная дистан | о интервалс | | ные данные |
| Помощь | | е Параметрь | | Ширина | 18,1

 | 18,1 | 17,9

 | 18,7

 | 18,5 | 18,5 | 18,3
 | 18,5 | 18,9 | 18,5 | 19,1 | 19,1 | 19,1 | 18,9
 | 18,9 | 19,3
 | | Количеств | Исследова | Количество | | KT Nº1] MCKOD |
| Файл Действия | | Исходные данны | 1990 год | Длина | 67

 | 25 | 15

 | 09

 | 80 | 23 | 257
 | 50 | 13 | 106 | 33 | 70 | 206 | 68
 | 40 | 43
 | | | | | | CAM KC TR : [Npoet |
| | Файл Действия Помощь | Файл Действия Помощь | Файл Действия Помощь Параметры Параметры Состояние участков ТП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло(4) | Файл Действия Помощь В В В В В В В В В В В В В В В В В В В | Файл Действия Домошь Параметры Мане Параметры Мане Параметры Параметры Голо 4 Параметры Голо 4 Гараметры Голо 4 Голо 4 Параметры Голо 4 Гараисточности Состояние участков III Горость коррозии График V(L) Голо Параметры Голо Гара График V(L) <td< td=""><td>Файл Действия Помощь Image: Section Participation Image: Section Participation Image: Section Participation Image: Part Participation Image: Part Part Part Part Part Part Part Part</td><td>Файл Действия Домоць Поратизация Поранизация Поранизация <td< td=""><td>Файл Действия Полюшь Параметры Параметры Null Null<td>Файл Действия Полоша Параметры Малание Малание Малание Малание Параметры Малание Параметры Малание Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры</td><td>Файл Действия Полоша Сайл Действия Долоша Долога Долога</td><td>Файл Действия Полош. Скодлима Дараметры М. М</td><td>Deformation Deformation Image: Section (Section) Image: Section</td><td>Файл Действия Донош. Параметры рельефности Остояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры релерик S(L) Параметры Parametric Par</td><td>Deformation Deformation Image: Section Sec</td><td>Deformation Deformation Performation Corronance Encode Encode</td><td>Deficient Diversion Image: construct state Image: construct state</td><td>Data Defense Detense Image: Section 1 Image: Section 1</td><td>Data Jactran Jonua Laboration Jonua Laboration Jactran Jactra Laboration Jactran Jactra Laboration Jactra Jage Contraction Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra <thjactra< th=""> Jactra Jactra</thjactra<></td><td>Diame Diame Image: Section intervention interventintervention intervention interventi</td><td>Data Littorian <thlittorian< th=""> <thlittorian< th=""> <thlittor< td=""><td>Definition Definition Image: state stat</td><td>Def Def De la De De</td><td>Data Decreta Decreta</td><td>Diama Linera Line Linera <thlinera< th=""></thlinera<></td><td>Diametrical Local Local Percental Local <thlocal< th=""> Local L</thlocal<></td><td>Diametrical Local <thlocal< th=""> Local <thlocal< th=""></thlocal<></thlocal<></td></thlittor<></thlittorian<></thlittorian<></td></td></td<></td></td<> | Файл Действия Помощь Image: Section Participation Image: Section Participation Image: Section Participation Image: Part Participation Image: Part Part Part Part Part Part Part Part | Файл Действия Домоць Поратизация Поранизация Поранизация <td< td=""><td>Файл Действия Полюшь Параметры Параметры Null Null<td>Файл Действия Полоша Параметры Малание Малание Малание Малание Параметры Малание Параметры Малание Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры</td><td>Файл Действия Полоша Сайл Действия Долоша Долога Долога</td><td>Файл Действия Полош. Скодлима Дараметры М. М</td><td>Deformation Deformation Image: Section (Section) Image: Section</td><td>Файл Действия Донош. Параметры рельефности Остояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры релерик S(L) Параметры Parametric Par</td><td>Deformation Deformation Image: Section Sec</td><td>Deformation Deformation Performation Corronance Encode Encode</td><td>Deficient Diversion Image: construct state Image: construct state</td><td>Data Defense Detense Image: Section 1 Image: Section 1</td><td>Data Jactran Jonua Laboration Jonua Laboration Jactran Jactra Laboration Jactran Jactra Laboration Jactra Jage Contraction Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra <thjactra< th=""> Jactra Jactra</thjactra<></td><td>Diame Diame Image: Section intervention interventintervention intervention interventi</td><td>Data Littorian <thlittorian< th=""> <thlittorian< th=""> <thlittor< td=""><td>Definition Definition Image: state stat</td><td>Def Def De la De De</td><td>Data Decreta Decreta</td><td>Diama Linera Line Linera <thlinera< th=""></thlinera<></td><td>Diametrical Local Local Percental Local <thlocal< th=""> Local L</thlocal<></td><td>Diametrical Local <thlocal< th=""> Local <thlocal< th=""></thlocal<></thlocal<></td></thlittor<></thlittorian<></thlittorian<></td></td></td<> | Файл Действия Полюшь Параметры Параметры Null Null <td>Файл Действия Полоша Параметры Малание Малание Малание Малание Параметры Малание Параметры Малание Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры</td> <td>Файл Действия Полоша Сайл Действия Долоша Долога Долога</td> <td>Файл Действия Полош. Скодлима Дараметры М. М</td> <td>Deformation Deformation Image: Section (Section) Image: Section</td> <td>Файл Действия Донош. Параметры рельефности Остояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры релерик S(L) Параметры Parametric Par</td> <td>Deformation Deformation Image: Section Sec</td> <td>Deformation Deformation Performation Corronance Encode Encode</td> <td>Deficient Diversion Image: construct state Image: construct state</td> <td>Data Defense Detense Image: Section 1 Image: Section 1</td> <td>Data Jactran Jonua Laboration Jonua Laboration Jactran Jactra Laboration Jactran Jactra Laboration Jactra Jage Contraction Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra <thjactra< th=""> Jactra Jactra</thjactra<></td> <td>Diame Diame Image: Section intervention interventintervention intervention interventi</td> <td>Data Littorian <thlittorian< th=""> <thlittorian< th=""> <thlittor< td=""><td>Definition Definition Image: state stat</td><td>Def Def De la De De</td><td>Data Decreta Decreta</td><td>Diama Linera Line Linera <thlinera< th=""></thlinera<></td><td>Diametrical Local Local Percental Local <thlocal< th=""> Local L</thlocal<></td><td>Diametrical Local <thlocal< th=""> Local <thlocal< th=""></thlocal<></thlocal<></td></thlittor<></thlittorian<></thlittorian<></td> | Файл Действия Полоша Параметры Малание Малание Малание Малание Параметры Малание Параметры Малание Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры Параметры | Файл Действия Полоша Сайл Действия Долоша Долога Долога | Файл Действия Полош. Скодлима Дараметры М. М | Deformation Deformation Image: Section (Section) Image: Section | Файл Действия Донош. Параметры рельефности Остояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Казонные Лараметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Сотояние участков ГП График S(L) Скорость коррозии График V(L) Бло[4]. Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры рельефности Параметры релерик S(L) Параметры Parametric Par | Deformation Deformation Image: Section Sec | Deformation Deformation Performation Corronance Encode Encode | Deficient Diversion Image: construct state Image: construct state | Data Defense Detense Image: Section 1 Image: Section 1 | Data Jactran Jonua Laboration Jonua Laboration Jactran Jactra Laboration Jactran Jactra Laboration Jactra Jage Contraction Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra Jactra <thjactra< th=""> Jactra Jactra</thjactra<> | Diame Diame Image: Section intervention interventintervention intervention interventi | Data Littorian Littorian <thlittorian< th=""> <thlittorian< th=""> <thlittor< td=""><td>Definition Definition Image: state stat</td><td>Def Def De la De De</td><td>Data Decreta Decreta</td><td>Diama Linera Line Linera <thlinera< th=""></thlinera<></td><td>Diametrical Local Local Percental Local <thlocal< th=""> Local L</thlocal<></td><td>Diametrical Local <thlocal< th=""> Local <thlocal< th=""></thlocal<></thlocal<></td></thlittor<></thlittorian<></thlittorian<> | Definition Definition Image: state stat | Def Def De la De | Data Decreta Decreta | Diama Linera Line Linera <thlinera< th=""></thlinera<> | Diametrical Local Local Percental Local Local <thlocal< th=""> Local L</thlocal<> | Diametrical Local Local <thlocal< th=""> Local <thlocal< th=""></thlocal<></thlocal<> |

Рисунок 5.2 – Окно "Исходные данные с открытием проекта"

- открытия существующего проекта.

В случае выбора первого варианта на экране появится окно. В строке "Название проекта" требуется ввести название нового проекта, которое в дальнейшем будет использоваться при открытии проектов. Также требуется задать имя исходного файла данных за первый и второй периоды исследования. В результате этих действий будет создан файл описания проекта, содержащий начальные данные о режимах работы и параметрах системы.

При выборе пункта "Открыть проект" на экране появится окно, в котором представлен список проектов, доступных для редактирования и работы. После создания нового проекта или открытия существующего, выполняются следующие действия:

- разбиение всей дистанции трубопровода на интервалы, с возможностью задания оператором минимального числа дефектов на интервале и минимальной длины интервала;
- определение параметров рельефности, с возможностью выбора метода расчета (рисунок 5.3);
- определение коррозионного состояния трубопровода, с возможностью выбора модели расчета;
- нахождение скорости коррозии трубопровода;
- прогнозирование состояния ТП в задаваемый оператором момент времени (рисунок 5.4);
- критериальный анализ (рисунок 5.5).

Получаемые в процессе работы данные представляются в различных видах и могут быть выведены на принтер, в файл, представлены в табличном виде и в виде графиков.

В процессе работы программы могут возникать ситуации, приводящие к сбою в программе, в таких случаях на экран выводятся сообщения оператору с описанием ошибки. Кроме того, могут выводиться сообщения, предупреждающие оператора о намерении программы выполнить какие-либо действия. Например: сообщение, возникающее в случае ввода некорректного названия файла: «Файл не найден»; сообщение, возникающее при создании нового проекта, в момент преобразования данных из текстового файла в БД: «Наступил момент преобразования данных»; сообщение, возникающее в случае отсутствия на диске созданных проектов: «Не найдены описания проектов».

🔏 cam kc ti	1 : [Npoek	r N*1]						×
Файл Дейсті	зия Помощь							
			Ma St	<u></u>				
Исходные да	энные Пар	аметры рельефности	Состояние учас	тков ТП Граф	ик S(L) Ckopc	ость коррозии	График V(L) Бло	1
1990 roj	F			1995 roz				
٩¢	Na	PN	Nz	N¤	Na	ΡN	Nz	
F	0,36364	0,42524	1,08000	F	0,31250	0,37749	0,80000	
2	0,41522	0,52718	1,04710	2	0,24628	0,34450	0,88000	
m	0,38800	0,58771	1,19200	<u></u>	0,33130	0,60341	1,04000	
4	0,36522	0,60433	1,32000	4	0,27336	0,35353	1,08000	
5	0,26272	0,33433	0,92000	D	0,29751	0,36269	1,16000	
9	0,33953	0,56328	2,20	9	0,26191	0,35294	1,36000	
7	0,24167	0,29580	0,80000	7	0,29778	0,37884	1,20000	
8	0,20567	0,25441	0,68000	0	0,22176	0,29999	0,96000	
б	0,31249	0,50905	1,24000	<u></u>	0,31866	0,38898	1,24000	
10	0,45057	0,51704	1,44000	10	0,34238	0,45315	1,40000	
11	0,17569	0,25481	0,80000	11	0,19145	0,21964	0,64000	
				_				
		Параметры рель	ефности			📰 Расчитать		
		Na - параметр неравнол Nq - параметр неровнос Nz - параметр грубости	ли ли	Выбрать метод	🛉 <u>H</u> asan	Далее 📫		
	-1	Metodal	Dacueta					
		© Nor	лубине дефектов					
		0 10	иощади дефектов					
		0 100	бъему дефектов					
CAM KC TT : [(Проект Nº1]	Параметры рельефнос	ал					

Рисунок 5.3 – Окно "Параметры рельефности"





5.2.3 Описание основных программных модулей

Программный комплекс состоит из следующих основных модулей:

- модуль "Dp_main" основной модуль программы, реализующий интерфейс с пользователем, и содержащий основные расчетные процедуры. Название формы модуля – "Frm_main". Модуль содержит следующие основные компоненты:
 - "MainMenu1" основное меню программы, представленное пунктами:
 - "Файл" осуществляет доступ к процедурам работы с файлами;
 - "Действия" предлагает выбор действий, направленных на работу с данными, анализом коррозионного состояния;
 - "Помощь" доступ к справочной системе программы.
- "PrintDialog1" диалог выбора принтера, настройки параметров печати;
- "SaveDialog1" диалог задания имени файла, вызываемый при записи файла данных на жесткий диск;
- "FormStorage1" компонент, сохраняющий положение главного окна программы на рабочем столе Windows;
- "DataSource1" служит связующим элементом между компонентами доступа к данным и компонентами отображения данных;
- "Table1" средство доступа к файлам базы данных;
- "Apollo1" осуществляет замену функций Borland DataBase Endgine по работе с базами данных своими функциями, выполняющими аналогичные действия;
- "sb3" панель, содержащая кнопки быстрого вызова действий;
- "dbg1" использует табличную форму для визуализации и изменения данных, содержащихся в текущем наборе данных;
- "Chart1" визуальный компонент для представления числовых данных в графической форме, служит для вывода распределения коррозионного состояния участков по дистанции трубопровода.
- модуль "Dp_new" модуль, используемый при создании нового проекта. Название формы модуля "Frm_new". Модуль содержит следующие компоненты:
 - "Edit1", "Edit2", "Edit3" компоненты, используемые для ввода однострочного текста, соответственно для задания названия проекта, имени первого и второго исходного текстового файла системы "Ультраскан";
 - "OpenDialog1" осуществляет просмотр диска и представляет его содержимое в удобной форме для поиска файла;
 - "BitBtn2" кнопка закрытия окна, осуществляет передачу кода "mrOk" в главный модуль программы;



Рисунок 5.5 – Окно "Критериальный анализ"

"BitBtn3" – кнопка закрытия окна, осуществляет передачу кода "mrCancel" в главный модуль программы.

- модуль "Dp_open" служит для представления списка файлов проектов, существующих на жестком диске. Название формы модуля "Frm_open". Модуль содержит следующие компоненты:
 - "StringGrid1" представляет список найденных файлов описаний проектов в табличной форме;
 - "BitBtn1" кнопка закрытия окна, осуществляет передачу кода "mrOk" в главный модуль программы;
 - "BitBtn2" кнопка закрытия окна, осуществляет передачу кода "mrCancel" в главный модуль программы;
- модуль "Dp_coeff" используется при изменении параметров коэффициентов α₁, α₂, α₃. Название формы модуля "Frm_coeff". Модуль содержит следующие компоненты:
 - "Me1", "Me2", "Me3", "Me4" компоненты для ввода коэффициентов, отличительная особенность, которых в том, что пользователю предоставляется возможность вводить только цифровые значения и знак разделитель дробного числа (точка или запятая), что дает возможность избежать проверки корректности вводимых значений;
 - "BitBtn1" кнопка закрытия окна, осуществляет передачу кода "mrOk" в главный модуль программы.
- модуль "About" –служит для отображения информации об авторах программы и ее назначении. Название формы модуля "about_frm". Модуль содержит следующие компоненты:
 - "st" компонент типа "TLMDScrollText", осуществляющий прокрутку текста на экране формы;
 - "LMD3DShapeLabelButton1" кнопка закрытия окна, осуществляет передачу кода "mrOk" в главный модуль программы.

5.3 Результаты автоматизированной идентификации

Результаты идентификации коррозионного состояния трубопроводов, полученные с помощью программного комплекса, отображаются в графической: идентификационные кривые КС S(L) и скорости коррозии v(L) по длине ТП, или табличной формах. На рисунке 5.2 приведены идентификационные кривые для одного из ТП (УКПГ-8-1-ОГПЗ), полученные при следующих условиях: длина участка разбиения 2100 м; количество участков – 13; минимальное количество дефектов на участок – 15; плоскостное представление дефектов; совмещены значения КС, полученные на основе I и II ВТИ; коэффициенты весомости агрегированных параметров для идентификационных моделей КС определены методом ранжирования (рисунок 5.6). Из таблицы 5.3 видно, что диапазон изменения КС с ростом количества дефектов на участке уменьшается. При переходе от глубинного к плоскостному представлению дефектов, отношение их диапазонов изменения КС в первую ВТИ составило - 1.382, а во вторую – 1.836, а при переходе от глубинного к объемному представлению дефектов, это отношение составило - 1.130 и 1.574 соответственно.

		І ВТД			II ВТД					
Представление де-	Min	Max KC,	ΔS	Min KC,	Max KC,	ΔS				
фектов	КС,	Smax		Smin	Smax					
	Smin									
10 дефектов на участок										
Глубинное, S _h	0,353	0,820	0,467	0,352	0,801	0,449				
Плоскостное, S _s	0,088	0,741	0,653	0,119	0,871	0,752				
Объемное, S _v	0,144	0,740	0,596	0,167	0,873	0,706				
15 дефектов на участок										
Глубинное, S _h	0,344	0,631	0,287	0,388	0,760	0,372				
Плоскостное, S _s	0,131	0,706	0,572	0,108	0,826	0,718				
Объемное, S _v	0,167	0,724	0,557	0,199	0,843	0,644				
20 дефектов на участок										
Глубинное, S _h	0,344	0,893	0,549	0,388	0,760	0,372				
Плоскостное, S _s	0,131	0,706	0,572	0,111	0,826	0,715				
Объемное, S _v	0,167	0,724	0,557	0,199	0,724	0,525				

Таблица 5.3 – Результаты идентификации ТП УКПГ-8-1-ОГПЗ

Аналогичная картина наблюдается и для идентификационных кривых второго рода (рисунок 5.7, таблица 5.4).

Таким образом, изменения КС на каждом участке ТП неравномерны, а сами значения КС лежат в диапазоне (0.48; 0.97) с 95% доверительной вероятностью, что соответствует реальной картине коррозионного процесса ТП, эксплуатирующихся более 20 лет.

Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью глубинной, плоскостной и объемной модели представления дефектов показывает, что характер поведения кривых сохраняется, но отношение разностей значений КС между I и II ВТИ, подсчитанное на основе плоскостного представления дефектов существенно больше, чем на основе глубинного. Так, например, для рассматриваемого случая это отношение в среднем составляет 1.717. Следовательно, агрегированные модели чувствительны как к количеству дефектов на участке разбиения, так и к их представлению.





Значения скорости		Представление дефекто	В						
коррозии, v(L)	Глубинное, v _h (L)	Плоскостное, v _S (L)	Объемное, v _V (L)						
10 дефектов на участок									
v(L) _{min}	0,001	0,003	0,004						
v(L) _{max}	0,059	0,093	0,087						
$\Delta v(L)$	0,058	0,090	0,083						
15 дефектов на участок									
v(L) _{min}	0,001	0,005	0,001						
v(L) _{max}	0,053	0,091	0,085						
$\Delta v(L)$	0,052	0,086	0,084						
20 дефектов на участок									
v(L) _{min}	v(L) _{min} 0,001 0,004 0,003								
v(L) _{max}	0,049	0,090	0,082						
$\Delta v(L)$	0,048	0,086	0,079						

Таблица 5.4 – Результаты идентификации V(L) ТП УКПГ-8-1-ОГПЗ

5.4 Модель автоматизированной системы управления надежностью трубопроводных систем

Для выработки управляющих воздействий и дальнейшего совершенствования технического обслуживания и ремонта составлена структурная схема автоматизированной системы управления (АСУ) надежностью трубопроводов (рисунок 5.4), включающая следующие подсистемы:

1) ТО и Р – система, планирующая, контролирующая и производящая техническое обслуживание и ремонт. На выходе этой системы имеем вектор управляющих воздействий **u**, включающий вид, объем, сроки и периодичность ремонтов;

2) Кинетика КС трубопровода - объект управления системы. На входы поступает управляющий случайный вектор возмущений \mathbf{f} , вызванный изменением агрессивности среды и транспортируемого газа. На выходе имеем вектор КС - \mathbf{x} .

3) Снаряд – дефектоскоп типа «Ультраскан» фирмы Pipetronics – ультразвуковой прибор, регистрирующий локальные дефекты, в виде сканов. На выходе имеем вектор **у**_р, содержащий информацию в виде сканов.

4) База данных локальных дефектов - содержит распознанные дефекты и их параметры, включающие длину, ширину, высоту и месторасположение по длине трубопровода. Имеет два выходных вектора: y_{a1} - дефекты внутри стенки типа водородных и сероводородных растрескиваний и расслоений; y_{a2} - дефекты внешней и внутренней поверхности трубопровода типа язв, питтингов и общей коррозии.




Снаряд-дефектоскоп и база данных локальных дефектов образуют модуль внутритрубной инспекции – современный метод диагностики, активно используемый на ОГКМ.

Блоки 5, 6 являются одноуровневыми, но решают разные задачи.

5) Блок локальной диагностики – определяет потенциально-опасные дефекты, требующие вырезки. На его вход подается y_{d1} . Работы в этом на правлении также ведутся в лаборатории «Надежность» ОГУ.

6) Программный комплекс содержит три основных модуля: идентификацию, прогнозирование и эффективность функционирования потенциальноопасных участков. На его вход подается $y_{д2}$. В основу ПК положена методика и результаты, полученные в ходе данного исследования.

На выходе блоков 5, 6 имеем вектора $\mathbf{x}_{\kappa 1}$ и $\mathbf{x}_{\kappa 2}$ с соответствующей информацией о потенциально-опасных дефектах и участках. В сумматорах 7, 8 эта информация сопоставляется с эталонными значениями, полученными из нормативно-технической документации - ψ_1 , ψ_2 и на выходе снимаются вектора ϕ_1 , ϕ_2 , позволяющие корректировать организацию, содержание и стратегию обслуживания и ремонта в блоке ТО и Р.

Построенная система замкнута, т.к. блоки 3, 4, 5 образуют канал отрицательной обратной связи, поэтому является более совершенной, чем существующая. Предлагаемая АСУ надежностью ТП работает не в режиме реального времени, а периодически после проведения ВТИ и при необходимости идентификации и прогнозирования КС ТП.



Рисунок 5.8 – Структурная схема автоматизированной системы управления надёжностью

6 Эффективность автоматизированной идентификации коррозионного состояния типового участка трубопроводов

6.1 Структурная модель надежности типового участка ТП

ТП в течение всего срока службы испытывают значительные внутренние напряжения, близкие к нормативным характеристикам прочности металла. Поэтому даже незначительные отклонения действительных условий от принятых в расчетах приводят систему в состояние предельного напряжения. Следовательно, использование моделей, учитывающих реальное КС на протяжении всего ТП, повышает устойчивость системы.

П представляет собой сложную техническую систему с восстанавливаемыми и резервированными элементами /7, 8, 9/. Работоспособность ТП, как любой сложной технической системы (СТС), зависит от совокупности параметров, однако более информативным является комплексный показатель – эффективность /7, 8/, позволяющий оценить степень приспособленности СТС. Расчет эффективности идентификации трубопроводов затруднен в связи со сложностью объекта и отсутствием методик учета коррозионного состояния поверхности на основе агрегированных параметров. В общем случае эффективность W(t) рассчитывается как алгебраическая сумма произведений коэффициентов весомости \overline{X}_i , имеющие наибольшее влияние:

$$W(t) = \sum_{i} a_i \overline{X_i} .$$
(6.1)

Разделим наиболее важные характеристики эффективности на три группы: характеристики надежности, стоимости эксплуатации и объемной подачи газа. Для каждой из этих составляющих рассмотрим две модели: без учета и с учетом коррозионного состояния соединительных трубопроводов. Определяющим фактором эффективности трубопроводного транспорта является надежность функционирования ТП – объективное свойство сохранять потенциальную способность выполнения заданных функций в заданных условиях в течение требуемого промежутка времени и определяется системой объективных критериев, обуславливающих нормативную работоспособность в режиме активного воздействия эксплуатационных факторов и факторов окружающей среды. Для обеспечения надежности функционирования трубопроводов в эксплуатационный период нужны мероприятия, обеспечивающие предупреждение аварий, а не ликвидацию их последствий. Одно из основных направлений исследований – прогнозирование надежности функционирования ТП по результатам статистического контроля.

ТП представляет собой СТС соединенных элементов: труб, трубных деталей, арматуры. Для определения надежности СТС декомпозируется на

отдельные элементы /8, 9/, в отношении которых определяются количественные характеристики надежности. Декомпозиция проводится так, чтобы отдельные элементы представляли собой конструктивно самостоятельные устройства, независимые в отношении отказов от других частей. Поскольку соединительные трубопроводы ОГКМ состоят из идентичных 3-х километровых участков с крановыми узлами и внутритрубная инспекция не контролирует состояние кранового оборудования, оценим надежность такого участка без учета крана.

Структурная модель типового участка трубопровода после его декомпозиции, в соответствии с рисунком 6.1, представляет собой совокупность элементов трубопровода /17/: 300 шт. стенок, 300 шт. продольных швов, через каждые 10 метров 200 шт. кольцевых швов и через каждые 30 метров 100 шт. монтажных швов, соединенных последовательно.



Рисунок 6.1 – Структурная модель типового участка трубопровода

Согласно данным фирм «Мартин» и «Джин» (США) для элементов ТП принимаем следующие удельные интенсивности отказов:

$$\lambda_{c} \!\!=\!\!2,\!2^{*}10^{^{-10}} \, \mathbf{u}^{^{-1}}\!; \, \lambda_{n} \!\!=\!\!5,\!95^{*}10^{^{-10}} \, \mathbf{u}^{^{-1}}\!; \, \lambda_{\kappa} \!\!=\!\!1,\!17^{*}10^{^{-8}} \, \mathbf{u}^{^{-1}}\!; \, \lambda_{M} \!\!=\!\!2,\!92^{*}10^{^{-8}} \, \mathbf{u}^{^{-1}}\!,$$

где λ_c , λ_n , λ_k , λ_M - удельная интенсивность отказа стенки, продольного, кольцевого и монтажного шва соответственно.

6.2 Надежность функционирования

Найдем вероятности безотказной работы для стенки трубы, продольных, кольцевых и монтажных швов:

$$P(t) = e^{-\lambda \int_{0}^{t} \lambda(t)dt}.$$
 (6.2)

Жизненный путь любой СТС проходит через три участка /7, 8/:

I - участок приработки, где 0< t< t₁;

II - участок нормальной эксплуатации $t_1 < t < t_2$;

III - участок износа $t_2 < t$.

Рассмотрим второй участок, т.к. используемая система идентификации завязана с системой техобслуживания и ремонта. На этом участке можно пренебречь незначительным возрастанием интенсивности отказов λ и счи-

тать ее константой. Тогда, используя исходные значения λ и выражение (6.2), найдем вероятности безотказной работы типового участка ТП:

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$
 (6.3)

Анализ опыта эксплуатации ТП ОГКМ с учетом статистики отказов показал, что частные характеристики эффективности целесообразно рассматривать в интервале (10000; 60000) часов, с шагом, кратным 10000 ч. Верхняя граница диапазона выбрана исходя из периодичности проведения внутритрубной инспекции.

В соответствии с проведенными расчетами, результирующий коэффициент коррозионной опасности в зависимости от концентрации агрессивных примесей, содержащихся в транспортируемом газе, скорости потока газа, типа применяемого ингибитора или покрытия и климатических условий находится как произведение соответствующих коэффициентов и равен 0.752 для условий эксплуатации ТП ОГКМ. Поскольку ТП – восстанавливаемая система, то помимо найденных показателей безотказности, учитываем комплексные показатели, обусловленные восстановлением работоспособности системы. Таким показателем является коэффициент готовности, характеризующий два свойства поверхности - надежность и ремонтопригодность:

$$K_{z} = \frac{1}{1 + k_{ov} + k_{oxc}},\tag{6.4}$$

где k_{ow} – коэффициент, характеризующий среднее время ожидания ремонта в очереди;

 $k_{\rm oy}$ – коэффициент, характеризующий среднее время отыскания и устранения одного отказа.

Более полным комплексным показателем надежности системы, учитывающим также простои за счет профилактических работ является коэффициент использования:

$$K_{z} = \frac{1}{1 + k_{oy} + k_{oxc} + k_{npo\phi}},$$
(6.5)

где k_{проф} - коэффициент, характеризующий среднее время профилактики, приходящееся на отказ за рассматриваемый промежуток времени.

Оценим восстанавливаемость системы длительного использования, каким является ТП, как функцию времени и параметров, характеризующих процесс восстановления. Рассматривая операцию восстановления как случайный процесс, найдем вероятность восстановления типового участка трубопровода - вероятность того, что случайное время восстановления _ не превышает заданного времени Т_{в.} Считая, что закон распределения времени восстановления – экспоненциальный, получим:

$$V(\tau) = P\{\tau \le Te\} = 1 - \exp(-\mu\tau)$$
(6.6)

где T_в – среднее время восстановления системы, затрачиваемое на обслуживание и устранение одного отказа. По данным отдела главного механика ОГКМ среднее время восстановления 40 ч.

Перейдем к более полной характеристике надежности системы длительного использования, учитывающей начальное состояние системы, ее безотказность и восстанавливаемость – вероятности нормального функционирования Pf(t), которую находят из формулы для полной вероятности сложного события. Предполагая поток отказов простейшим и пренебрегая членами высших порядков малости /7/, получим:

$$P_{t}(t) = P(0)P(t) + [1 - P(0)] V(\tau)P(t - \phi_{t})$$
(6.7)

где P₀ – вероятность исправного состояния системы в начальный момент времени;

1-Р₀ – вероятность неисправного состояния системы к начальному моменту времени ее применения;

P(t) – вероятность безотказной работы;

 $V(\tau)$ - вероятность восстановления системы за время $\tau = T_{\rm B}$;

 $P(t - \tau)$ – вероятность безотказной работы системы за оставшееся время t - τ , безусловно, достаточное для ее восстановления.

Вторая модель надежности ТП с учетом коррозионного состояния поверхности получается путем умножения первой на функцию F(S), где S - агрегированная модель, описывающая коррозионное состояние поверхности:

$$P_{f_s}(t) = F(S) \left[P(0) \exp(-(\Lambda cm + \Lambda np + \Lambda \kappa o\pi + \Lambda moh)t) + (1 - P(0)) V(\tau) P(t - \phi) \right]. (6.8)$$

По результатам расчета $P_{f}(t)$ и $P_{fS}(t)$ построен график (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 - Временные зависимости надежности функционирования типового участка ТП

6.3 Стоимость эксплуатации

Следующую частную характеристику - стоимость эксплуатации типового участка ТП выразим в долях общей стоимости:

$$C(t) = \frac{1}{C_0} [C_{\kappa_3}(t) + C_{pem}(t) e^{t/T_{cc}} + C_{3n}(t) + C_{np}(t)] t, \qquad (6.9)$$

где $C_{\kappa_3}(t)$ – годовые расходы на защиту от коррозии, тыс. рублей;

 $C_{\mbox{\scriptsize pem}}(t)$ – годовая стоимость ремонта, тыс. рублей;

С_{зп}(t) – зарплата обслуживающего персонала в год, тыс. рублей;

C_{пр}(t) – прочие годовые расходы на эксплуатацию, тыс. рублей;

С₀ - проектная стоимость типового участка;

Т_{норм} – нормированный срок службы ТП, равный 20 годам.

Вторую модель стоимости эксплуатации типового участка ТП с учетом коррозионного состояния поверхности получим следующим образом:

$$C_{S}(t) = \frac{F(S)}{C_{0}} \left[(C_{\kappa_{3}}(t) + C_{pem}(t) \phi(t) + C_{3\pi}(t) + C_{\pi p}(t))t + C_{bJ} + C_{\Pi K} \right],$$
(6.10)

где С_{БД}(t) – стоимость формирования базы данных по результатам внутритрубной дефектоскопии, тыс. руб.;

 $C_{\pi\kappa}$ – стоимость программного комплекса, тыс. руб.

Последние две стоимости разбиты равномерно по годам. По результатам расчета C(t) и $C_{S}(t)$, приведенным в таблице 6.1, построен график (рисунок 6.3).

t*10 ⁴	С _{к3} (t), тыс.руб.		С _{рем} (t),тыс.руб.		С _{зп} (t), тыс.руб.		С _{пр} (t),тыс.руб.		$C = 10^5 mv^5$	$C_{2}(t)$	
с	1	2	1	2	1	2	1	2	С _у , 10 руб	1	2
1	7990,87	3843,47	5168,56	2485,99	1369,863	658,881	4140,85	1991,68	0,2	0,031	0,051
2	15981,7	8670,91	10337,1	5608,41	2739,726	1486,44	8281,69	4493,24	0,2	0,062	0,067
3	23972,6	13539,2	15505,7	8757,26	4109,589	2321,00	12422,5	7015,97	0,2	0,093	0,084
4	31963,5	18418,3	20674,2	11913,1	5479,452	3157,42	16563,4	9544,32	0,2	0,124	0,102
5	39954,3	23301,9	25842,8	15071,8	6849,315	3994,61	20704,2	12075	0,2	0,155	0,121
6	47945,2	28187,7	31011,3	18232	8219,178	4832,17	24845,1	14606,8	0,2	0,186	0,140

Таблица 6.1 – Сводные результаты характеристик стоимости эксплуатации



Рисунок 6.3 - Временные зависимости стоимости эксплуатации типового участка ТП

6.4 Поставка газа

Третью по важности частную характеристику эффективности идентификации – величину поставки газа, транспортируемого по типовому участку трубопровода, определим, как:

$$R(t) = \frac{v \pi r^2}{F_{HOM} v_{HOM} T_{HOM}} t,$$
 (6.11)

где

r – радиус трубы, m^2 ; F_{HOM} – номинальная площадь сечения TП, m^2 ; V_{HOM} – номинальная скорость газа, м/ч; T_{HOM} - срок службы TП, ч.

Модель поставки газа, учитывающую изменение коррозионного состояния поверхности ТП запишем:

$$R_{S}(t) = F(S) \frac{F v}{F_{HOM} v_{HOM} T_{HOM}} t.$$
(6.12)

где F – площадь сечения TП, м²;

v – скорость газа, м/ч;

По результатам расчета R(t) и R_S(t) построен график (рисунок 6.4).



Рисунок 6.4 – Временные зависимости поставки газа типового участка ТП

6.5 Оценка эффективности функционирования ТП с автоматизированной идентификацией

С учетом найденных значений частных характеристик оценим эффективность функционирования типового участка ТП с идентификацией состояния по формуле (6.1):

$$W(t) = \alpha_1 \cdot P_{\phi}(t) - \alpha_2 \cdot C_{\vartheta}(t) + \alpha_3 \cdot R(t), \qquad (6.13)$$

где $\alpha_1 = 0.47$, $\alpha_2 = 0.35$, $\alpha_3 = 0.18$ – коэффициенты влияния частных характеристик на эффективность функционирования ТП, значения которых определены экспертной оценкой, проведенной среди специалистов газовой промышленности.

Результаты расчета эффективности ТП для двух вариантов моделей приведены на рисунке 6.5.



Рисунок 6.5 - Временные зависимости эффективности функционирования типового участка ТП без и с идентификацией КС

Анализ полученных результатов позволил заключить, что для обеих моделей вероятность нормального функционирования $P_f(t)$ участка ТП ОГКМ в исследуемом интервале времени монотонно убывает, поставка газа растет, а относительная стоимость эксплуатации ТП увеличивается. Учет

коррозионного состояния ТП повысил надежность функционирования ТП в среднем на 24,5 %, поставка газа возросла на 16,5 %, а эффективность идентификации увеличилась на 10,2 %.



Рисунок 6.6 - Зависимость эффективности функционирования от коррозионного состояния поверхности ТП

Исходя из зависимости W(S), приведенной на рисунке 6.6, сделан вывод, что если коррозионное состояние поверхности S принадлежит диапазону (0,48; 0,54), то оно не оказывает существенного влияния на W(S), с ухудшением коррозионного состояния поверхности S с 0,54 до 0,8 эффективность нелинейно убывает с 0,41 до 0,35.

7 Обеспечение надежности в процессе эксплуатации сложных технических систем

7.1 Надежность функционирования и ее показатели

Определение и контроль надежности функционирования сложных технических систем (СТС) в процессе их эксплуатации – одна из основных задач, для успешного решения которой необходимы современные количественные методы исследования надежности, разработка наиболее рациональных программ совершенствования находящихся в эксплуатации СТС и обеспечения требуемой надежности. Практическое применение таких методов обеспечивает: уточнение оптимальной по критерию надежности СТС в течение заданного срока эксплуатации; разработку и практическую реализацию программы поддержания надежности в процессе эксплуатации СТС; разрапроведения ботку обоснование необходимости И ремонтновосстановительных работ для повышения надежности СТС; разработку технических требований к надежности создаваемых и модернизируемых СТС с заданным уровнем надежности технических требований.

Кроме использованного в учебном пособии подхода имеются и другие подходы к определению надежности СТС. В первом принимают за неисправное состояние системы установленную заранее долю потери эффективности (например, 25 %). При этом под вероятностью безотказной работы СТС понимают вероятность того, что обобщенный показатель W эффективности СТС в течение заданного времени не ниже его критического значения Wkp

$$\mathbf{R} = \mathbf{P}\{\mathbf{W} \ge \mathbf{W}_{\mathsf{KP}}\},\tag{7.1}$$

где R — обобщенный показатель надежности СТС.

Значение W_{кр} - определяют из условия совместной работы рассматриваемой системы с другими системами.

Во втором подходе вместо характеристики надежности СТС рассматривают абсолютное или относительное снижение ее эффективности вследствие недостаточной надежности элементов системы

$$\Delta W = W_0 - W_H; \qquad (7.2)$$

$$\Delta W_{oT} = (W_o - W_H) / W_o, \qquad (7.3)$$

где W_o — значение обобщенного показателя эффективности СТС при абсолютной надежности ее элементов;

W_н - значение обобщенного показателя эффективности СТС при реальной надежности ее элементов.

Показатели ΔW и ΔW_{ot} характеризуют надежность функционирования СТС в целом.

При третьем подходе рассматривают не надежность СТС, а их эффективность. При этом обобщенный показатель эффективности W определяют как функцию характеристик надежности их элементов:

$$W = \varphi(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n), \tag{7.4}$$

где λ_i — интенсивность отказов i-го элемента системы (i == 1, 2,..., n).

Часто под надежностью функционирования СТС понимают свойство сохранять эффективность при появлении отказов ее элементов на уровне эффективности идеальной системы, элементы которой абсолютно надежные. В качестве показателя надежности СТС при этом принимают величину

$$\Delta R_{o} = R_{o} - R^{*}; \qquad (7.5)$$

$$\Delta \mathbf{R}_{\mathrm{o}} = |\mathbf{R}_{\mathrm{o}} - \mathbf{R}^*|, \tag{7.6}$$

где R_o - показатель эффективности системы, вычисляемый в предположении, что все ее элементы абсолютно надежны (интенсивности отказов элементов равны нулю); R^* - показатель эффективности системы, вычисленный в предположении, что интенсивности отказов элементов соответствуют их расчетным значениям.

Показатели ΔR_o , определяемые по формулам (7.5) и (7.6), не характеризуют надежности СТС с точки зрения выполнения системой заданных функций и решения стоящих перед ней задач, а также соответствия фактической (реальной) эффективности системы идеальной эффективности, поскольку показатель эффективности R^{*} учитывает не фактическую реальную интенсивность отказов элементов, а расчетную. При этом под надежностью функционирования СТС понимают степень соответствия показателей ее эффективности при заданных характеристиках надежности элементов значениям эгих показателей при абсолютно надежных элементах системы.

Рассмотренные подходы к определению надежности СТС как свойства соответствия показателей реальной и идеальной (потенциальной) эффективностей системы не являются универсальными, поскольку они не отражают непосредственно надежности выполнения системой заданных функций и решения поставленных задач. Кроме того, определение обобщенного показателя эффективности системы как функции интенсивности отказов элементов, рассчитываемой обычными методами оценки надежности, не обеспечивает необходимой точности и достоверности. Дело в том, что современные системы характеризуются не только большим числом элементов, но и сложностью структуры. В связи с этим для СТС классические методы теории надежности не применимы. Как известно, классические методы определения показателей

надежности изделий по известным показателям надежности элементов основаны на гипотезе полной независимости отказов элементов, которая не подтверждается в полной мере практикой.

Отказы отдельных элементов или значительные изменения их рабочих параметров могут привести не к полному выходу системы из строя, а лишь некоторому ухудшению качества ее функционирования. Таким образом, необходимы принципиально новые методы определения, контроля и обеспечения надежности в процессе эксплуатации, учитывающие специфику структуры и поведения СТС. При определении надежности СТС важны не причинноследственное описание и объяснение поведения отдельных элементов, а обобщающая картина перехода системы из одного состояния в другое, т.е. оценка качества функционирования СТС. Критерием (обобщенным показателем) надежности СТС служит некоторая мера, количественно выражающая степень объективной возможности выполнения ими заданных функций (решения поставленных задач) в данных (реальных) условиях эксплуатации.

Во многих случаях достаточной количественной мерой надежности СТС является вероятность выполнения поставленных задач, т.е. вероятность получения некоторого полезного эффекта. В общем случае эффект функционирования СТС — размерная величина У, но ее можно представить в безразмерном виде (Yo), пронормировав Y относительно максимального полезного эффекта Уmax:

$$Y_{o} = Y/Y_{max}.$$
(7.7)

Обобщенный показатель надежности R системы в этом случае представляют как вероятность получения полезного эффекта Y_o в некоторых пределах [Yo', Yo"], т.е.

$$R = P(Y_{o} < Y < Y_{o}).$$
(7.8)

Надежность СТС зависит от условий, в которых они функционируют. Так, система, надежная в одних условиях и при решении одних задач, может быть ненадежной в других условиях при решении новых задач. Следовательно, надежность СТС необходимо оценивать не по внутренним ее свойствам (надежности элементов), а по вероятности выполнения конкретных задач, т.е. по эффекту ее функционирования. При таком подходе к оценке надежности СТС сравнивают надежность систем, различных по структуре или принципу действия, если они предназначены для выполнения одних и тех же задач. Это дает возможно, изыскивать наиболее рациональные методы организации эксплуатации СТС, например, появляется возможность формировать возможности предприятия по критерию надежности достижения производственной цели.

Можно выделить два аспекта надежности – внутренний и внешний. Внутренний аспект касается надежности элементов системы, качества структуры и в конечном итоге степени объективной возможности безотказного функционирования при решении стоящих перед ней задач в заданных условиях эксплуатации (при идеальной работе людей и идеальной организации эксплуатации). Внешний аспект надежности отражает взаимодействие СТС с внешней средой — реальные возможности достижения системой цели в реальных условиях эксплуатации, реальным обслуживающим персоналом при реальной организации функционирования систем.

Различают потенциальную и реальную надежность СТС. Потенциальная надежность — это надежность, которая может быть достигнута при идеальной системе эксплуатации, обеспечивающей строгое соблюдение правил эксплуатации, своевременное обнаружение и устранение появляющихся в процессе эксплуатации отказов элементов. Реальная надежность СТС — это надежность достижения цели в реальных условиях эксплуатации при реальном обслуживающем персонале и реальной организации их функционирования.

Выделяют также техническую надежность — надежность, сформированную в процессе изготовления системы в соответствии с проектом и требованиями нормативно-технической документации. На всех стадиях формирования надежности СТС (проектирования, изготовления и эксплуатации) главными факторами ее обеспечения являются техника, люди и организация эксплуатации /2, 3/. В связи с этим возникает необходимость обеспечения надежности не только системы, но и людей. Как показывает практика эксплуатации, надежность СТС существенно зависит от надежности операторов, специалистов по эксплуатации. Известно, например, что по вине операторов происходит 20-50 % отказов роторно-конвейерных линий. Оператор оказывает двоякое влияние на надежность СТС: вследствие его ошибок надежность снижается, а в результате компенсации последствий отказов элементов системы путем оперативного устранения отказов и восстановления работоспособности системы - повышается.

Проведение идентификации, введение в конструкцию СТС устройств и средств диагностирования, облегчающих обнаружение и устранение отказов элементов приводит к значительному повышению надежности системы. На надежность функционирования существенно влияют организация эксплуатации и качество технического обслуживания и ремонта (ТО и Р). Обеспечение надежности СТС с учетом деятельности людей связано с определенными трудностями описания и воспроизведения их психофизических особенностей (адаптации к условиям, индивидуальности, усталости и отдыха, чувствительности к эмоциональным воздействиям и др.). Кроме того, работа операторов СТС зависит от факторов эргономики, технической эстетики и экологии. В обеспечении надежности важен человеческий фактор. Следует отметить, что надежность непосредственно связана с безопасностью их функционирования. Безопасность СТС обеспечивается не только при нормальном функционировании, но и при отказах элементов. Резервированием можно защитить систему от пожаров, аварий и другие последствий отказов, опасных для жизни людей и окружающей среды. Безопасность многих современных СТС является решающим критерием их надежности. Все другие факторы надежности имеют смысл только в том случае, когда обеспечена практически абсолютная безопасность. Это положение касается всех типов современных СТС, включая гибкие производственные системы и межотраслевые научно-технические комплексы /2, 3/. Классическая теория надежности не учитывает влияние надежности человеческого фактора. При нормировании и оценке надежности предполагают, что люди действуют безупречно и что надежность СТС полностью определяется надежностью технических объектов. Особенно важна роль человеческого фактора на этапе эксплуатации СТС. Квалификация операторов, управляющих СТС, а также специалистов, осуществляющих техническое руководство работами, строгое соблюдение режимов и правил эксплуатации, установленных документацией – это те факторы, которые формируют надежность системы эксплуатации и реальную надежность СТС.

Надежность СТС проявляется в результативности (производительности) системы и экономичности достижения конечных результатов функционирования, поэтому в соответствии с требованиями системного подхода при определении, контроле и обеспечении надежности необходимо учитывать ее место и роль в системе других определяющих характеристик эффективности. Поскольку эффективность действующих и создаваемых СТС определяется, главным образом, их надежностью, производительностью и экономичностью эксплуатации, модель формирования конечного результата можно записать в виде

$$A = A \cdot H \cdot \Pi \cdot \Im, \tag{7.9}$$

где А - событие, обозначающее получение некоторого конечного результата функционирования СТС;

Н- событие, обозначающее надежность системы;

П - событие, обозначающее производительность технической системы;

Э - событие, обозначающее экономичность СТС.

Поскольку любая СТС относится к классу случайных систем, события А, Н, П, Э случайны и поэтому характеристикой каждой из них является вероятность.

На основании модели (7.9) можно получить

$$P(A) = P(A/H \cdot \Pi \cdot \Im) P(H) P(\Pi/H) P(\Im/H \cdot \Pi), \qquad (7.10)$$

где P(A) — полная вероятность получения конечного результата функционирования системы (обобщенный показатель эффективности системы); Р(А/Н·П·Э) — условная вероятность получения конечного результата функционирования системы, определяемая при условии, что система надежная, производительная и экономичная;

Р(H) - вероятность безотказного функционирования системы с заданными показателями качества (обобщенный показатель надежности системы);

Р(П/Н) — условная вероятность обеспечения производительности системы при условии, что система безотказно функционирует с заданными показателями качества, т.е., что надежна (обобщенный показатель производительности системы);

Р(Э/Н·П) - условная вероятность обеспечения экономичности системы при условии, что она надежная и производительная (обобщенный показатель экономичности системы).

Анализ выражения (7.10) показывает, что надежность входит во все составляющие эффективности системы и в то же время выступает в качестве безусловного фактора эффективности СТС, определяемого обобщенным показателем надежности P(H). При P(H) = 0 остальные составляющие эффективности системы теряют свое значение, поскольку при этом P(A) = O.

Надежность СТС как событие можно представить в виде

$$H=H\cdot C\cdot \Phi, \tag{7.11}$$

где С - событие, означающее сохранение параметров, определяющих состояние системы, в заданных пределах в течение заданного срока эксплуатации;

Ф - событие, означающее выполнение системой заданных функций.

По аналогии с (7.10) можно записать

$$P(H) = P(H/C \cdot \Phi) \cdot P(C) \cdot P(\Phi/C), \qquad (7.12)$$

где $P(H/C \cdot \Phi)$ - условная вероятность безотказного функционирования системы, определяемая при условии сохранения заданного уровня технического состояния и выполнения системой заданных функций;

P(C) - вероятность сохранения заданного технического состояния в течение срока эксплуатации; $P(\Phi/C)$ - условная вероятность выполнения системой заданных функций, определяемая при условии сохранения заданного технического состояния.

Все составляющие надежности системы (7.12) являются функциями технического состояния. Можно сделать предварительно вывод, что надежность технического состояния С (структурная надежность системы) должна быть главным объектом в части обеспечения ее надежности.

Исключительно важным для построения программ обеспечения надежности СТС в процессе эксплуатации является факторный разрез

$$H = H \cdot T \cdot J \cdot O, \tag{7.13}$$

где Т - событие, выражающее надежность техники;

Л – событие, выражающее надежность людей;

О - событие, выражающее надежность организации эксплуатации системы.

По аналогии с (7.10) и (7.12) можно записать

$$P(H) = \Pi(H/T \cdot J \cdot O) P(T/J \cdot O) P(J/0) P(0),$$
(7.14)

где P(H/T·Л·O) - условная вероятность безотказного функционирования системы, определяемая при условии надежности функционирования техники, людей и надежной организации;

Р(Т/Л·О) - условная вероятность обеспечения надежности функционирования техники при условии надежности функционирования людей и надежной организации;

Р(Л/О) - условная вероятность обеспечения надежного функционирования людей определяемая при условии надежной организации;

P(0) - вероятность обеспечения надежной организации эксплуатации системы.

Анализ показывает, что надежность организации эксплуатации в основном определяется надежностью эксплуатационно-технической документации и качеством организации работы операторов в соответствии с этой документацией и специалистов. Выражение (7 14) показывает, что надежность организации эксплуатации входит во все остальные составляющие надежности СТС и в то же время имеет самостоятельное значение. При P(O) = O остальные составляющие равны нулю, поскольку при этом общая надежность системы потеряна (P(H) = 0). Практика требует осуществления контроля за надежностью не только на стадии эксплуатации, но и на всех стадиях, начи-

ная со стадии разработки ТЗ на создание новых или модернизацию действующих систем. Необходимость такого подхода обусловлена тем, что затраты на устранение выявленных отказов и неисправностей СТС на стадии эксплуатации на два порядка выше, чем на стадии проектирования, и на порядок выше, чем на стадии изготовления элементов СТС. Но дело не только в экономике: отказы основных элементов в процессе эксплуатации приводят к невыполнению стоящих задач, а в ряде случаев и к нарушению безопасности.

Наиболее важный и достаточно сложный вопрос теории и практики исследования надежности СТС — вопрос о конкретных формах рекомендуемых для практики моделей показателей надежности функционирования. Основными моделями показателей надежности СТС являются модели целевой, структурной и факторной надежности. Рассмотрим кратко только целевую надежность, под которой понимают достижение целей ее. развития и функционирования при заданных ресурсах в заданных условиях эксплуатации.

Математическую модель обобщенного показателя целевой надежности СТС в общем случае представляют в виде

$$R=P\{Y_{B}>Y_{II}\},$$
(7.15)

где R — обобщенный показатель надежности СТС; Ув и Уц — возможный и целевой (нормативный) результаты функционирования системы. Если бы величины Ув и Уц могли быть точно установлены, то модель (7.15) имела бы следующий вид:

$$R = 1 при Y_{B} > Y_{II};$$
(7.16)
R= 0 при Y_{B} < Y_{II}.

Однако на практике величины Y_{B} и Y_{II} случайные, поэтому событие $A = \{ Y_{B} > Y_{II} \}$ тоже случайное. Общий вид модели (7.15):

$$R = \int_{0}^{\infty} \int_{Y_{\mu}}^{\infty} dF_{\mu}(y) dF_{\mu}(y) , \qquad (7.17)$$

где F_ц(у) и F_в(у) — функции распределения целевого и возможного конечных результатов функционирования системы.

Возможность практического использования параметрической модели (7.15) зависит, как следует из (7.17), от возможности определения функций распределения конечного результата функционирования системы..

Как известно из теории вероятностей, функция распределения конечного результата функционирования системы У

$$F(y) = P\{Y \le y\}$$
(7.18)

должна удовлетворять следующим требованиям: $F(Y_{min}) = 0$ при у = Y_{min} ; $F(Y_{max}) = 1$ при у = Y_{max} ; $F(y_2) > F(y_1)$ при $y_2 > y_1$, т. е. должна быть неубывающей. Следовательно, при $0 < y < \infty$ справедливы неравенства

$$0 \le F(y) \le 1.$$
 (7.19)

В практике обеспечения надежности СТС используют ряд стандартных функций распределения случайных величин с указанными свойствами. Для выбора стандартного распределения, наиболее подходящего для описания аналитических форм функций $F_{B}(y)$ и $F_{II}(y)$ необходимо: выполнить анализ системы и конечных результатов ее функционирования; принять соответствующую гипотезу об аналитической форме функции F(y) и проверить принятую гипотезу. Если для проверки гипотезы нет необходимых статистических данных, то используют соответствующее логическое обоснование и косвенные количественные оценки.

7.2 Теоретические предпосылки прогнозирования изменений параметров технических объектов

В процессе эксплуатации технических объектов важно уметь определять техническое состояние, т. е. знать, какими характеристиками они обладают в данный момент времени. Известно, что состояние системы оценивается конкретным набором значений выходных параметров, определяющих ее работоспособность. Эти параметры под воздействием различных факторов, зависящих от условий хранения и эксплуатации, случайным образом изменяют свою величину. Процесс изменения заключается в том, что воздействия указанных факторов воспринимаются элементами системы, вследствие чего изменяются их параметры. Так как выходные параметры системы связаны некоторым оператором с параметрами элементов, то при изменении последних изменяются и выходные параметры, т.е. изменяется техническое состояние системы. Таким образом, для того чтобы оценить состояние системы, необходимо определить значения ее параметров. Эта задача решается чаще всего средствами технического контроля, позволяющего получить данные о параметрах в момент их измерения.

Если параметры технического объекта находятся в пределах, установленных нормативно-технической документацией, т. е. принадлежат области допустимых значений, то состояние объекта считается работоспособным. Выход параметров за пределы области допустимых значений следует рассматривать как отказ, а свойства объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, определяет его надежность. Таким образом, такие важные характеристики объекта, как техническое состояние, работоспособность, надежность тесно связаны с понятиями параметр и процесс изменения параметра.

С ростом сложности систем возрастает роль предвидения технического состояния в некоторый будущий отрезок времени. Умение прогнозировать изменения параметров технических объектов позволяет поставить задачи предотвращения их отказов, что особенно важно для энергонапряженных объектов как трубопроводы, а также оптимальной организации технического обслуживания и ремонта.

Одним из путей повышения эффективности эксплуатации СТС является переход от технического обслуживания по наработке ресурса, практикуемого в настоящее время, к обслуживанию по фактическому состоянию. Информационной основой, на базе которой строится обслуживание по состоянию, являются некоторые априорные сведения о закономерностях процессов изменения параметров и данных контроля, характеризующие индивидуальное поведение каждого конкретного технического объекта. Полное использование этих сведений позволяет качественно по-новому ставить задачу технического обслуживания, решая ее для каждого отдельного объекта индивидуально. Такой подход к эксплуатации технического объекта позволяет обеспечить требуемое качество их функционирования, продлить его ресурс и дает возможность своевременно выявлять опасные отклонения параметров.

Обслуживание по состоянию основано на оценке технического объекта по данным идентификации, контроля его параметров и прогнозировании изменения параметров. Индивидуальное прогнозирование состояния позволяет эксплуатировать контролируемый объект до появления признаков опасного снижения работоспособности, исключить преждевременные вмешательства в его работу и выполнение трудоемких операций по обслуживанию, имеющих сомнительную полезность для надежности функционирования.

Пусть техническое состояние некоторого объекта полностью характеризуется набором его выходных параметров $y_0, y_1, ..., y_n$. Изменение параметров технических объектов, т. е. изменения вектора $Y = \{y_0, y_1, ..., y_n\}$ эксплуатационных характеристик, происходит под воздействием множества факторов, сложность учета которых заставляет рассматривать процесс их изменения как некоторую случайную функцию времени $Y(\omega, t), t \in T, \omega \in \Omega$. Здесь, Ω - множество элементарных событий, T – интервал эксплуатации объекта.

На вероятностном пространстве (Ω , F, P), где F – алгебра подмножеств множества Ω , а P – вероятностная мера, случайную функцию $Y(t) = \{y_j(t)\}_{i=0}^n$ можно принять за общую модель процесса изменения параметров технического объекта. Особенностью процесса изменений параметров Y(t) является его явно выраженная не стационарность, что объясняется присутствием в Y(t) необратимой составляющей, характеризующей процессы старения или износа.

В рамках общей модели Y(t) задача прогнозирования состояния и надежности сводится к прогнозированию нестационарного векторного случайного процесса. Эта задача тесно связана с проблемой экстраполяции случайных функций, которая в классической форме выглядит следующим образом /8, 9, 10/. Заданы "наблюдаемый" процесс Z(t), t \in T, и "ненаблюдаемый" случайный процесс W(t), t \in T, статистически связанный с Z(t). В моменты t \in T_p, где T_p \subset T, известна реализация «наблюдаемого» процесса Z_ω(t). Требуется дать точечную оценку "ненаблюдаемой" случайной функции W(t) для будущего момента времени τ , $\tau \in$ T \ Tp, по известной реализации Z_ω(t). В частном случае процесс W(t) может быть детерминированным с неизвестными параметрами.

Задача нахождения точечной оценки $Y^*(\tau)$, $\tau \in T \setminus T_p$, апостериорного случайного процесса $Y_{aps}(t)$ за пределы области D допустимых значений параметров в течение определенного времени является задачей индивидуального прогнозирования надежности. Прогнозирование средней наработки до отказа сводится к определению среднего времени нахождения Y(t) в пределах области D. На интервале контроля $T_p \subset T$ прогнозируемый процесс может наблюдаться в присутствии некоторых помех или/и ошибок измерения $\varepsilon(t)$. При этом общая задача прогнозирования изменения параметров технического объекта может быть сформулирована как задача предсказания характеристик некоторого случайного процесса Y(t) на интервале $T \setminus T_p$ по результатам наблюдения, искаженным помехами, которые получены на интервале контроля или наблюдения $T_p \subset T$.

Задача оптимального планирования эксплуатации по данным прогноза параметров может быть сформулирована как задача управления априорным случайным процессом Y(t) для неконтролируемых объектов или как задача управления апостериорным случайным процессом Y_{aps}(t) при индивидуальном техническом обслуживании контролируемых объектов. Решением такой задачи может быть некоторая стратегия коррекции параметров, обеспечивающая заданные требования надежности при минимальных эксплуатационных затратах, максимальную надежность при ограничениях на эксплуатационные расходы.

Рассмотрим дестабилизирующие факторы и случайные процессы изменения параметров. Решение задачи прогнозирования параметров технических объектов связано с определением закономерностей изменения набора $Y(t) = \{y_j(t)\}_{i=0}^n$ на интервале Т. Эти закономерности в принципе могут быть установлены на основе анализа достаточно представительной статистики о поведении технического объекта во время эксплуатации. Возможности получения такой статистики на практике ограничены. При этом оказывается полезным и целесообразным восполнять недостающие

целесообразным восполнять недостающие сведения за счет использования некоторых в определенной мере обоснованных предположений относительно свойств Y(t). Смысл таких предположений состоит в возможно большей степени детализации описания прогнозируемого процесса, например, путем задания наиболее вероятной структуры модели и отнесения Y(t) к тому или иному классу случайных процессов.

Общими свойствами практически всех процессов изменения параметров является непрерывность и не стационарность. В зависимости от исследуемых параметров они могут с достаточной степенью точности отвечать различным моделям случайных процессов. Выбор модели процесса изменения параметров определяет и математический аппарат, применяемый для прогнозирования, сложность и точность расчетов. Изменение параметров технических объектов обусловлено действием целого ряда факторов, из которых выделяют: технологические (производственные) и эксплуатационные. К числу технологических факторов можно отнести: дефекты оборудования, в том числе колебания режимов работы, неоднородность исходных материалов, погрешности измерительных инструментов и др. Действие этих факторов вызывает технологический разброс параметров, а также отличия физикохимической структуры элементов, входящих в технический объект, что приводит к различному поведению его во время эксплуатации.

В процессе эксплуатации в элементах, составляющих технический объект, протекают физико-химические процессы, вызывающие необратимые изменения параметров. Это явление называют старением. Причинами старения является диффузия вещества, изменение структуры материала, химические взаимодействия. Такие процессы протекают и при условии изоляции от внешней среды, но скорость их протекания в этом случае существенно уменьшается. Изменения температуры, влажности, нагрузки и других внешних факторов ускоряет процессы старения. Наряду со старением при эксплуатации технических объектов имеет место износ, проявляющийся к истиранию трущихся механических поверхностей и т.д., который также приводит к изменению параметров.

В результате старения и износа возникают необратимые и накапливающиеся изменения параметров. Изменения параметров элементов технических объектов во времени вследствие процессов старения и износа являются достаточно медленными и монотонными. Для случайных процессов старения и износа типичны весьма жесткие связи между значениями параметров в последовательные моменты времени. Каждый тип элемента имеет свою характерную кривую износа или старения. В связи с этим модели процессов старения обычно выбирают среди случайных процессов, которые имеют определенную функциональную зависимость от времени, а их стабильный характер обусловливается случайными параметрами, не зависящими от времени. Такие случайные процессы называют квазидетерминированными или полуслучайными.

Наиболее распространенной формой моделей случайного процесса

необратимых изменений параметров является модель вида

$$Y_{i}(t) = \sum_{j=0}^{m} \alpha_{ij} \varphi_{j}(t), \qquad (7.20)$$

где α_{ii} - случайные величины;

φ₁(t) – непрерывные детерминированные функции времени.

Такое представление можно интерпретировать как разложение случайного процесса по детерминированному базису. В качестве базисных чаще всего используются экспоненциальные, степенные и логарифмические функции /8, 9,10/. При этом в большинстве практических ситуаций порядок модели не превышает двух. Распространенным типом аппроксимации случайного процесса изменений параметров является линейная аппроксимация вида Y(t) = $a_0 + a_1 t$. Линейные случайные процессы служат удобной моделью процессов старения. Они достаточно просто описывают основные особенности процессов износа и старения и требуют минимального количества экспериментальных данных. Вместе с тем во многих случаях не позволяют с достаточной для практики точностью оценить реальные изменения параметров.

Значительно меньше в настоящее время изучены обратимые процессы изменения параметров под воздействием колебаний внешних факторов. Имеющиеся экспериментальные данные позволяют предположить, что процесс обратимых изменений параметров является стационарным с интервалом корреляции, значительно меньшим интервала корреляции процесса необратимых изменений параметров. Таким образом, обратимые изменения параметров могут рассматриваться как некоторая высокочастотная составляющая случайного процесса изменения параметров по сравнению с процессами старения или износа.

Случайная обратимая составляющая обусловлена флуктуациями температуры, давления, влажности окружающей среды, нагрузки и др. С учетом воздействия всех дестабилизирующих факторов случайный процесс изменения параметров можно аппроксимировать выражением

$$Y(t) = y_{t} + \psi(t),$$
 (7.21)

где y_(t) – монотонный нестационарный случайный процесс необратимых изменений параметров;

ψ(t) – случайный стационарный процесс обратимых изменений параметров под воздействием внешних условий.

Случайные процессы y_{t} и $\psi(t)$ обычно полагают статистически независимыми из-за различного характера корреляционных функций этих процессов. При этом в большинстве случаев считают, что отдельные внешние воздействия статистически независимы, а вызываемые ими отклонения незначительны по сравнению с абсолютным значением параметра. При рассмотрении достаточно продолжительных интервалов времени в такой модели Y(t) основной причиной отказа является случайный необратимый изменение параметров. На малых промежутках времени изменения, описываемые необратимой компонентой y_(t), могут быть меньше амплитуды кратковременных колебаний значений параметров.

Если начальное качество элементов объекта достаточно однородно, случайный процесс необратимых изменений характеризуется постоянной средней скоростью, а воздействия внешних факторов варьируются в широких пределах, то более подходящей моделью случайных процессов изменения параметров будут процессы с сильным перемешиванием. Внешне реализации таких процессов характеризуется тесным переплетением.

Весьма перспективным представляется описание процессов изменения параметров в виде ортогональных канонических разложений. Идея канонического представления состоит в том, что любой случайный процесс может быть описан в виде ряда, состоящего из комбинаций неслучайных функций и некоторых некоррелированных случайных величин:

$$Y(t) = M_{y}(t) + \sum_{j=1}^{N} \lambda_{j} u_{j}(t), \qquad (7.22)$$

где M_y(t) – детерминированная функция, представляющая собой математическое ожидание случайного процесса Y(t);

λ_j - некоррелированные случайные величины, математические ожидания которых равны нулю;

u_i(t) – неслучайные функции времени, называемые координатными.

Для того чтобы такое разложение описывало исследуемый процесс изменения параметров, необходимо определить или задать коэффициенты λ_j и координатные функции u_i(t).

Среди представлений случайных процессов наибольшее распространение получили канонические разложения В.С. Пугачева и разложения Карунена-Лоэва /8, 9, 10/. Основная разница между ними состоит в требованиях, предъявляемых к точности воспроизведения процесса любым заданным числом членов N суммы. Разложение Карунена-Лоэва обеспечивает минимум среднего квадрата ошибки, усредненной на интервале наблюдения, а разложение В.С. Пугачева – минимум стандартной ошибки в каждой точке этого интервала. В настоящее время, несмотря на хорошо развитый математический аппарат канонических представлений, удобство моделирования на ЭВМ и имеющиеся примеры применения для прогнозирования надежности, широкого распространения на практике такие модели не получили. Основная причина этого – отсутствие необходимых данных об этих моделях в справочной литературе.

Одними из моделей, которые весьма заманчиво использовать для описания случайных процессов изменения параметров, являются марковские модели, которые обладают целым рядом полезных свойств. Для полного описания такого процесса достаточно двумерного закона распределения. Кроме того, для марковских процессов имеется хорошо развитый математический аппарат дифференциальных уравнений академика А.Н. Колмогорова, что позволяет решать на его основе различные задачи надежности. Однако применение таких моделей для прогнозирования изменения параметров технических объектов требует целого ряда специальных экспериментов. Обеспечение же соответствия их действительным процессам Y(t) по априорной информации также далеко не всегда является удобным, главным образом из-за отсутствия необходимых исходных статистических данных. Имеющийся на практике экспериментальный материал о поведении TO во время эксплуатации марковские модели Y(t) редко описывают удовлетворительно.

Случайные процессы изменения параметров обычно считают нормально распределенными. В пользу такого утверждения приводятся соображения о механизме образования нормального закона, который порождается действием большого числа примерно равных по величине факторов, а также статистические данные, полученные в результате испытаний различных объектов. Справедливость гипотезы о нормальном законе распределении параметров подтверждается данными теории точности и экспериментальными данными о производственных (технологических) отклонениях параметров, по которым накоплен большой фактический материал. Использование гауссовских случайных процессов в некоторой степени оправдано еще и тем, что нормальный закон распределения содержит максимум энтропии по сравнению с любым непрерывным распределения нормальным не приводит к завышению оценок.

В заключение необходимо отметить, что накопленная к настоящему времени достаточно обширная информация о закономерностях процессов изменения параметров относится главным образом к параметрам элементов систем. Данные об изменениях выходных параметров систем можно найти только для сравнительно простых объектов. Для сложных технических систем возникают трудности в получении статистических характеристик выходных параметров из опыта эксплуатации, так как для этого необходимо большое количество таких систем и продолжительное время эксплуатации.

Список использованных источников

- 1. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / под ред. А. А. Красовского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. –712 с.
- 2. Соломенцев, Ю.М. Управление гибкими производственными системами [Текст] / Ю.М. Соломенцев, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1988. –352 с.
- Проектирование технологии [Текст]: учебник / Ю.М. Соломенцев, А.Г. Схиртладзе [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1990. –416 с.
- 4. **Рей, У.** Методы управления технологическими процессами [Текст] / У. Рей. М.: Мир, 1983. –368 с.
- 5. Сейдж, Э.И. Идентификация систем управления [Текст] / Э.И. Сейдж М.: Наука, 1974.–248 с.
- 6. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. М.: Мир, 1975. –683 с.
- 7. Райбман, Н.С. Построение моделей процессов производства [Текст] / Н.С. Райбман, В.М. Чадеев – М.: Энергия, 1975. –376 с.
- Надежность технических систем [Текст] / Ю. К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. –608 с.
- 9. **Труханов, В.М.** Надежность изделий машиностроения. Теория и практика [Текст]: учебник / В.М. Труханов. –М.: Машиностроение, 1996. 336 с.
- 10. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход [Текст] / Ф. Байхельт, П. Франкен. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
- 11. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных [Текст]: пер. с англ. / Дж. Бендат, Дж.Л. Мелса М.: Мир, 1989. –540 с.
- 12. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е.С. Вентцель, Л. А. Овчаров. М.: Наука, 1991. 375 с.
- 13. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных [Текст] / С.А. Айвазян, Л.Д Мешалкин [и др.] М.: Финансы и статистика, 1983. –471 с.
- 14. **Львовский, Е. Н.** Статистические методы построения эмпирических формул [Текст]: учебное пособие / Е.Н. Львовский. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
- 15. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования [Текст]: учебное пособие / В.А. Веников. - М.: Высшая школа, 1976. –479 с.
- 16. **Кузин, Л. Т.** Основы кибернетики [Текст]: учебное пособие. В 2 т. Т.2./ Л.Т. Кузин. Основы кибернетических моделей. – М.: Энергия, 1979. –584 с.
- 17. Цикерман, Л. Я. Диагностика коррозии трубопроводов с применением

ЭВМ [Текст] / Л.Я. Цикерман. - М.: Недра, 1977. –319 с.

- 18. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов [Текст]: учебное пособие / Н.П. Жук. М.: Металлургия. 1976. -472 с.
- 19. Хусу, А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) [Текст] / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А.Пальмов. М.: Наука, 1975. –344 с.
- 20. Уокенбах, Дж. Microsoft Exel 2000. Библия пользователя [Текст]: пер. с англ. / Дж. Уокенбах М: Издательский дом «Вильямс», 2001. –873 с.
- 21. **Туррот, П.** Супербиблия Delphi [Текст] / П. Туррот, Г. Брент [и др.] Киев: «ДиаСофт», 1997. 848 с.
- 22. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров [Текст] / А.А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. М.: Высшая школа, 1994. –544 с.
- 23. Холл, Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст]: пер. с англ. / Дж. Холл, Дж. Уатт. М.: Мир, 1979. -312 с
- 24. **Месарович, М.** Теория иерархических многоуровневых систем [Текст] / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. М.: Мир, 1973. –344 с.
- 25. Дитрих, **Я.** Проектирование и конструирование: системный подход [Текст] / **Я**. Дитрих. М.: Мир, 1981. –456 с.
- 26. Владов, Ю.Р. Идентификация систем [Текст]: учебное пособие / Ю.Р. Владов. Оренбург: ОГУ, 2003. -202 с.