

1. Состояние вопроса и задачи исследования

В данной главе выполнен анализ современного состояния трубопроводного транспорта в России, выделены причины, влияющие на целостность магистральных трубопроводов, определены возможные пути продления срока службы ЛЧМТ, приведен анализ автоматизированных систем управления, оценки надежности и контроля состояния трубопроводных систем. Также описаны мероприятия, позволяющие продлить срок службы участка трубы.

Предложено создать программно-аналитический комплекс на базе модели типового звена линейной части магистрального трубопровода, который будет выполнять функцию "виртуального" контроля состояния МТ и позволит прогнозировать долговечность участка трубопровода в зависимости от начальных условий эксплуатации, в условиях переменных нагрузок и изменения режимов работы трубы.

1.1. Состояние магистральных трубопроводов России

Россия обладает развитой сетью трубопроводного транспорта природного газа, нефти и продуктов их переработки: общая протяженность трубопроводов превышает 200 тыс. км. [101]. Она включает в себя уникальную по протяженности и производительности газотранспортную систему – одно из самых крупных инженерных сооружений XX века. На ее базе была организована единая система газоснабжения. Российская ее часть объединяет газовые промыслы – 146,3 тыс. км. магистральных газопроводов [33].

Уникален по своим масштабам и возможностям и нефтепроводный транспорт страны. Нефтепроводная система России включает в себя порядка 52 тыс. км. магистральных трубопроводов [97].

Магистральные трубопроводы – самые масштабные подземные сооружения, которые при внешней технической простоте принципиально

отличаются от других строительных конструкций воздействием силовых факторов, сложной схемой взаимодействия с окружающей средой, неопределенностью напряженно-деформированного состояния. Расположение трубопроводов в труднодоступных местах осложняет их диагностику и увеличивает вероятность возникновения отказов [34]. Причем даже незначительные отклонения реальных условий эксплуатации от принятых за исходные приводят всю систему к предельному состоянию [1, 97].

Специфика магистральных трубопроводов России состоит, прежде всего, в сложнейших природно-климатических условиях их строительства и эксплуатации. Дело в том, что самые крупные месторождения расположены в субарктических широтах Западной Сибири, трассы газовых и нефтяных магистралей, протянувшихся на тысячи километров, пересекают вечную мерзлоту, многочисленные естественные (реки, ручьи и пр.) и искусственные (автодороги, железные дороги и пр.) преграды, а также заболоченную тундру [34]. Для трубопроводной системы характерна зональная дифференциация (проблемы, возникающие на юге, могут быть не актуальны на севере и более того, существенные различия в условиях эксплуатации могут быть в пределах одной территории).

Трубопроводы – наиболее эффективный в экономическом плане, надежный и экологически безопасный способ транспортировки углеводородов. Но это определяется не только органически присущими трубопроводам физическими свойствами. Преимущества достигаются благодаря хорошим проектам, высокому качеству оборудования, материалов и строительства, технической культуре эксплуатации. Проблема в том, что на практике эти обязательные компоненты не всегда выдерживаются. Об этом свидетельствуют повторяющиеся аварии и отказы на магистральных.

В 1995 году, например, показатели аварийности на магистральных газопроводах составили 0,21, а на нефтепроводах – 0,30 на 1000 км [34].

Общественное мнение в стране и за рубежом закономерно связывает наличие аварийных ситуаций на трубопроводах с их «возрастом».

Так, по данным 1998 года, 29% нефтепроводов эксплуатируются уже от 20 до 30 лет. А 26% эксплуатируются уже более 30 лет [97]. Средний возраст газопроводов России – 16 лет, 30% эксплуатируется более 20 лет и 40 тыс. км. выработали свой расчетный ресурс (33 года), а 2,5% газопроводов уже служат более 40 лет [33].

В связи с такой ситуацией компаниями по управлению транспортировкой нефти и газа разрабатываются новые программы и концепции, направленные на диагностику состояния магистральных трубопроводов аппаратными методами. Компании ориентированы на разработку программного обеспечения, которое позволит систематизировать данные по каждому из участков трубопроводов, позволит быстро находить интересующую информацию, расширяется использование геоинформационных систем. Разрабатываются планы работ и порядок финансирования для обеспечения ремонта наиболее опасных участков трубопровода, так как на полномасштабную замену всех участков, нормативный срок службы которых исчерпан, не хватает денежных ресурсов. Исследуются возможности оптимизации режимов работы трубопроводов, анализ которых приводится в [83]. В этой связи в УМТ повысился интерес к инструментам, которые позволили бы не только проверять на определенный момент состояние трубопроводов, но и прогнозировать его в будущем для более рационального использования денежных средств при ремонтах и заменах участков труб.

1.2. Причины понижения эксплуатационной надежности магистральных трубопроводов и пути продления их срока службы

Магистральные трубопроводы находятся в сложных "взаимодействиях" с перекачиваемой жидкостью и с окружающей средой. Линейная часть МТ постоянно испытывает нагрузки, имеющие различную природу как по степени и типу воздействия, так и по виду происхождения.

К числу постоянных нагрузок и воздействий можно отнести массу (собственный вес) трубопровода и устройств, воздействия предварительного напряжения (упругий изгиб и др.), давление (вес) грунта/ воды. К числу переменных длительных нагрузок можно отнести внутреннее давление, массу перекачиваемого продукта, температурные воздействия, воздействия неравномерных деформаций грунта для некоторых типов магистральных трубопроводов. К кратковременным относятся нагрузки, возникающие при пропуске очистных или диагностических устройств, при испытаниях трубопровода, при ремонте, который сопровождается подъемом или другим перемещением трубопровода и др. Анализу влияния нагрузок и их оценки посвящен ряд работ [2, 10, 11, 12, 17, 24, 89, 106, 109, 110] и др.

Рабочее давление является причиной кольцевых и продольных напряжений в стенках труб, которые могут изменяться при повышении или понижении внутреннего давления [11]. Испытательное давление создает в трубопроводах такие напряжения, при которых разрушение труб, имеющих различные дефекты, достигает высокой степени вероятности.

В процессе создания и эксплуатации МТ существенно влияют на их надежность динамические процессы, проявляющихся в виде нагрузок, возникающих:

- при перевозке на транспортных средствах к месту укладки;
- при погрузке и выгрузке;
- при пропуске очистных устройств;
- при укладке;
- при взаимодействии транспортируемой жидкости с трубопроводом [17].

Линейная часть магистрального трубопровода подвержена также действию дополнительных внешних нагрузок, таких как гидравлические удары, дополнительные продольные усилия, случайные нагрузки, вызывающие местный изгиб трубопровода во время эксплуатации.

Гидравлические удары являются следствием внезапного отключения станций, сброс перекачиваемого продукта с нескольких участков трубопровода

на один, что приводит к скачкообразному повышению давления жидкости в трубе. Попадание и транспортирование воздушных масс по трубопроводу в ряде случаев может также вызывать толчки давления, подобные гидравлическому удару [104].

Часто отказы на нефтепроводах возникают из-за циклических колебаний величины внутреннего давления, приводящих к накоплению повреждений, развитию исходных и появлению новых трещиноподобных дефектов, которые, в свою очередь, приводят к появлению и росту усталостных трещин.

Отдельные участки трубопроводов могут испытывать до нескольких повторных нагрузений в сутки, вызванных различными причинами: отключением насосов перекачивающей станции из-за отказов электрооборудования, автоматики, из-за отказов механического оборудования и ошибок обслуживающего персонала; изменением режима перекачки и другими обстоятельствами. За год некоторые участки магистральных трубопроводов могут испытывать в среднем до 300-350 циклов нагрузений внутренним давлением, а за время амортизационного срока службы (33 года) эта величина составляет от 10^3 до 10^4 циклов, что соответствует малоцикловому нагружению [12, 89, 58, 101, 108 и др.].

Совместное протекание в металле стенки трубы коррозионных и усталостных процессов идентифицирует процесс снижения несущей способности трубопровода.

Большое влияние на надежность трубопровода оказывает наличие концентраторов напряжения. К концентраторам напряжений можно отнести:

- дефекты механического происхождения: царапины на внешней поверхности трубы (риски), задиры, забоины, вмятины, эрозионное повреждение внутренней поверхности трубопровода, лыска на внешней поверхности трубы;
- дефекты технологического происхождения: вмятина, включение, окалина, трещина, пузырь, раскатанный пузырь, расслоение, закат, вкат, царапина, риска, подрез;

- дефекты коррозионного происхождения: природа и причины возникновения коррозионных повреждений, скорость их развития и анализ факторов, благоприятствующих увеличению подобного рода дефектов, описана в [3, 7, 8, 25, 27, 28, 38, 39, 44, 47, 48, 52, 54, 61, 62, 67, 69, 73, 90, 93, 96, 111];
- дефекты эрозийного происхождения;
- дефекты выполнения сварных швов.

Сварной шов, как конструктивный элемент трубопровода, сам по себе является концентратором напряжений в стенке трубы и увеличивает напряжения в 1,5-1,6 раза. Дефектный сварной шов представляет собой серьезную опасность, так как увеличивает напряжения более чем в 2 раза [41].

Важным фактором, приводящим к снижению надежности ЛЧМТ, является коррозионное повреждение наружных поверхностей трубопроводов и эрозионное повреждение внутренней области трубопроводов вследствие наличия межкристаллической коррозии и гидродинамических ударов транспортируемого продукта.

Конструктивные элементы магистральных трубопроводов в процессе эксплуатации, в том числе и линейная часть, подвержены такому явлению как "старение". Под старением подразумевается процесс изменения физических и механических свойств металла во времени. Известны три вида старения: естественное, термическое и деформационное. При старении закономерно возникающие в процессе эксплуатации изменения приводят к нарастающему уменьшению устойчивости функционирования трубопровода. В результате описанных изменений даже небольшие отклонения нагрузки от номинальной могут вызвать необратимые структурные изменения и последующее разрушение объекта, которое зачастую носит катастрофический характер. Описанию процесса старения объектов МН как наиболее общего физического механизма, определяющего, в конечном счете, долговечность трубопровода посвящена работа [89].

Линейная часть магистрального трубопровода является объектом с распределенными параметрами, что обусловлено ее значительной

протяженностью. В результате техническое состояние ЛЧ оказывается чувствительным к вариациям внешних условий (флуктуации температуры, давления перекачки продукта, концентрации химических реагентов коррозии, электрических токов и т.д.) и внутренних причин (флуктуации химического состава материала труб, прочностных свойств, состаренности металла труб, изготовления и строительства и т.д.) [89].

В последние годы беспокойство вызывает рост отказов на газопроводах, связанных с коррозионным растрескиванием металла труб под напряжением, идентифицируемого с определением «стресс-коррозия». За 1990-1995 годы их доля составила 13% от общего числа отказов [33]. На сегодняшний день коррозия составляет порядка 31% от общего числа отказов на магистральных трубопроводах России [97].

Анализ причин появления коррозионных дефектов [92] показывает, что развитию внешней коррозии способствуют как технологические (брак строительно - монтажных работ), так и природно-климатические факторы. Кроме того, важнейшим фактором, влияющим на скорость развития коррозии, является состояние электрохимической защиты: несовершенство системы защиты от коррозии снижает сопротивляемость труб и способствует развитию коррозионных процессов. Статистика распределения коррозионных дефектов показывает, что в южных регионах, количество коррозионных повреждений заметно выше, чем в центральных регионах России.

На развитие внутренней коррозии большое влияние оказывает уровень подготовки нефти, нефтепродуктов и газа к транспортировке. Так, например, наличие сероводорода в перекачиваемой нефти создает предпосылки для развития коррозионных повреждений на внутренней поверхности трубопровода. Снижение скорости перекачки, приводит к тому, что в низких точках трубопровода скапливается вода, различные отложения, также способствующие развитию внутренней коррозии [101].

В работе [15] автор выделяет три основных вида коррозии наиболее опасных для линейной части трубопроводных систем: коррозионное

растрескивание (КР), зарождающееся на внешней, катоднозащищенной поверхности труб, коррозионная усталость и общая коррозия усиленная воздействием механических напряжений. Причем, первый вид коррозионно-механических разрушений характерен для магистральных газопроводов, второй - магистральных нефтепроводов. Проявление третьего вида разрушений наблюдается при контакте напряженного металла с агрессивной средой, в частности, в системах сбора и транспорта сырых неподготовленных углеводородов.

Как при таком широком спектре нагрузок на трубопровод обеспечить высокую надежность эксплуатации и продлить срок службы.

Для обеспечения безаварийной работы системы МТ "проще всего" выполнять замену участков трубопровода, срок службы которых приближается к нормативному или уже исчерпан. Но на восстановление тысяч километров стальных магистралей не хватит средств и технических возможностей даже у такой компании – гиганта, как "Газпром" [87].

Традиционные методы, применявшиеся на протяжении ряда лет для повышения надежности и предупреждения аварийности отечественных магистральных трубопроводов, такие как:

- капитальный ремонт магистральных трубопроводов;
- капитальный ремонт подводных переходов МТ;
- замена неисправной трубопроводной арматуры, трубопроводных деталей полевого изготовления;
- реконструкция камер пуска/ приема средств диагностики и очистных сооружений [14],-

для длительно эксплуатирующихся трубопроводов исчерпывают свои возможности. Строительство и капитальный ремонт средств электрохимической защиты и очистка внутренней полости магистральных трубопроводов,— могут лишь отчасти решить вопрос продления срока службы трубопроводного транспорта.

Еще один вариант решения данной задачи - это выборочный капремонт наиболее опасных участков трубопроводов. Но каким образом определить очередность участков, нуждающихся в ремонте?

Существует несколько путей определения текущего состояния участков трубопроводов, в основе которых лежат:

1. внутритрубная диагностика. Но около **60%** газопроводов не приспособлено к проведению внутритрубной диагностики (неравнопроходная запорная арматура и т.д.). По данным предприятия РАО "Газпром" в срочном обследовании нуждаются не менее трети всех труб [40];
2. наружные аппаратные средства диагностики, перемещающиеся вдоль трубопровода. Но использование подобных средств весьма ограничено ввиду сложных условий пролегания трубопроводов и их заглубления в грунт;
3. гидравлические переиспытания. Но данный метод содержит в себе опасность возникновения аварий, что в условиях дефицита финансов может привести к длительной остановке процесса транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов, а, следовательно, к остановке производства;
4. методики экспертной оценки относительного риска эксплуатации ЛЧМТ [66]. Но данные методики требуют досконального знания состояния трубопровода.

В силу перечисленных обстоятельств усилился интерес к так называемому «виртуальному» контролю, основанному на моделировании процесса нарастания напряжений в трубе в процессе ее эксплуатации с учетом развития коррозии, так как коррозия составляет порядка **31%** от общего числа отказов на магистральных трубопроводах России [97]. Априори предполагается, что с помощью «виртуального» контроля можно указать те участки транспортной сети, дальнейшая эксплуатация которых опасна и требуется либо их замена, либо переход на «щадящий» режим работы.

1.3. Модели в исследовании состояния трубопроводного транспорта

Модель - аналог (схема, структура, знаковая система) определенного фрагмента природной или социальной реальности, продукта человеческой культуры и т.п. Она служит для хранения и расширения знания (информации) об оригинале, его свойствах и структурах, для преобразования или управления им [5].

Моделирование - построение и изучение моделей реально существующих предметов, явлений и конструируемых объектов для определения либо улучшения их характеристик, рационализации способов их построения, управления ими и т.п. Формы моделирования разнообразны и зависят от используемых моделей и сферы применения моделирования [19, 94].

Моделирование участка трубопровода помогает определить исходное, текущее состояние системы, а также может помочь в прогнозировании поведения системы в будущем или при изменении условий эксплуатации. Используя моделирование, мы можем предсказать предаварийные ситуации по тем или иным причинам, не прибегая к опытам на действующих участках трубопроводной сети, так как это может привести к непоправимому экологическому ущербу и экономическому ущербу.

Существующие наработки в области моделирования трубопроводных систем и их элементов содержат в своей основе как различные подходы (ретроспективный, инженерный, вероятностный, на основе теории надежности и т.д.), так и различные процессы (старение, термомоформирование, колебания и т.д.), характеристики (прочность, надежность, остаточный ресурс и т.д.).

В существующей на сегодняшний день литературе можно найти описание моделей, отражающих поведение, изменение величины и уровня влияния одного или нескольких параметров на состояние ЛЧ магистрального трубопровода.

В работе [30] установлена зависимость для оценки остаточной прочности в зависимости от размера каверны.

На основании информации о геометрических параметрах трещиноподобных дефектов по результатам внутритрубной диагностики в [103] предложена модель для вычисления индивидуального остаточного ресурса участков трубопровода, а также для оптимального планирования сроков ремонтных работ и сроков проведения очередных обследований.

Можно прогнозировать остаточный ресурс нефтепроводов и планировать сроки капитального ремонта на основании информации, получаемой при помощи внутритрубной диагностики, с помощью разработанной модели оценки текущего числа работоспособных секций трубопровода [102].

Анализ влияния законов распределения несущей способности и нагрузки, а также влияния значения параметров законов и других характеристик на надежность изделий при исследовании модели "нагрузка - несущая способность" рассмотрен в [65].

Вопросам моделирования отчасти посвящена работа [57], в которой рассмотрены модели формирования качества и модели прогноза работоспособности МТ на основе вероятностно-статистических методов. Причем прогнозирование надежности магистрального трубопровода рассмотрено с двух позиций:

1. на основе анализа физической сущности системы формирования качества сооружаемого трубопровода и его эксплуатации (с учетом рабочих параметров элементов трубопровода, способов сооружения, режимов работ и др.);
2. на основе использования статистических методов обработки данных об отказах (ретроспективный метод прогнозирования).

Существуют разработанные алгоритмы расчета напряжений изгиба и предельно допустимого внутреннего давления для подводного перехода [105].

Напряженно-деформированное состояние трубопровода можно оценить с помощью метода конечных элементов. Модель формализации этого метода для расчета напряженно-деформированного состояния представлена в работе [12].

В работе [51] методика оценки сопротивляемости МГ протяженным разрушениям основана на модели протяженного разрушения магистрального газопровода, разработанной в МВТУ им. Баумана.

Для подводных переходов в работе [11] приведена математическая модель расчета участка длины трубопровода, который оказывается размывом вследствие влияния водных потоков и переформирования русла реки. Также в этой книге приведены наработки по моделированию колебаний подводного трубопровода. Также в работах [75, 76] представлены подходы для оценки долговечности подводных переходов, на основе учета малоцикловых нагрузений. В работе [68] изучаются подходы к оценке надежности подводных переходов.

Распространение колебаний и волновых процессов в трубопроводах из современных конструкционных материалов легло в основу построения расчетных моделей в работе [17] и рассмотрены возможности использования для подводных переходов в работе [80].

Разработке моделей управления долговечностью объектов магистральных нефтепроводов, в том числе и линейной части, посвящен раздел книги [89]. С помощью модели определяется "запас прочности", который зависит от интенсивности отказов, который определяется при наличии достаточного объема статистической информации о долговечности элементов МН. Также в работе предложена эвристическая модель старения, в основе которой лежит установление ситуативных отношений для процесса старения. Эвристическая модель старения ориентирована на поиск нового структурирования описаний процесса старения объектов МН.

В [18] рассматриваются модели, основанные на гидродинамических процессах, причем модели разделяются на детерминированные, стохастические, адапционно - обучающие. Детерминированные модели применяются, когда предполагаются известными как уравнения, описывающие состояние системы, так и замыкающие реологические соотношения. Стохастические модели учитывают вероятностный характер изучаемых

процессов. Адаптационно - обучающие модели применяются в случаях, когда необходимо определить состояние системы в условиях недостаточной определенности исходной информации.

Проведенный анализ позволил выделить следующие типы задач по прикладному моделированию линейной части магистрального трубопровода:

- Анализ напряженно-деформированного состояния;
- Модели расчета на прочность ЛЧ МТ;
- Модели расчета динамических процессов;
- Модели расчета режимов течения жидкости, пропускной способности трубопроводов на основе гидродинамики на основе гидродинамики;
- Модели развития коррозионных дефектов;
- Модели расчета остаточного ресурса трубопровода;
- Модели разрушения;
- Модели оценки долговечности;
- Модели старения;
- Модели оценки остаточного ресурса;
- Модели для оценки отдельных параметров, влияющих на работоспособность, долговечность и пропускную способность трубопроводов.

Однако, если обращаться к моделям коррозионного износа с учетом механических напряжений, то отсутствует в таковых учет переменных нагрузок, параметров и средств защиты от коррозии, а только значение внутреннего давления может меняться в течение суток до 20 и более раз. Также не заложен расчет динамики коррозии с учетом сценария эксплуатации, т.е. набора событий и действий, которые происходили в процессе эксплуатации изучаемого участка МТ.

1.4. Автоматизированные системы управления, оценки надежности и контроля состояния трубопроводных систем

В рамках автоматизации процесса оценки и прогнозирования состояния магистральных трубопроводов следует отметить работу [88]. Предложено использовать электронные карты и геоинформационные системы для получения полной картины о местоположении, типах и характеристиках трубопроводных систем.

Для ООО “Севергазпром” разработана автоматизированная экспертно-аналитическая система определения, анализа и прогноза состояния линейной части магистральных газопроводов. Основой данной разработки стала возможность описания фактического состояния линейной части магистральных трубопроводов и прогнозирование изменений, а также возможность производить расчет прочностной надежности потенциально опасных участков. Составными частями системы являются ГИС "MapInfo", АСУ ТП "STADA", комплекс математических моделей, разработанных специалистами СеверНИПИгаза и НИИ измерительных систем [50].

Потенциально опасными участками считаются следующие: всплывающий участок, пересечение через ручей и овраг, воздушный переход с водопропускниками, коррозионный участок, пересечение через реку, продольный размыв обваловки вдоль трубы, пересечение автодорогой, пересечение железной дорогой, пересечение с трубопроводом, стресс - коррозия, зона сельхозработ, геодинамическое воздействие.

Надежность перечисленных участков рассчитывается по следующим моделям:

- надземный коррозионно - поврежденный участок с компенсатором;
- плавающий коррозионно - поврежденный участок;
- коррозионно - поврежденная арка;
- пространственно - изогнутый коррозионно - поврежденный участок;
- подземный коррозионно - поврежденный участок;

- надземный коррозионно - неповрежденный участок с компенсатором;
- плавающий коррозионно - неповрежденный участок;
- коррозионно - неповрежденная арка;
- пространственно - изогнутый коррозионно - неповрежденный участок;
- надземный безкомпенсаторный коррозионно - поврежденный участок;
- надземный безкомпенсаторный коррозионно - неповрежденный 50].

Но данные по математической модели, которая лежит в основе системы, и по точности надежностного расчета не приводятся.

В ОАО "ГИПРОтрубопровод" используется программная продукция по прогнозу ресурса трубопроводов, в основе которой лежат аналитические разработки по оценке надежности транспорта нефти и газа, созданные специалистами ОАО "ГИПРОтрубопровод", РАО "Газпром", ВНИИСПТнефть. В качестве исходных данных используются результаты экспериментальных исследований (в ходе дефектоскопии и при осмотрах) образцов металла, реально работавших на трубопроводе. На основе моделей развития дефектов под воздействием нагрузок и прогноза будущих объемов транспорта рассчитываются зависимости ресурсов до отказа всех сортов и типоразмеров сталей труб от амплитуды изменений рабочего давления [49]. Модель, которая лежит в основе системы, и информация по точности надежностного расчета с помощью рассмотренной программы в работе не приводятся.

Решению задач прогнозирования технического состояния трубопроводов посвящена работа [101]. Автор ориентируется на совершенствование методов внутритрубной диагностики с последующим анализом данных для выборочного капремонта и на создание мониторинговой системы. В рамках системы создаются базы данных: "дефект", "характеристики материалов", "условия нагружения", "условия окружающей среды", "характеристики перекачиваемого продукта", "условия прокладки" и "защищенность трубопровода", - которые накапливают данные по трубопроводам.

Мониторинговая система включает следующие программные модули:

- расчет напряженно - деформированного состояния трубопровода в зоне дефекта;
- расчет прочности дефектосодержащих секций трубопровода;
- прогноз остаточного ресурса трубопровода с дефектами;
- оценка прочности;
- исследование и анализ развития дефектов;
- рекомендации по эксплуатации трубопровода с дефектами [101].

Мониторингу трубопроводных конструкций посвящена также работа [23], в которой предложена структура прочностного мониторинга трубопроводных конструкций, подвергающихся совместному воздействию нагрузок, температур и коррозионных рабочих сред. Основой данной системы является работа с банками данных, в которых накапливается и систематизируется следующая информация:

- банк моделей деформирования используемых материалов;
- банк моделей коррозионного разрушения используемых материалов;
- банк моделей деформирования различных участков трубопровода с характерными дефектами различного вида;
- банк программ расчета трубопроводных конструкций;
- банк механических свойств используемых материалов;
- банк механических и коррозионных свойств встречающихся грунтов;
- банк геометрических параметров трубопроводной конструкции;
- банк данных с результатами оценки остаточного ресурса с указанием исходных данных;
- банк данных по результатам внутритрубной диагностики [23].

При прочностном расчете трубопровода с дефектами используются модели из банка данных, которые наиболее точно подходят в данном случае.

За рубежом широкое распространение получили системы семейства STADA (supervisory control and data acquisition).

Широкое применение они получили в нефтегазовой отрасли: управление процессами нефтепереработки компании **Air Products and Chemicals Inc.**, управление газораспределительной системой компании **Commonwealth Energy Systems**, управление объединенной газотранспортной системой, включающей сети пяти европейских стран и др. [45].

Структура системы **STADA**, как правило, имеет три уровня: уровень предприятий, средний уровень и уровень установки [95].

Уровень предприятия - прогнозы и планирование производства; общий контроль стратегии системы; супервизорный контроль и мониторинг всей системы; обработка данных для административной информационной системы.

Средний уровень - планирование, процесс оптимизации с учетом ряда требований с верхнего уровня; определение функций и набора узлов для отдельных контроллеров; супервизорный контроль и мониторинг процесса. Типичным примером здесь может служить управление работой компрессорных станций, станций подземного хранения газа и т.д.

Уровень установки - непосредственное цифровое управление, контроль экстремальных значений (выбросов) параметров; простейшие расчеты.

Системы семейства ориентированы на управление нефтегазовыми предприятиями и объединениями, где контроль состояния магистральных трубопроводов является лишь частью системы, которая в целом разработана для диспетчерского управления.

Созданием тренажерных систем диспетчерского управления занимаются и в России. В частности, свои научные работы посвятили данной теме Григорьев Л.И. и Митичкин С.К. Ими разработана теория для диспетчерских тренажеров по транспорту газа, методика построения диспетчерских автоматизированных тренажеров, а также разработан комплекс математического, информационного и программного обеспечения для тренажера диспетчера по решению задач оперативного управления газотранспортной системой [21, 55].

Тренажерные программы также разрабатываются специалистами ООО "Энергоавтоматика". Ими разработан тренажер оператора магистрального продуктопровода, который имитирует функционирование всего продуктопровода, системы измерения, обработки и передачи информации. Математический модуль тренажера моделирует функционирование продуктопровода, системы измерения и датчиков, алгоритмы обработки информации в контроллерах нижнего уровня, процесс передачи данных по каналам связи и функционирование базы данных верхнего уровня. Этот тренажер функционирует совместно с системой управления на базе MicroSTADA германской фирмы АВВ.

В Калининграде существует "Отраслевой научно-тренажерный центр", которым разработаны АСУ и тренажеры-имитаторы по бурению, добыче газа, транспорту, переработке газа и газового конденсата, нефтегазопереработке, распределению газа. По транспорту газа создано более тридцати АСУ и тренажеров-имитаторов, одной из которых является АСУ "Эксплуатация линейной части магистрального трубопровода". Описание тренажерных программ также приведено в [22].

В США компания EI Paso Natural Gas Co. разработала модель, получившую название SCCRAM и устанавливающую основные параметры процесса коррозионного растрескивания в матричной форме. Модель, по словам авторов, позволяет оператору оценить восприимчивость любого трубопровода к коррозионному растрескиванию под напряжением, а также рекомендовать соответствующие меры компенсации [56].

АК "Транснефть" в 1996 году приступила к созданию единой системы контроля и управления техническим обслуживанием и ремонтом магистральных нефтепроводов - "СКУТОР". Основными целями создаваемой системы является:

- мониторинг и прогнозирование технического состояния элементов и трубопровода в целом;
- планирование и контроль выполнения капитального ремонта;

- оказание информационных услуг поставщикам и потребителям нефти по оптимальному выбору маршрута, своевременному и гарантированному качеству поставки.

Фактической базой для реализации СКУТОР является:

- исполнительная документация, ретроспективный статистический материал и опыт эксплуатации, накопленный в АК "Транснефть";
- значительный объем инструментальных и внутритрубных инспекций, выполненных в 1995-1997 гг.

С 1998 в АК "Транснефть" начала функционировать I очередь СКУТОР: 140 рабочих мест, в том числе 20 в самой АК. Идет накопление информационной базы для системы [99].

В АО "Центр технической диагностики" создана информационно - аналитическая система ЭКСПЕРТ. Разработка призвана выполнять следующие функции:

- предоставление информации об объектах исследования средствами технической диагностики, причем объектом анализа может служить любое требуемое число особенностей трубопровода (дефекты, отдельные трубопроводы, участок труб, задвижки и др.);
- расчет дефектов на прочность в режиме динамического изменения и ввода исходных данных;
- составление отчетов [46].

В рамках единой автоматизированной системы управления (ЕАСУ) создана подсистема "Информационное обеспечение ТОР ППМН". В функциональные задачи данной подсистемы входят:

- сбор, систематизация, и долговременное хранение данных о параметрах проектного, начального и текущих состояний подводных переходов;
- сопоставление текущих данных с нормативными документами и данными о состоянии в предыдущие периоды времени с целью оценки стабильности ситуации, выявления повреждений, оценки их значений

и степени опасности, прослеживания тенденции развития ситуации в зоне подводных переходов;

- выработка заключения о техническом состоянии ПП МН с указанием типа, местоположения и причин возникновения выявленных повреждений, разработка рекомендаций по их устранению или уменьшению влияния вредных факторов.

Центральным элементом данной разработки является банк данных, который представляет форму систематизации, накопления и анализа информационных массивов, характеризующих состояние подводных переходов в различные периоды времени. Информацию банка данных использует блок "цифровая модель ПП МН" и блок моделирования и прогнозирования ситуации [98].

Специалистами российско-британского предприятия ЧАМ-МЭИ и Московского энергетического института создан программный комплекс "РОСА", в основе которого лежит система математических моделей, позволяющая описывать поведение нефтяных загрязнений в реках. Исходными данными являются:

- характеристики акватории подводного нефтепровода, прилегающего района и аварийных параметров;
- гидрологическая карта моделируемого участка реки, включающая рельеф берегов и ландшафт дна реки с глубинами;
- расход, распределение скоростей течения воды, ее температуры и уровня в одном из сечений реки в разные гидрологические фазы;
- расход, распределение скоростей течения воды, ее температуры и уровня в дельте имеющихся притоков в разные гидрологические фазы;
- характеристики состояния дна;
- метеорологические условия на момент аварии; давление, расход и температура нефти в трубопроводе;
- свойства перекачиваемой нефти;

- координаты места повреждения трубопровода и расход нефтевыброса [29].

Предприятием "Диаскан" разработан программно-методический комплекс расчета конкретного участка магистрального нефтепровода на прочность и остаточный ресурс. Исходными данными для программы являются:

- геометрия дефектов по результатам внутритрубной диагностики; раскладка труб на рассматриваемом участке;
- данные по нагружению (действующие);
- максимальное рабочее давление;
- данные по материалу труб;
- данные по строительству; желательны данные по пространственному положению [100].

В МЭИ разработан программный комплекс на основе методики, представленной в статье [58]. По словам автора, данная разработка позволяет определять долговечность трубопровода с учетом накапливаемых повреждений, а также с учетом циклического характера нагружения. Для достоверной оценки долговечности трубопровода необходимы данные натурных осмотров и исследования труб, проводимые при различных повреждениях, контролях и других обстоятельствах на действующих трубопроводах [58].

В работе [71] использована в качестве инструмента расчета программа оценки напряженно-деформированного состояния в зоне дефекта. Результатом стала цветовая диаграмма распределения уровня напряжений по поверхности искривленного участка с дефектом, а также графики распределения продольных, кольцевых и эквивалентных напряжений в сечении по оболочке исследуемого участка трубы. Исходными данными для расчета является информация о дефекте, типе материала трубы, радиусе скривления.

В институте проблем транспорта энергоресурсов (ИПТЭР - бывший ВНИИСПТнефть) разработаны программы, позволяющие рассчитывать прочность, ресурс и надежность элементов трубопроводов. По словам авторов,

программы дают возможность промоделировать рациональные параметры, испытательное давление, проанализировать разрушения [60]. Но информации о математическом аппарате, положенном в основу разработок, не приводится. Анализ существующих тренажерных систем также посвящена работа [77].

В рамках автоматизации процесса оценки и прогнозирования состояния магистральных трубопроводов создано достаточное количество разнообразных систем и программных комплексов, но ни одна из них не приводит в достаточном объеме математическую модель типового звена магистрального трубопровода, что не дает возможности определить точность и надежность расчетов в данных системах.

1.5. Цель и задачи диссертационной работы

Проведенный в предыдущих разделах анализ состояния магистральных трубопроводов, а также анализ возможных путей повышения срока службы трубопроводной системы показал, что одним из перспективных способов продления срока эксплуатации системы транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов в настоящее время является прогнозирование долговечности трубопроводов в условиях коррозионного износа средствами «виртуального» контроля, а также определение мер по продлению срока службы для конкретного участка на основании сделанного прогноза. Такой системой может стать программно-аналитический комплекс, в основе которого положено семейство моделей, описывающий влияние переменных нагрузок и условий эксплуатации на время до наступления предельного состояния исследуемого участка трубопровода.

Целью диссертации является разработка метода "виртуального" контроля состояния магистрального трубопровода, работающего в реальных условиях при развитии двухсторонней коррозии, а также создание программно-аналитического комплекса, реализующего этот метод.

Объектом исследования является выявление взаимосвязей между долговечностью линейной части магистрального трубопровода и изменяющимися параметрами окружающей среды, перекачиваемой жидкости и применяемых средств защиты трубопроводов в условиях двухсторонней механохимической коррозии и способы контроля текущего состояния ЛЧМТ.

Предметом исследования является непосредственно типовое звено ЛЧМТ.

Для решения поставленной задачи необходимо:

- разработать модель утончения стенки трубы от внутренней и наружной коррозии, учитывающей реальные условия работы трубопровода (изменение режимов и параметров эксплуатации, учет ремонтных и прочих работ) - основу метода контроля состояния магистрального трубопровода;
- разработать алгоритм оценки времени наступления предельного состояния трубопровода для типичных режимов его эксплуатации;
- разработать алгоритм определения начальных скоростей внутренней и наружной коррозии магистральных трубопроводов на базе данных аппаратной диагностики;
- разработать программно-аналитический комплекс на основе созданных алгоритмов для решения прикладных задач;
- обосновать методику оценки экономической эффективности внедрения «виртуального» контроля.