

На правах рукописи



Ли Шуньминь

**Методики и модели мониторинга производственных процессов в
трубопроводных системах**

05.02.22 – Организация производства (радиоэлектроника и приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре инноватики и интегрированных систем качества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

Научный руководитель

Коршунов Геннадий Иванович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Сольницев Ремир Иосифович
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Грибанов Денис Алексеевич
кандидат технических наук,
старший инженер АО «Научно-производственное объединение «Компрессор»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1 –я Красноармейская, д. 1

Защита состоится «22» декабря 2017 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «10» ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04
канд. техн. наук, доцент



Фролова Е.А.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Постоянное совершенствование систем автоматического мониторинга и управления производственными процессами ведет к эффективному функционированию и совершенствованию производственных систем. Особенно это актуально для производственных процессов, осуществляющихся в условиях технических, экологических и экономических рисков.

На данный момент одной из наиболее актуальных задач исследований в области приборного обеспечения производственных процессов является разработка методик и моделей мониторинга производственных процессов в трубопроводных системах с целью уменьшения потерь энергоресурсов и обеспечения безопасности.

Организация мониторинга производственных и вспомогательных процессов транспортировки и хранения энергоносителей являются актуальной темой исследований, в том числе в области обеспечения безопасности данных процессов. Кроме того, актуальность темы исследований подчеркивается в программе энергетической стратегии России на период до 2030 года, в которой одной из основных принципов в сфере энергетической безопасности является обеспечение надежного функционирования и предсказуемого развития энергетической инфраструктуры (глава V «Государственная энергетическая политика»).

Задачи организации процессов транспортировки и хранения энергоносителей, связанные с увеличением надежности производственно-технических систем и сопутствующие проблемы экологии и безопасности, рассмотрены в работах Р.И.Сольничева, В.В.Ефимова, Г.И.Коршунова, А.Г.Гумерова, В.Л.Березина, Р.С.Зайнуллина, А.П.Гусенкова, Н.А.Махутова, О.М. Иванцова и др., а также в работах зарубежных исследователей Д.Ф.Кифнера, Г.Хана, М.Саррата, А.Розенфилда и др. Разработку и производство приборов для обеспечения безопасности и мониторинга процессов, связанных с транспортировкой и хранением энергоносителей выполняют ведущие предприятия РФ, такие как ОАО «Авангард», ИМАШ РАН, ВНИИСТ, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и др.

В то же время в недостаточной степени разработаны модели и методы, обеспечивающие организацию мониторинга и повышение эффективности организации процессов транспортировки и хранения энергоносителей на промышленных объектах в условиях воздействия возможных нештатных и чрезвычайных ситуаций.

Цель исследования

Целью работы является обеспечение надежности транспортировки и хранения энергоносителей на основе разработки методик и моделей мониторинга процессов в трубопроводных производственно-технических системах.

Задачи исследования

Для реализации цели в работе ставится и решается ряд задач:

- разработать модель управления рисками для оценки надежности процесса транспортировки энергоносителей в трубопроводных системах, учитывающую автоматизацию производственно-технической системы и средств мониторинга.

- разработать математическую модель и методику оценки надежности трубопроводных систем и компонентов на основе интегрированного критерия динамической надежности в процессе транспортировки энергоносителей в условиях внезапных перепадов давления;

- разработать методику построения зоны опасности относительно потенциально-опасного объекта для хранения энергоносителей, обеспечивающая их функционирование в условиях воздействия возможных нештатных и чрезвычайных ситуаций.

Предмет исследования – модели и методики мониторинга производственных процессов в трубопроводных системах.

Объект исследования – процесс транспортировки энергоносителей в трубопроводных системах.

Методы исследований

Работа основана на использовании элементов теории оптимизации, менеджмента качества, теории надежности, теории принятия решений, теории вероятностей. В работе использовалась методология процессного подхода.

Научная новизна

В результате выполненного исследования получены следующие новые результаты:

1. Разработана модель управления рисками процесса транспортировки энергоносителей с учетом применения автоматизированной производственно-технической системы для мониторинга потенциально опасных участков трубопровода.

2. Разработана математическая модель надежности трубопроводных систем и компонентов на основе интегрированного критерия динамической надежности в процессе транспортировки энергоносителей, отличающиеся наличием условия внезапных перепадов давления.

3. Разработана методика оценки надежности трубопроводных систем и компонентов в динамическом процессе транспортировки энергоносителей, в условиях внезапных перепадов давления с целью мониторинга производственных процессов.

4. Разработана методика построения зоны опасности относительно потенциально-опасного объекта для хранения энергоносителей, обеспечивающая их функционирование в условиях воздействия возможных нештатных и чрезвычайных ситуаций.

Практическая значимость

Практическая значимость проведенного исследования заключается в обеспечении надежности процесса транспортировки энергоносителей на основе корректного применения средств мониторинга и установки приборов и средств коммуникации в потенциально опасных точках. Полученные результаты позволяют выполнить функции организации, планирования и управления рисками процессов транспортирования и хранения энергоносителей.

Применение указанных методик и моделей в компании «Shanghai Xi Sheng Industrial Co. Ltd.» (Китай) при организации процесса перелива взрывопожароопасных веществ обеспечило повышение надежности наливной системы на 11%; повышение надежности всей системы на 9%; повышение скорости наполнения на 13%.

Использование результатов исследований в компании ООО «Российские мониторинговые системы» обеспечило повышение оперативности эксплуатации, снижение рисков процесса транспортировки энергоносителей, прогнозирование

надежности трубопроводов в условиях внезапных перепадов давления, повышение надежности на 5-10%.

Применение результатов исследований в ОАО «СОКОЛ» обеспечило повышение надежности эксплуатации производственных объектов, снижение рисков процессов транспортировки энергоносителей и хранения горючих материалов.

Разработанные в диссертационной работе модели позволили оценить надежность компонента трубопроводной системы - шарового кран в быстроразъемном устройстве (БРУ) наливной системы.

Тематика работы соответствует областям исследования пп. 8, 9, 10, 12 паспорта специальности 05.02.22 – «Организация производства».

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

1. Модель управления рисками процесса транспортировки энергоносителей в трубопроводных системах с учетом применения автоматизированной производственно-технической системы и средств мониторинга потенциально опасных участков трубопровода на основе оценки надежности.

2. Математическая модель надежности трубопроводных систем и компонентов на основе интегрированного критерия динамической надежности транспортировки энергоносителей в условиях внезапных перепадов давления.

3. Методика оценки надежности трубопроводных систем и компонентов в динамическом процессе транспортировки энергоносителей в условиях внезапных перепадов давления.

4. Методика построения зоны опасности относительно потенциально-опасного объекта для хранения энергоносителей, обеспечивающая их функционирование в условиях воздействия возможных нештатных и чрезвычайных ситуаций.

Апробация результатов

Основные положения, защищаемые идеи, теоретические положения, научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на Научной сессии ГУАП (Санкт-Петербург) и на конференции «3-rd China Command and control Conference».

Публикации по теме работы

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, из них 5 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях,; 2 - в сборнике докладов научной сессии ГУАП, Санкт-Петербург, 3 - в зарубежных изданиях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников, содержащих 100 наименований, и 3 приложений.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, основные задачи, объект и предмет исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первом разделе рассмотрены виды энергоносителей, а также их значение роль в производственных процессах промышленного предприятия, проведен анализ видов транспортировки энергоносителей, в том числе с помощью трубопроводных

систем. Проведен анализ особенностей транспортировки энергоносителей, а также представлен сравнительный анализ существующих проектных решений процесса транспортировки энергоносителей. Рассмотрен процесс автоматизации системы управления и контроля трубопроводными системами в процессе транспортировки энергоносителей.

Под энергоносителями в промышленности понимают материальное тело или материальную среду, обладающую определенным потенциалом и передающую энергию от одного материального тела к другим. Промышленные предприятия при организации своей деятельности используют энергоносители различных параметров, различных видов и различного назначения. Чаще всего в качестве энергоносителей на предприятии используются: углеводородное топливо; электроэнергия; энергия воды; энергия воздуха; продукты разделения воздуха; расплавы и соли.

Основной задачей энергоносителей является обеспечение бесперебойного функционирования технологического процесса на предприятии. При выборе типа энергоносителя в первую очередь учитывают условие невысокой стоимости. При этом необходимо учитывать ряд факторов, влияющих на производственный процесс:

- особенности технологического процесса на производстве;
- характеристики и особенности эксплуатируемого оборудования;
- технические параметры рассматриваемого энергоносителя;
- условия и тип транспортировки и хранения энергоносителей на предприятии.

При использовании взрывопожароопасных энергоносителей основными проблемами будут являться обеспечение надежности процесса транспортировки и обеспечение безопасности при хранении энергоносителей.

Одним из наиболее распространенных видов энергоносителей является углеводородное топливо (нефть и нефтепродукты, газ, уголь и т.п.), в силу того что перевозки обычно осуществляются в больших количествах, транспортировка углеводородного топлива производится чаще одним из следующих путей: перевозка железнодорожным транспортом; перевозка морскими танкерами; транспортировка по нефтепроводам; перевозка автотранспортом.

Вне зависимости от способа транспортировки, этот процесс необходимо проводить с соблюдением требований безопасности, используя системы мониторинга и контроля различных параметров (давления, температуры, влажности, загазованности и т.п.).

На данный момент наиболее распространена и имеет активное развитие транспортировка по трубопроводным системам (Дружба, Хабаровск – Комсомольск-на-Амуре, Уренгой – Помары – Ужгород, Ямал– Европа, Северный поток, Турецкий поток и др.). Технически сложные подводные трубопроводные системы транспортировки энергоносителей большой протяженностью относятся к основным опасностям и являются одним из главных факторов экологического риска. Длительные сроки эксплуатации трубопроводов и динамически изменяющиеся параметры транспортировки нефтепродуктов ведут к увеличению числа механических дефектов и развитию усталостных повреждений в металле труб, что в свою очередь ведет к возможности возникновения аварии. Степень тяжести токсического загрязнения окружающей среды в зоне разлива нефти, как правило, определяется масштабами утечки и характером аварийной ситуации (трещина в трубопроводе, разрыв магистрали и т.д.).

На этапе хранения необходимо обеспечить пожаробезопасность и сохранность свойств энергоносителей, с этой целью энергоносители помещаются в специальные хранилища, которые представляют собой стальные надземные или железобетонные полуподземных резервуары, соответствующие определенным техническим требованиям и оборудованные приборами и автоматизированными системами мониторинга и контроля.

Существующие системы трубопроводов обеспечивают транспортировку углеводородного топлива в огромных количествах на протяжении длительного срока службы, что приводит к их износу и снижению увеличению технических и экологических рисков.

Во втором разделе проведен детальный анализ процесса транспортировки энергоносителей, рассмотрена производственно-техническая система загрузки/выгрузки энергоносителя, включающая в себя приборные системы мониторинга и контроля загрузки/выгрузки энергоносителей. На основе анализа производственных процессов транспортировки энергоносителей были выявлены наиболее критичные риски по методу FMEA и осуществлен по каждому из них расчет. Разработана модель управления рисками процесса транспортировки энергоносителей с учетом применения автоматизированной производственно-технической системы для мониторинга потенциально опасных участков трубопровода.

Любое оборудование, используемое в процессе транспортировки, должно обеспечивать работу в пожароопасной среде, поэтому любые проблемы оборудования могут привести к опасности жизни человека, экономическим потерям и загрязнению окружающей среды. Особенно важно обеспечение надежности всех задействованных систем, которую можно достичь за счет высокой степени автоматизации. Автоматизированное управление производственно-технической системой транспортировки энергоносителей позволяет существенно повысить надежность и обеспечить высокую эффективность протекания процессов и их контроля (рисунок 1).

Рассматриваемая система (рис.1) используется для контроля и управления процессами транспортировки энергоносителей по системе трубопроводов в резервуары хранилища и включает в себя:

- автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (оборудование серверов и телекоммуникационное оборудование);
- программируемые логические контроллеры (принимают и обрабатывают информацию, полученную от датчиков, установленных как на танкере, так и на оборудовании причалов);
- датчики (давления, температуры, плотности, расхода и уровня нефтепродуктов, преобразователи, контрольно-измерительные приборы и т.п.).



Рисунок 1 – Структура производственно-технической системы загрузки/выгрузки энергоносителя

АРМ оператора обеспечивает мониторинг и управление процессами загрузки/выгрузки энергоносителей в режиме реального времени, регистрацию функционирования всех элементов системы. Кроме этого в системе применяются интеллектуальные исполнительные устройства: клапаны с интеллектуальными приводами, система вентиляции, устройства подогрева энергоносителя и контроля загазованности, устройства и системы пожаротушения.

Контроль и управление системой автоматизации загрузки/выгрузки энергоносителя осуществляется по сети Ethernet. Сигналы от датчиков и контрольно-измерительных приборов поступают на программируемые логические контроллеры, обрабатываются и передаются на АРМ оператора. После этого системой формируются управляющие сигналы и передаются на соответствующие исполнительные устройства и органы.

Управление технологическими процессами загрузки/выгрузки энергоносителя и отдельными узлами системы осуществляется как с сенсорных панелей, так и с рабочих станций операторов (рис.2). Типовая система мониторинга содержит унифицированные аналоговые и дискретные каналы ввода/вывода и приборы контроля параметров, определяющие внешние воздействующие факторы.

Автоматизированная система выполняет функции перелива и учета энергоносителя, мониторинга работы всех элементов системы управления, хранения информации, непрерывного контроля параметров.

Система загрузки/выгрузки энергоносителя обеспечивает стабильность технологических параметров. Автоматизация основных и вспомогательных процессов значительно снижает возможность ошибки в действиях оператора и позволяет получать подробную информацию о работе оборудования.

Автоматизированная система мониторинга загрузки/выгрузки энергоносителей

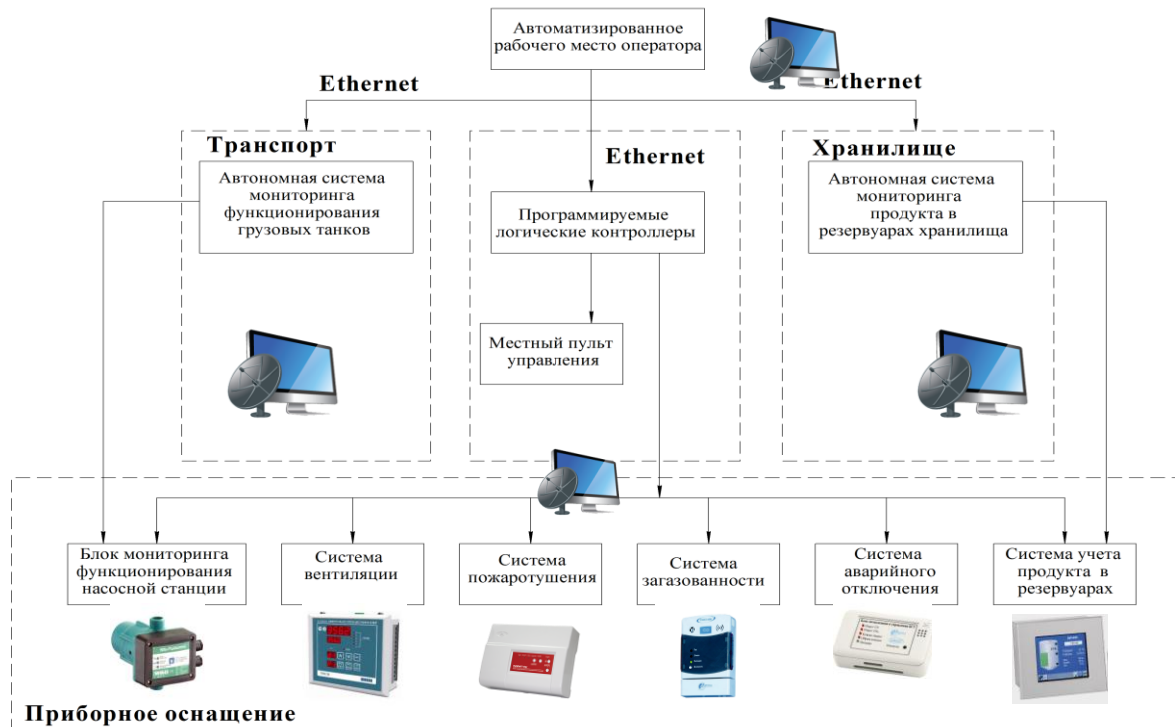


Рисунок 2 – Структура автоматизированного управления производственно-технической системой загрузки/выгрузки энергоносителя

Работа такой системы требует всестороннего анализа различных рисков как технологического, так и экологического характера. С этой целью разработана **модель управления рисками для оценки надежности процесса транспортировки энергоносителей в трубопроводных системах, учитывающую автоматизацию производственно-технической системы и средств мониторинга, представляющая первый результат исследований**, выносимый на защиту (п. 9 паспорта научной специальности).

В рамках диссертационного исследования идентифицированы и проанализированы рисковые ситуации, приводящие к возникновению различного рода дефектов, таких как повреждения оборудования, сырья, транспорта и т.п. С целью предупреждения и выработки возможных противодействий в отношении отслеживаемых отказов, а также уменьшения вероятности возникновения рисковых ситуаций в процессе транспортировки энергоносителей с помощью трубопроводной системы в условиях внезапных перепадов давления использован метод FMEA, который обеспечил системность в обнаружении причин и вероятности возникновения последствий.

В соответствии с предложенной процедурой в ГОСТ Р 51901.12 «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов» осуществлена оценка выявленных рисков в процессе транспортировки энергоносителей с помощью трубопроводной системы в условиях внезапной нагрузки давления по методу FMEA. Данный метод позволил осуществить расчет S – оценки значимости дефекта; O – оценки вероятности возникновения дефекта; D – оценки вероятности своевременного обнаружения дефекта, который зависит от тяжести последствий отказов и определяется с помощью 10-балльной шкалы. Согласованность экспертной группы выявлена с помощью коэффициента конкордации, равного 0,87. Определено приоритетное число риска дефекта – ПЧР (комплексная оценка

риска с учетом коэффициента конкордации рабочей команды по FMEA): $PЧР = S \times O \times D$ (от 1 до 1000 баллов), и $PЧР_{гр}$ – критическую границу для ПЧР.

Для каждого дефекта с $PЧР > PЧР_{гр}$ — FMEA-команда предпринимает усилия по снижению расчетного показателя посредством доработки производственного процесса, обеспечивая снижения характеристик рисков S и/или O и/или D .

Результаты анализа по методу FMEA оформляется протоколом по рекомендуемой форме, содержащим первичную и повторную оценку рисков после доработки технологии.

В результате анализа и оценки выявлены наиболее критичные риски

Разработанная модель позволяет произвести комплексную оценку рисков, исходя из которой определен наиболее опасный дефект в процессе транспортировки энергоносителей - низкая надежность трубопроводов.

В третьем разделе разработана математическая модель надежности трубопроводных систем и компонентов на основе интегрированного критерия динамической надежности транспортировки энергоносителей в условиях внезапных перепадов давления представляют второй результат исследований, выносимый на защиту (п. 8, 12 паспорта научной специальности). Представлены оценки критерия надежности и динамической надежности. Описаны отношения прочности, нагрузки, надежности компонентов с изменением времени для поддержки принятия решений при организации процессов.

Надежность (вероятность безотказной работы) всей производственно-технической системы (R_s), будет зависеть от надежности ее компонентов: подсистемы трубопроводов (R_t); подсистемы резервуаров (R_z); наливной подсистемы (R_n):

$$R_s = R_t \cdot R_z \cdot R_n \quad (1)$$

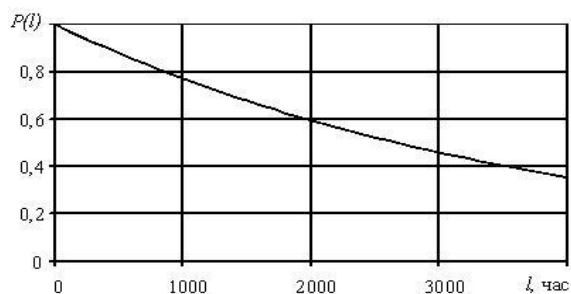


Рисунок 3 - Вероятность безотказной работы трубопроводной системы

В зависимости от замены тех или иных элементов системы или внедрения технологических инноваций (элементов трубопроводной системы), их надежность будет меняться, и как следствие изменится надежность всей системы. При этом необходимо учитывать изменения вероятности безотказной работы в зависимости от времени (рис.3).

Эксплуатация систем трубопроводной транспортировки энергоносителей представляет повышенную опасность. Увеличение объемов транспортировки содержит угрозы не только для жизни, но и для загрязнения окружающей среды, экосистемы и порчи имущества. В связи с этим оценка и повышение надежности процесса перелива транспортировки энергоносителей минимизирует риски, связанные с обеспечением безопасности за счет своевременной замены компонентов трубопроводной системы.

Одним из наиболее ответственных компонентов в производственно-технической системе транспортировки энергоносителей является наливная система, обеспечивающая ее загрузку/выгрузку. На основе детального анализа процесса загрузки/выгрузки определен основной критерий обеспечения безопасности данного процесса, который позволяет оценить надежность трубопроводных систем

наливного блока в условиях динамических нагрузок. Критерий динамической надежности определен исходя из необходимости оценки динамических процессов в трубопроводных системах.

При решении задачи оценки динамической надежности для практического применения определен критерий динамической надежности, а также использована модель случайного процесса и процесса действия внезапной случайной нагрузки, которые позволяют моделировать процесс деградации прочности компонентов системы. Уравнение состояния для предельного состояния:

$$g(X) = r - \sigma, \quad (2)$$

где r – прочность материалов;

σ – напряжение;

X – вектор случайной величины.

$$\begin{cases} g(X) \leq 0, \text{ состояние отказа} \\ g(X) > 0, \text{ состояние работоспособности.} \end{cases} \quad (3)$$

Предложенная модель для анализа надежности используется в обстоятельствах, когда прочность и напряжение незначительно изменяются в зависимости от времени.

Прочность и напряжение рассмотрены как случайные величины. В соответствии с определением коэффициента надежности можно получить:

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(X)]}{\sqrt{\text{Var}[g(X)]}}, \quad (4)$$

где: μ_g и σ_g – средняя величина и стандартное отклонение функции состояния.

Когда основная случайная величина – вектор X соответствует нормальному распределению, оценочная функция надежности имеет вид:

$$R = \phi(\beta), \quad (5)$$

где: ϕ – стандартная нормальная функция распределения.

Для системы перелива энергоносителей должны быть учтены влияние внешних факторов и рабочей среды, деградация прочности и изменение случайной нагрузки. Если представить прочность и напряжение случайным процессом, уравнение состояния примет вид:

$$g(X, t) = r(t) - \sigma(Y, t), \quad (6)$$

где $r(t)$ – случайный процесс деградации прочности,

$\sigma(Y, t)$ – случайный процесс нагрузки,

Y – вектор случайной величины, связанный с эффектом действия нагрузки.

Динамический коэффициент надежности и динамическую надежность имеет вид

$$\beta(t) = \frac{\mu_{g(t)}}{\sigma_{g(t)}} = \frac{E[g(X, t)]}{\sqrt{\text{Var}[g(X, t)]}}, \quad (7)$$

$$R(t) = \phi(\beta(t)) = P\{r(t) > \sigma(Y, t) / t \in [0, t]\}, \quad (8)$$

Формула (8) представляет критерий – вероятность, того, что прочность компонента в каждый момент жизненного цикла t более действия нагрузки, и он находится на надежном состоянии. Таким образом, выполнена оценка надежности

участков трубопроводных систем с целью наиболее корректной организации процессов транспортировки и хранения энергоносителей.

Разработанная методика оценки надежности трубопроводных систем и компонентов в динамическом процессе транспортировки энергоносителей, в условиях внезапных перепадов давления с целью мониторинга производственных процессов представляет третий результат исследований, выносимый на защиту (п. 8 паспорта научной специальности).

В первом случае, когда внешняя нагрузка является постоянной и подчиняется определенному распределению, средняя величина и вариация нагрузки в каждый момент не изменяются и подлежат к однотипному распределению, поэтому функция может быть представлена как

$$g(X, t) = \min r(X, t) - \sigma. \quad (9)$$

Во втором случае, когда нагрузка изменяется в зависимости от времени и не подчиняется известным распределениям, для определения функции распределения вероятности случайной величины нагрузки принята следующая модель:

- а) делят базовый период T на n равных отрезков времени τ , т.е. $\tau = T/n$;
- б) определяют функцию распределения вероятности $F\tau(x)$ максимального значения нагрузки S_i на отрезке τ по наборам статистик;
- с) предполагают, что S_i на каждом отрезке взаимно независимы, и имеет одинаковую функцию распределения $F\tau(x)$;

По принципу распределения экстремальных значений максимального члена задают функцию распределения максимальной нагрузки S_i на n последовательных отрезках (в эквиваленте - базовый период T):

$$F\tau(x) = P\left(\max_{1 \leq i \leq n} S_i \leq x\right) P(S_1 \leq x) P(S_2 \leq x) \dots P(S_n \leq x) = \prod_{i=1}^n P(S_i \leq x) = [F\tau(x)]^n, \quad (10)$$

Определение распределения n максимальных взаимно независимых случайных величин, является распространенной операцией в теории вероятностей, но когда величина n достаточно велика, определение распределения максимальной величины и статистических параметров представляется сложным, и здесь максимальное распределение случайных величин нескольких независимых нормальных распределений представляется распределением типа I экстремального значения, которое позволяет определить, что средняя величина и дисперсия случайной величины Z_n эквивалентной максимальной нагрузки находятся по формулам (11)

$$E(Z_n) = \frac{0.5772}{a_n} + u_n, \quad \text{Var}(Z_n) = \frac{\pi^2}{6a_n^2}, \quad (11)$$

где в формуле 0,5772 – постоянная Эйлера.

Преобразование функции распределения эквивалентной нагрузки в случайный процесс нагрузки, изменяющейся в зависимости от времени, позволяет получить расчетную формулу надежности под действием случайного процесса нагрузки в виде:

$$R(t) = P\{r > \max \sigma(Y, t) / t \in [0, T]\}, \quad (12)$$

где $\max \sigma(Y, t)$ является максимальным эффектом эквивалентной нагрузки в случайном процессе нагрузки. Данная формула показывает, что когда прочность на каждом отрезке назначенного срока службы T превышает прочность компонентов, компоненты трубопровода могут находиться на надежном состоянии.

В случае, когда прочность изменяется в зависимости от времени, разобьем случайный процесс нагрузки $\sigma(Y, t)$ на n случайных величин S_i . Одновременно разобьем случайный процесс прочности $r(t)$ на n случайных величин r_i , в качестве размера которых принимаются средние величины прочности в i -й отрезках. Так случайные изменения прочности в проектный период вместе разбиты на n образцов, одна дискретная случайная величина нагрузки S_i и одна дискретная случайная величина прочности r_i образуют группу, то целый проектный период службы составит одну последовательную систему. По определению надежности последовательной системы, система надежна, если работоспособна каждая подсистема, поэтому надежность трубопровода выражается как

$$R(t) = P \left[\bigcap_{i=1}^n (r_i > S_i) \right]. \quad (13)$$

При предположении о взаимной независимости между S_i и r_i ($i=1, 2, \dots, n$), формула (13) выразится как:

$$R(t) = \int_0^\infty \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \prod_{i=1}^n F_\tau(r_i) f_{r_1, r_2, \dots, r_n}(r_1, r_2, \dots, r_n) dr_1 dr_2 \dots dr_n, \quad (14)$$

где $f_{r_1, r_2, \dots, r_n}(r_1, r_2, \dots, r_n) dr_1 dr_2 \dots dr_n$ – совместная функция плотности вероятности r_1, r_2, \dots, r_n , $F_\tau(\cdot)$ – функция распределения вероятности S_i .

В результате упрощений и преобразований остаточная модель прочности примет вид

$$r(n) = r_0 - [r_0 - S_p] (n/N)^c, \quad (15)$$

где α_T – коэффициент распределения типа I;
 r_0 – начальная прочность;
 S_p – пик нагрузки во времени разрушения;
 n/N – отношение продолжительности;
 c – показатель.

Здесь отметим, N – общий индекс цикла нагрузки, т.е. продолжительность жизни трубопровода, который можно рассматривать на времени T ; n – номер действия нагрузки, который можно рассматривать во время действия нагрузки t . Это позволяет представить остаточную модель прочности во времени.

Ранее был представлен случайный процесс нагрузки на n дискретных отрезках, и получена функция распределения максимальной эквивалентной нагрузки в процессе действия нагрузки, поэтому теперь можно рассматривать пик нагрузки во время разрушения в период $[(i-1)\tau, i\tau, i=1, 2, \dots, n$; $\sigma(S_{\max})$ является максимальным эквивалентным эффектом. На основании анализа остаточная функция прочности, изменяющаяся в зависимости от времени, может быть выражена как $r(n) = r_0 - [r_0 - \sigma(S_{\max})] (t/T)^c$, где r_i – остаточная прочность трубопровода в $t=i$.

Для удобного составления программы и повышения скорости расчеты деградации прочности не выполняют во время начального действия нагрузки, а интервалы времени равны. Поэтому при действии переменной случайной нагрузки функция трубопроводов должны быть выражена как:

$$g(x, t) = r(t) - \sigma(Y, t) = -\frac{1}{a_\tau} \ln \left\{ \frac{1}{t} \sum_{i=1}^n \exp \left\{ -a_n \left[r_0 - (r_0 - \sigma(S_{\max})) \left(\frac{t}{T} \right)^c \right] \right\} \right\} - \sigma(S_{\max}) \quad (16)$$

Применяя (16) в (7) и (8), можно получить динамический коэффициент надежности и соответствующую динамическую надежность.

Для количественной оценки по критерию динамической надежности необходимо определить показатели и их математическое выражение:

$$K_H = K_{H\text{дейст}} / K_{H\text{внедр}}, \quad (17)$$

где K_H - показатель динамической надежности;

$K_{H\text{дейст}}$ - количественное значение действительного показателя динамической надежности;

$K_{H\text{внедр}}$ - количественное значение показателя динамической надежности после внедрения технических инноваций в состав трубопроводных систем.

Предложенная математическая модель динамической надежности компонентов позволила получить критерий динамической надежности и оценить соответствующую динамическую надежность. Для назначенного срока службы определено влияние различных параметров на надежность частей трубопровода и других механических компонентов. На основе расчетов определен состав и структура системы мониторинга процессов транспортировки и хранения энергоносителей.

На основе разработанной математической модели апробирована методика оценки надежности шарового крана в быстроразъемном устройстве наливной системы, имеющая практическое значение для организации процессов загрузки/выгрузки жидких энергоносителей.

В четвертом разделе рассматриваются вопросы обеспечения безопасности персонала и материально-технической базы на промышленных объектах, используемых для хранения нефти и нефтепродуктов, в условиях воздействия возможных чрезвычайных ситуаций (пожара). Рассмотрены и формализованы основные поражающие факторы, учитываемые при построении зон опасности на промышленных объектах. Приведены расчеты минимально-допустимого удаления границы по термическому воздействию для различных видов пожара (разлития, типа «огненного шара», горение зданий и промышленных объектов). **Методика построения зоны опасности относительно потенциально-опасного объекта для хранения энергоносителей, обеспечивающая их функционирование в условиях воздействия возможных нештатных и чрезвычайных ситуаций** представляет **четвертый результат исследований**, выносимый на защиту (п. 12 паспорта научной специальности).

Методика построения зоны опасности относительно заданного потенциально-опасного объекта (ПОО) основана на определении частных зон опасного действия, позволила корректно использовать приборы контроля параметров внешних воздействующих факторов, передачу и обработку информации для принятия управленческих решений, обеспечить безопасность процесса хранения энергоносителей.

В качестве поражающих факторов, учитываемых при построении зон опасности, рассмотрены: барическое действие ударной волны; термическое воздействие пожаров; токсическое воздействие химических опасных веществ; радиоактивное воздействие; механическое действие осколков и обломков (элементов) конструкций и строений.

Для каждого ПОО заранее определяются данные, содержащие контролируемые параметры (расположение сооружений и коммуникации, описание

инфраструктуры предприятия в зоне ПОО, расположение систем мониторинга и управления производственными процессами предприятия и т.п.), которые характеризуют возможное развитие ЧС применительно к каждому поражающему фактору. В зависимости от расположения элементов системы мониторинга от ПОО выбрано приборное оснащение с соответствующими эксплуатационными характеристиками (теплостойкость, огнестойкость, виброустойчивость, влагонепроницаемость и т.д.)

Минимально-допустимое удаление границы по термическому воздействию рассчитывается как:

$$R^{\text{терм.}}(\varphi) = \max\{R^{\text{терм.ч}}(\varphi), R^{\text{терм.м}}(\varphi)\}, \quad (18)$$

где $R^{\text{терм.ч}}(\varphi)$, $R^{\text{терм.м}}(\varphi)$ - минимально-допустимое удаление опасной границы от центра объекта в направлении, заданном полярным углом φ , по критическому термическому воздействию на человека (обслуживающий и производственный персонал) и на машины (транспортные средства), соответственно.

Минимально-допустимые удаления границы опасной зоны по критическому уровню термического воздействия на персонал и транспортные средства рассчитаны из условия непревышения заданной степени поражения людей и заданной степени разогрева топливных баков транспортных средств при возникновении пожара на ПОО. Формализованное представление данных условий различается в зависимости от вида пожара на ПОО. Так, для пожаров разлития и типа «огненного шара» условие для определения безопасного удаления от центра пожара по поражению личного состава представляется как условие непревышения ожидаемой вероятности его поражения от действия термического фактора над заданным максимально-допустимым пороговым значением.

Выражение для определения границы опасной зоны персонала и транспортных средств при горении промышленных объектов и зданий имеет вид:

$$R_{\text{Гр.Об.}}^{\text{гр.}} = 0,282R^* \sqrt{q^{\text{cob.}}/q^{\text{кр.}}}, \quad (19)$$

$$R^* = \begin{cases} \sqrt{l \cdot h} & \text{для горящих зданий,} \\ 1,75 \div 2,0\sqrt{l \cdot h} & \text{для горящего штабеля пиломатериалов,} \\ D^{\text{рез.}}, & \text{для горящего резервуара с горючими газами,} \\ 8D^{\text{рез.}}, & \text{для горящего резервуара с жидкими нефтепродуктами,} \end{cases} \quad (20)$$

где $R_{\text{Гр.Об.}}^{\text{гр.}}$ - удаление от центра ПОО границы опасной зоны по критической степени поражения персонала и транспортных средств при горении промышленных объектов и строений;

R^* - приведенный размер очага горения;

l - длина объекта горения;

h - высота объекта горения;

$D^{\text{рез.}}$ - диаметр резервуара для хранения газообразных и жидких углеводородных горючих веществ;

$q^{\text{cob.}}$ - плотность теплового потока пламени пожара. Данная величина определяется в соответствие с видом горючего вещества;

$q^{\text{кр.}}$ - критическое значение плотности теплового потока падающего излучения. Данная величина для персонала принимается равной 15 кВт/м^2 , а для

транспортных средств берётся равной критическому тепловому потоку при тепловом воздействии на ёмкости с нефтепродуктами с температурой воспламенения $\leq 235^\circ \text{C}$ при заданной продолжительности теплового воздействия.

Определение величины вероятности поражения в зависимости от значений пробит-функции осуществляется с помощью выражения:

$$P^{\text{пор.}}(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}-5} e^{-t^2/2} dt, \quad (21)$$

В качестве итогового значения величины удаления границы опасной зоны от центра ПОО на заданном направлении выбирается наибольшее из всех рассчитанных значений удаления:

$$R_{\text{терм.}}^{\text{гр.}}(\phi) = \max\{R_{\text{разл.шар.}}^{\text{гр.л.с.}}(\phi); R_{\text{разл.шар.}}^{\text{гр.тр.сп.}}(\phi); R_{\text{Пр.Об.}}^{\text{гр.}}\}, \quad (22)$$

Предложенная методика построения зоны опасности относительно заданного потенциально-опасного объекта, на основе определении частных зон опасного действия позволила смоделировать условия воздействия пожара по следующим факторам: действие ударной волны, термическое действие пожаров, токсическое действие отравляющих химических и биологических веществ, радиационное действие радиоактивных веществ и механическое действие осколков (элементов конструкций). Рассматриваемые факторы наиболее полно отражают степень воздействия пожара на обслуживающий и вспомогательный персонал и транспортные средства и являются основанием для формирования требований для выбора приборов контроля и организации мониторинга.

Исходя из того, что одним из наиболее опасных факторов, влияющим на безопасность персонала является термическое воздействие, определены минимально-допустимые удаления границы опасной зоны по критическому уровню термического воздействия на персонал, в зависимости от разных видов пожара (разлития, типа «огненного шара», горение зданий и промышленных объектов).

Определение зоны опасности относительно заданного объекта позволило обеспечить повышение эффективности организации процессов хранения энергоносителей на промышленных объектах в условиях воздействия возможных нештатных и чрезвычайных ситуаций с использованием систем мониторинга и приборов контроля.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута заявленная цель, поставленные задачи решены.

Основные результаты и выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработана модель управления рисками для оценки надежности процесса транспортировки энергоносителей в трубопроводных системах, учитывающую автоматизацию производственно-технической системы и средств мониторинга.

2. На основе анализа процессов транспортировки энергоносителей разработана математическая модель оценки надежности трубопроводных систем и компонентов на основе интегрированного критерия динамической надежности в процессе транспортировки энергоносителей в условиях внезапных перепадов давления. Описаны отношения прочности, нагрузки, надежности компонентов с изменением времени для поддержки принятия решений.

3. Исходя из тенденции постоянного совершенствования систем транспортировки энергоносителей рассмотрены вопросы обеспечения надежности всей производственно-технической системы транспортировки, и наливной подсистемы в частности, выбора сенсоров и приборов контроля. Разработана методика оценки надежности трубопроводных систем и компонентов на основе интегрированного критерия динамической надежности в процессе транспортировки энергоносителей в условиях внезапных перепадов давления для обеспечения их мониторинга с помощью приборов контроля.

4. Разработана методика построения зоны опасности относительно заданного потенциально-опасного объекта, с целью обеспечения безопасности персонала и материально-технической базы на промышленных объектах, используемых для хранения энергоносителей.

Рассмотрены и формализованы основные поражающие факторы, учитываемые при построении зон опасности и выборе приборов на промышленных объектах. Приведены расчеты минимально-допустимого удаления границы по термическому воздействию для различных видов пожара (разлития, типа «огненного шара», горение зданий и промышленных объектов).

5. На основе разработанной математической модели была апробирована методика оценки надежности трубопроводных систем и компонентов в условиях внезапных перепадов давления.

Выполненная модернизация наливной подсистемы в компании «Shanghai Xi Sheng Industrial Co. Ltd.» (Китай) позволила повысить надежность как самой наливной подсистемы, так и всей производственно-технической системы транспортирования. В связи с этим были получены следующие результаты:

- повышение надежности наливной системы на 11%;
- повышение надежности всей системы на 9%.

Использование результатов исследований в компании ООО «Российские мониторинговые системы» обеспечило повышение оперативности эксплуатации, снижение рисков процесса транспортировки энергоносителей, прогнозирование надежности трубопроводов в условиях внезапных перепадов давления, повышение надежности на 5-10%.

Применение результатов исследований в ОАО «СОКОЛ» обеспечивает повышение надежности эксплуатации производственных объектов, снижение рисков процессов транспортировки энергоносителей и хранения горючих материалов.

6. Результаты диссертационной работы использованы в деятельности компаний «Shanghai Xi Sheng Industrial Co. Ltd.» (Китай), ООО «Российские мониторинговые системы» и ОАО «СОКОЛ», что подтверждается актами внедрения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о повышении результативности процессов транспортирования, загрузки-выгрузки и хранения энергоносителей на основе разработанных методик, моделей и критериев, обеспечивающих корректное применение автоматизированных систем и приборов контроля.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах:

1. Ли, Шуньминь. Сокращение времени производственного цикла морской транспортировки нефти на основе внедрения методов менеджмента и технологических инноваций / Г.И.Коршунов, Ли Шуньминь// Информационно-управляющие системы. 2013. №5 (66). С..86-92.
2. Ли, Шуньминь. Система управления и отображения информации для обеспечения безопасной перегрузки жидких углеводородов при морской транспортировке / Г.И.Коршунов, Ли Шуньминь// Вопросы радиоэлектроники. 2015. №1.С.94-104.
3. Ли, Шуньминь. Надежность трубопроводных систем для объектов повышенной опасности в условиях динамических нагрузок / Г.И.Коршунов, Ли Шуньминь// Вопросы радиоэлектроники 2016. №6. С.14-18.
4. Li, Shunmin. Assurance of reliability and safety in liquid hydrocarbons marine transportation and storing / G.I. Korshunov, S.L. Polyakov, Li, Shunmin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. EES №87, 2017, pp.57-63
5. Ли, Шуньминь. Обеспечение безопасности процесса хранения углеводородных горючих веществ на промышленных объектах / Г.И.Коршунов, Ли Шуньминь, С.Л. Поляков // Вопросы радиоэлектроники. 2017. №5. С.20-24.

Научные работы в других изданиях:

- 6.Ли, Шуньминь. Организация эффективного контрактного производства на основе технологических инноваций / Г.И. Коршунов, Ли Шуньминь, С.Л. Поляков // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: В 3 ч. Ч. I. Технические науки / СПб.: ГУАП, 2012. С.166-168.
- 7.Ли, Шуньминь. Модели, методы и технологические инновации для организации морской транспортировки нефти / Г.И. Коршунов, Ли Шуньминь // Научная сессия ГУАП: сб. докл.: В 3 ч. / СПб.: ГУАП, 2013. С. 158-169.
8. Li Shun Min, A fleet combat mission planning methods and key technology research/ ZengPeng, Liu Geng, Li Shun Min// The first prize, Result number: LG25-17306, THE 3rd CHINA CONFERENCE ON COMMAND AND CONTROL / CHINA INTRNATIONAL CONFERENCE ON COMMAND EXPO, Beijing, 2015. Pp. 23-30
9. Li Shun Min, Calculation method of the danger area after the fire disaster, NAVAL&MERCHANT SHIPS, ISSN: 1000-7148.Beijing, 2015. Pp. 31-36
- 10.Li Shun Min, The calculation method of the boundary of navigation in dangerous sea area, Shipbuilding of China, ISSN:1000-4882. 2015. Pp. 63-71.