

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ШИЯН ВАСИЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ, ХРАНЕНИЯ, ДОБЫЧИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА  
ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Специальность 05.26.01 - Охрана труда  
05.26.04 - Технические средства защиты  
окружающей среды

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Севастополь - 1996



AB 35.850

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Украинском научно-исследовательском институте пожарной безопасности МВД Украины и департаменте прикладной экологии и охраны труда Севастопольского государственного технического университета

Научные консультанты:

академик Академии технической кибернетики Украины,  
доктор технических наук, профессор В. В. Севриков,  
доктор технических наук, профессор В. М. Жартовский

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В. А. Якимов  
доктор технических наук, профессор С. И. Доценко  
доктор технических наук, профессор Г. А. Шевелев

Ведущее предприятие - Национальная Академия наук Украины  
Институт геотехнической механики

Защита состоится "23 Октября 1996" г. в 14 часов,  
на заседании специализированного совета Д 11.03.04 в  
Севастопольском государственном техническом университете по  
адресу: г. Севастополь, Стрелецкая бухта, Студгородок

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Севастопольского государственного технического университета

Автореферат разослан "21" сентября 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук, доцент

С. А. Гутник

ДВ - 55. 030

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В современных условиях искусственная среда обитания человека является одной из основных причин возникновения новых источников опасности. Особо остро эта проблема проявляется в отрасли топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в условиях кризиса экономики, что создает напряженность в сфере материального производства. Она обусловлена, с одной стороны, острой нехваткой и не ритмичностью поставок топлива, а также его потерями при авариях, а с другой - необходимостью принятия безотлагательных мер по защите окружающей среды от их вредного воздействия. Тенденции опасности производств и объектов транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего сырья и топлива (в дальнейшем объектов), вызванные причинами технического, экономического, социального характера, резко возрастают, что сопровождается ростом крупных аварий, травматизмом, летальными исходами, загрязнением окружающей среды. Государству наносится подчас скрытый, проявляющийся со временем, техногенно-экологический ущерб.

В настоящее время опасность для жизни и здоровья людей, возникающая при технологических авариях и чрезвычайных ситуациях, соизмерима с опасностью военных конфликтов. Сложившаяся ситуация объясняется низким уровнем техногенной безопасности, составляющими частями которой являются: охрана труда, эколого-экономическая, пожарная и другие виды безопасности. Основной вклад в обеспечение безопасности населения и окружающей природной среды вносят превентивные мероприятия. К ним прежде всего относят пожарную безопасность, охрану труда и другие виды деятельности, направленные на предотвращение аварий, снижение опасности поражения людей и ущерба на потенциально опасных объектах (ПОО) экономики. Анализ статистики показывает, что превентивные мероприятия необходимы, но не достаточны и не решают проблемы безопасности в целом. Для оперативного реагирования необходим комплексный подход при решении изложенной проблемы, который позволит перейти на качественно новый уровень безопасности от концепции "реагировать и исправлять" к концепции "предвидеть и предупреждать", используя методы диагностики и раннего обнаружения предвестников аварии. Поэтому раннее предупреждение аварий, пожаров, следствием которых является снижение производственного травматизма, повышение уровня безопасности, - наиболее важная задача ТЭК на современном этапе. Для раннего предупреждения аварийных и экстремальных ситуаций перспективна структура измерительно-информационной системы шумо-акустической диагностики (ШАД) дистанционного назначения при оцен-

АНЕ ім. В. Стефанька  
АН України

ке дефектного состояния объектов в реальном масштабе времени. Одной из основных причин медленного развития ранней дистанционной диагностики аварий на объектах с запасами углеродсодержащего топлива является отсутствие научных основ, синтезирующих достижения различных наук и дисциплин.

Научный подход к изучению диагностики аварий построен на основе диалектического познания и исследования факторов, сопровождающих аварии, возможностей их выявления, нормирования границ, критериев обнаружения, действий, направленных на их ликвидацию, а также возможностью классификации характеристик случайных шумоакустических сигналов, предшествующих и сопровождающих аварии, связанных с газо- и гидродинамическими явлениями при нарушении сплошности оболочек, массивов каменноугольных отложений, распространением сигналов в неоднородных средах.

Проблема предупреждения аварий на объектах транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива на основе использования газо- и гидродинамических явлений и обмена информацией по механизму течей - предвестников аварий сформировалась в новое самостоятельное научно-техническое направление современной эколого-экономической, промышленной безопасности ТЭК. Научные, инженерно-технические проблемы и задачи этого направления находятся на стыке теории операций, кибернетики, акустики, технической диагностики, неразрушающего контроля, газо-, гидродинамики, радиотехники, экономики, охраны труда, общей и пожарной безопасности. Синтез наук дает комплексное решение проблемы.

Раннее предупреждение аварий как одна из наиболее важных сторон эколого-экономической безопасности и производственной деятельности требует не просто усовершенствования существующей административно-нормативной системы управления, а перехода к принципиально новой системе автоматизированного управления безопасностью, основы которой выдвигаются в диссертационной работе.

**Связь темы исследований с планами основных научно-исследовательских работ.** Тема диссертационной работы согласуется с основными положениями "Закона о пожарной безопасности", "Закона об охране труда" и задачами Концепции единой государственной системы предупреждения и реагирования на аварии, катастрофы и другие чрезвычайные ситуации. Исследования направлены на решение проблемы обеспечения безопасности производств с позиций концепции "предвидеть и предупреждать". Теоретические и экспериментальные исследования, составляющие основное содержание работы, выполнены в соответствии с планами НИР "Провести исследования и разработать методику оценки пожарной опасности технологических процессов про-

изводства, транспортировки, хранения углеродсодержащего сырья и топлива", "Провести исследования и разработать методические основы дистанционной диагностики состояния технологических объектов транспортировки угле- и углеродсодержащего сырья и топлива для предупреждения аварий", а также в рамках договоров о научно-техническом сотрудничестве между Институтом газа НАНУ, Министерством охраны окружающей природной среды и ядерной безопасности Украины, Киевским НИПК институтом "Энергопроект", трестом "Киевспецсельхозмонтаж".

**Концепция работы** - использование газо- и гидродинамических явлений, предшествующих и сопровождающих аварии при наличии течей пожаро- и взрывопожароопасных сред, топлива через несплошности поверхностей оболочек при потере объектами герметичности.

**Цель работы** - разработка научных основ дистанционной акустической диагностики объектов транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива для предотвращения аварий, защиты людей и окружающей среды.

**Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:**

1. Выполнен научный целенаправленный анализ и обобщены причины возникновения техногенных аварий на энергоемких объектах транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива, сформулированы подходы для построения систем дистанционной диагностики предаварийного состояния этих объектов и намечены пути недопущения возникновения аварий, приводящих к загрязнению окружающей среды, эколого-экономическому ущербу, травматизму обслуживающего персонала и населения, проживающего в сопредельной зоне потенциально опасных объектов.

2. Выявлены особенности механизма проявления газо- и гидродинамических процессов течей через реальные несплошности в защитных оболочках и массивах природных ископаемых, предшествующих и сопровождающих техногенные аварии и пожары на потенциально опасных объектах с запасами пожаро- и взрывопожароопасного углеродсодержащего топлива, для дистанционной диагностики предаварийного состояния.

3. Разработаны математические модели газо- и гидродинамических процессов истечения потоков (течей) сред через насадки и несплошности защитных оболочек, обнаженные поверхности в пластах каменноугольных отложений, оросители, пожарные стволы-распылители при воздействии акустических полей.

4. Проведена количественная оценка влияния уровня, диапазона частот полезных сигналов течей и помех на эффективность дистанционной диагностики аварийного состояния энергоемких потенциально

опасных объектов.

5. Разработаны методики и созданы лабораторные установки, позволяющие провести экспериментальные исследования отдельных элементов и аппаратуры зондовой диагностики, для систем предупреждения аварий газо-, нефте- и продуктопроводов с использованием аппаратурных средств ранней диагностики.

6. Исследованы уровни гидродинамических шумов, генерируемых кольцевым потоком жидкости, и величина гидродинамического сопротивления в межтрубном пространстве при движении автономных внутритрубных зондовых устройств в режиме диагностики, а также влияние технических параметров зондовых устройств внутритрубной диагностики на их энергетические характеристики.

7. Разработаны методология и тактико-технические требования построения систем дистанционной диагностики предаварийного состояния энергоемких объектов транспортировки, хранения, добычи углеводородсодержащего сырья и топлива.

8. Создан комплекс аппаратуры зондовой диагностики дефектного состояния трубопроводов и разработана методика их диагностики (без существенной перестройки, организации и технологии производства) на основе реализации результатов исследований спектрального состава течей, коэффициента гидродинамического сопротивления зонда и уровня шумов.

9. Разработана методология диагностики технологических процессов: транспортировки, хранения углеводородсодержащего топлива, а также процессов добычи угля, сопровождаемых газодинамическими явлениями.

10. Выявлены возможности прогноза аварий по изменению частоты акустических колебаний течей.

11. Определены закономерности возникновения аварий и оценен критерий риска по частоте шумоакустических колебаний.

12. Разработан способ оперативного устранения причин аварий на трубопроводах предприятий топливно-энергетического комплекса, реализованный на основе исследования явлений кинетики безарматурного перекрытия трубопроводов методом замораживания содержащейся в нем жидкости.

**Обоснование и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается** комплексным использованием фундаментальных положений теорий подобия, вероятности, катастроф, погрешностей; совпадения (приближения) теоретических результатов исследований и экспериментальных данных; применением методов математической статистики, автоматического регулирования, функционального, системного и спектрального анализов, преобразований Лапла-

са, Фурье, Матве, а также практическим внедрением результатов исследований.

Объектами исследования выбраны потенциально опасные производства и объекты, которые по своему назначению могут входить в системы и подсистемы регионального, локального мониторинга окружающей природной среды. К ним относят производственные процессы транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива, безопасное состояние которых определяется и формируется под воздействием и с учетом особенностей технологий, субъективных и объективных факторов. Производственные процессы - это компрессорные и насосные станции, магистральные газо-, нефте- и продуктопроводы, резервуары и резервуарные парки для хранения нефтепродуктов, топлива и обрабатываемых химических веществ в различных агрегатных состояниях, шахты подземной добычи угля. Для этих процессов характерно возникновение аварий и пожаров при невозможности прямого контроля за состоянием систем.

#### Научная новизна

1. Разработаны методология, модели и алгоритмы, способы дистанционной диагностики отдельных объектов и технологических процессов с запасами топлива методом пассивной и активной локации полей объектов, трубопроводов, резервуаров, пластов каменноугольных отложений.

2. Предложены методы формализованного подхода к феноменологизации процессов аускультации для выявления скрытого разрушения объектов и технологических процессов в предаварийном состоянии.

3. Разработаны математические модели газо- и гидродинамических процессов истечения потоков сред через насадки и несплошности защитных оболочек, обнаженные поверхности в пластах каменноугольных отложений, оросители, пожарные стволы-распылители при воздействии акустических полей. Предложена модель реальной несплошности и расчет ее параметров на основе решения однородного волнового уравнения для газо- и гидродинамических потоков сред через эллиптические (щелевые) несплошности.

4. Выявлены закономерности изменения спектрального состава (от давления, физико-акустических свойств среды, размера несплошностей) акустических колебаний, возбуждаемых в аварийных ситуациях несплошностями, в диагностируемом технологическом оборудовании и процессах, при этом:

а) классифицированы в единую систему все продукты генерируемых частот  $f = (2q^{1/2})C/d$ , исходя из зависимости  $f = \Phi(P, v, d)$  при нарушении герметичности оболочек и наличии течей через несплошности.

ти, определены области и границы физического устойчивого существования (генерирования) акустических колебаний;

б) получены интегральные зависимости для случайных щелевых несплошностей  $d-\varphi(f)$ , являющиеся критерием при определении риска разрушения полого объекта (трубопровода, резервуара и т.д.), исходя из установленных закономерностей изменения частоты колебаний (от акустических свойств среды, конструкции оболочек, нагрузки).

5. Установлены зависимости уровней шумов в канале передачи данных дистанционной диагностики, оптимизирован выбор уровня сигнала, полосы частот передаваемых сообщений, критерий апостериорной обработки сигналов.

6. Предложена зависимость риска возникновения аварий на трубопроводах как функция размера несплошности и вероятности ее возникновения  $R-F(d, p(t))-\varphi(f)p(t)$  при аускультации разрушающегося объекта, позволяющая оценить риск контролируемых объектов.

7. Повышена достоверность принимаемой информации с диагностируемых объектов об аварийных ситуациях методом оптимальной фильтрации сигналов "ударного возбуждения", адекватно отражающей процессы газодинамических явлений при перераспределении горного, газового давлений в разрабатываемых пластах каменноугольных отложений.

8. Разработана теоретическая основа дистанционной шумоакустической диагностики потенциально опасных объектов, обеспечивающая оценку работоспособности и функционирования объекта на основе как известных подходов, так и исследований, проведенных в данной работе в режимах эксплуатации и испытаний.

9. Созданы элементы и ключевые узлы систем дистанционной шумоакустической диагностики взрыво- и взрывопожароопасных объектов.

10. Разработаны методы, устройства и блоки для диагностики потенциально опасных объектов с запасами и обращением углеродсодержащего топлива, которые применяют для повышения уровня техногенно-экологической безопасности (А.с. N601535, А.с. N1613782, А.с. N1551934, А.с. N 964997).

#### **На защиту выносятся научные положения:**

1. Формальный аппарат описания и классификация методов неразрушающего контроля и ранней акустической диагностики предупреждения аварий на объектах транспортировки, хранения, добычи взрыво- и взрывопожароопасного углеродсодержащего топлива.

2. Теоретические результаты решения волнового уравнения применительно к процессам генерирования акустических колебаний течения при авариях, связанных с разрушением защитных оболочек через реальные щелевые несплошности.

3. Закономерности изменения спектров частот акустических ко-

лебаний, возбуждаемых газо- и гидродинамическими течениями транспортируемых, хранимых и обрабатываемых сред через несплошности при авариях.

4. Критерии оценки условий возникновения аварий (пожаров) по параметрам акустических сигналов, генерируемых течениями сред через несплошности, при двойном воздействии помех: обнаружении сигналов и их передаче по оперативному каналу связи.

5. Элементы научных основ дистанционной акустической диагностики аварий, сопровождающихся течениями, залповыми выбросами, разливами топлива через несплошности и образованием взрывопожароопасных парогазовых облаков, позволяющие вести контроль в темпе процесса диагностики, прогнозировать предаварийное состояние энергоемких объектов.

6. Методология активной и пассивной диагностики предаварийного состояния полых объектов при испытаниях и на этапе эксплуатации по наличию течей углеродсодержащего топлива.

7. Результаты моделирования и исследования кинетики процессов принудительного охлаждения (замораживания) сред в технологических процессах и оборудовании, методология испытаний и оперативного ремонта трубопроводов способом безарматурного перекрытия сечения содержащейся в нем жидкости.

8. Алгоритмы построения и создание на их основе интегрального комплекса аппаратуры дистанционной шумодиагностики предаварийного состояния объектов с запасами топлива и нефтепродуктов.

9. Методология проектирования и построения пассивно-активных, самодвижущихся, транспортируемых потоком продукта, неавтономных, встроенных и переносных систем дистанционной акустической диагностики.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что по тематике диссертации под руководством автора и при его непосредственном участии проведены исследования и разработаны критерии оценки состояния ПОО транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива по наличию течей, являющиеся фундаментом для создания алгоритмов систем диагностики предаварийного состояния энергоемких объектов с запасами углеродсодержащего топлива. Разработан комплекс новых технических решений и средств для контроля и диагностики предаварийного и предпожарного состояний, управления протеканием аварий, охраной труда, оценки и регулирования безопасности объектов на основе автоматизированных информационных технологий:

- методология построения систем дистанционной диагностики автоматизированного контроля сплошности трубопроводов на этапе испытаний и эксплуатации;

- методика и система диагностики для автоматизированного

контроля сплошности подземных резервуаров и хранилищ;

- информационная система для определения возможных мест вне-залных выбросов угля, газа (ВВУГ) в пластах полезных ископаемых;

- активно-пассивный метод повышения достоверности дистанционной акустической диагностики полых объектов, позволяющий обнаруживать и регистрировать при авариях слабые сигналы течей сред через несплошности стенок полых изделий, сосудов и объектов, находящихся под высоким давлением при потере герметичности;

- методики и исследовательские установки для оценки динамических уровней сигналов, шумов и коэффициента гидравлического сопротивления при движении зондовых устройств в трубопроводах;

- методики испытаний, диагностики и ускоренного ремонта трубопроводов методом безарматурного перекрытия при авариях без слива содержащихся в них продуктов.

Предложенные направления решения технических проблем диагностики предаварийного состояния, защищенные 4 авторскими свидетельствами, открывают перспективу создания новых прогрессивных методов диагностики широкого круга ПОО с запасами варьво- и взрывопожароопасных веществ, углеродсодержащего сырья и топлива. Знание характера изменения газо- и гидродинамических процессов, сопровождающихся разрушением материалов, защитных оболочек при потере герметичности, позволяет прогнозировать и управлять состоянием объектов, предупреждать развитие аварий.

Применение автоматизированных систем диагностики повышает эффективность контроля состояния объектов и вероятность раннего предупреждения аварий, пожаров, расширяет задачи экологии, своевременного адаптирования к возможным чрезвычайным ситуациям и латентным процессам возникновения и протекания аварий.

**Реализация и производственное внедрение.** На основе проведенных теоретических, экспериментальных исследований и разработок решена важная социальная и народнохозяйственная проблема повышения уровня безопасности и снижения риска на ПОО с запасами углеродсодержащего сырья, топлива за счет раннего предупреждения и оценки предаварийного состояния объектов с применением дистанционной диагностики.

При разработке сложной многоаспектной проблемы дистанционной ШАД трубопроводов, хранилищ, шахт (без существенной перестройки действующей организации и технологии производства) внедрены методики, системы, узлы автоматизированного управления безопасностью и контролем предаварийного состояния технологических процессов.

Результаты работы предложены НИИПК институту транспорта нефти и другим проектным организациям в разделе: "Охрана труда и ох -

рана окружающей среды". "Пожарная безопасность" в части применения методологии дистанционной диагностики раннего предупреждения аварий и основ построения систем дистанционной внутритрубной диагностики, а промышленности и эксплуатационным организациям предложена конструкторская документация и опытные образцы средств дистанционной диагностики для ПОО в процессах транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего сырья и топлива. Внедренные системы и методы акустической диагностики, созданные на базе современных технологий, электроники, измерительной и вычислительной техники, отличаются эффективностью, надежностью и позволяют заблаговременно эвакуировать персонал из опасной зоны аварии, сокращают до минимума время его пребывания и работы в условиях высоких температур, больших магнитных и радиационных полей.

#### **Результаты диссертационной работы внедрены в производство:**

- в Управлении по строительству трубопроводов треста "Киевсельхозмонтаж" в 1988-1995 гг. при проведении испытаний трубопроводов на участках общей протяженностью 8,8 км с экономическим эффектом 562 дол./ (км·год) при сроке окупаемости 1,24 года;

- в Киевском НИПК институте "Энергопроект" при проведении опытно-промышленных испытаний на Ровенской АЭС с техническим и социальным эффектом за счет сокращения времени работ и снижения дозовых нагрузок на персонал при проведении монтажно-испытательных работ в реакторном отделении АЭС;

- в экспедиции энергоснабжения Юго-западной железной дороги;

- на рудниках ПО Госуглепрома Украины ("Луганскуголь") при определении предвыбросовых ситуаций.

Внедрение подтверждено соответствующими актами, приведенными в Приложении к диссертации. Материал диссертации, несмотря на его применение в области ТЭК, может быть использован предприятиями других отраслей.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы доложены, обсуждены более 20 раз и одобрены на отчетных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Национального технического университета Украины (КПИ) (Киев, 1975-1983); творческом семинаре молодых специалистов и ученых Главного технического управления Миннефтегазостроя СССР (г. Москва, 1982-1983); I-II семинарах РДЭНТП общества "Знание" УССР "Неразрушающие методы контроля" (г. Киев, 1983-1985); I-III Всесоюзных научно-технических конференциях Центрального правления НТО нефтяной и газовой промышленности им. академика И.М. Губкина "Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа" (г. Киев, 1981-1985); 5-й

Всесоюзной межвузовской конференции по проблемам охраны труда (г. Рубежное, 1986); Всесоюзной конференции "Проблемы промышленной экологии и безопасности" (г. Севастополь, 1991); I-й Международной научно-технической конференции "Проблемы экологического мониторинга и охраны труда" (г. Севастополь, 1993); научном симпозиуме, посвященном 55-летию образования объединения "Донецкуголь" (г. Донецк, 1993); I-м Межгосударственном семинаре в г. Львове "Проблемы огнезащиты строительных материалов и конструкций" (г. Львов, 1994); научно-практической конференции "Охрана труда и пожарной безопасности на предприятиях АО "Укрнефть" (г. Харьков, 1995); научно-практической конференции УкрНИИПБ МВД Украины "Проблемы пожарной безопасности" (Киев, 1995); научной конференции КМУЦА "Безопасность предприятий в чрезвычайных ситуациях" (Киев, 11-12 июля 1996).

**Личный вклад автора.** Идея, методы и средства реализации принадлежат лично автору. Экспериментальные исследования по ремонту трубопроводов выполнены совместно с соавторами, фамилии которых приведены в перечне публикаций.

**Публикация результатов работы.** Основные результаты работы изложены в 49 научных работах, опубликованных в центральных и республиканских издательствах. Среди них 4 авторских свидетельства, 2 учебно-методических пособия, статьи, тезисы докладов на международных, всесоюзных, республиканских конференциях.

**Структура и объем.** Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, списка литературы из 317 наименований. Общий объем работы 359 страниц, в том числе 71 рисунок и 4 таблицы. Кроме того, приведено Приложение объемом 25 страниц, содержащее 1 рисунок и 7 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, приведена концепция, определены цель и задачи диссертационной работы, сформулированы основные положения, вынесенные на защиту, указана ее научная новизна и практическая ценность. Показано, что главной проблемой для обеспечения безопасных условий труда обслуживающего персонала и сохранения материальных ценностей от аварий и пожаров является ранняя дистанционная диагностика аварийного состояния объектов с запасами углеродсодержащего топлива.

В главе 1 на основе статистики приведены краткий анализ возникновения аварий, пожаров и методология диагностики газо- и гидродинамических явлений (акустических свистков), используемых для раннего обнаружения несплошностей, дефектов в несущих конструкци-

ях оболочек сосудов и трубопроводов высокого давления, горных массивах. Предложена модель научных основ дистанционной акустической диагностики (ДАД) объектов транспортировки, хранения, добычи углеводородсодержащего топлива для предотвращения аварий и защиты окружающей среды.

В главе 2 описаны результаты теоретических исследований и моделирования газо- и гидродинамических явлений, возникающих при нарушении сплошности защитных оболочек и возбуждении в окружающей среде упругих колебаний. Предложена модель реальных несплошностей-генераторов акустических колебаний, полученная на основе предельного перехода от окружности к вытянутому эллипсу при эксцентриситете, приближающемся к единице. Модель служит идентификатором реальных развивающихся несплошностей и дефектов для раннего прогнозирования аварийных, взрыво- и взрывопожароопасных ситуаций, разрушения защитных оболочек, конструкций, мест течей транспортируемых, хранимых пожаро- и взрывопожароопасных продуктов и топлива в окружающую среду с образованием разливов сред и испаряющихся парогазовых облаков.

В главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований спектрального состава течей газов и жидкостей на физических моделях несплошностей и изучены зависимости влияния параметров среды (жидкостей и газов) на спектральный состав течей. Сопоставлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, получена обобщающая модель реальной несплошности. Изучены частотные диапазоны сигналов течей для построения распознающих систем технической диагностики аварийных, пожароопасных ситуаций. Приведены результаты исследований влияния акустических колебаний на режимы истечения водных струй через цилиндрическую насадку, аналогичную модели пожарного ствола-распылителя.

Глава 4 посвящена экспериментальному изучению уровней шумов, их влиянию на прием, обработку диагностируемых сигналов течей и исключения пребывания обслуживающего персонала в опасной зоне работ при диагностике. Сделаны обобщения взаимовлияния спектров сигналов течей и шумов на возможность успешного приема и диагностики дефектного состояния полых объектов при наличии течей пожаровзрывоопасных сред, образования разливов и парогазовых облаков.

В главе 5 приведены результаты экспериментальных исследований влияния свойств сред на газо-, и гидродинамические, энергетические характеристики устройств зондовой диагностики трубопроводов. Изучены вопросы оптимального построения систем и устройств зондовой диагностики трубопроводов в темпе процесса испытаний, позволяющие автоматизировать процессы диагностики, раннего

выявления аварийных ситуаций, предупреждения несчастных случаев по нахождению людей в опасной зоне.

В главе 6 сделаны обобщения и определены оптимальные условия приема сигналов диагностики и практического обнаружения мест течей. Проанализированы результаты проведенных исследований и разработки вариантов методик, аппаратуры, систем диагностики аварий на энергоемких объектах с запасами топлива, сопровождаемых пожарами и несчастными случаями, а также газодинамическими явлениями при разработке угольных пластов.

В главе 7 изложены результаты математического моделирования и исследования кинетики процессов охлаждения и замораживания жидкостей, заполняющих технологическое оборудование, трубопроводы, полые объекты методом безарматурного перекрытия их сечения. Разработана методика и аппаратура ускоренного ремонта трубопроводов и обвязки технологических процессов применительно к машинным залам АЭС и другим объектам с подачей хладагента (азота) методом орошения. Методика позволяет улучшить условия труда, сократить время работы в опасной зоне, а тем самым снизить дозовые нагрузки на персонал при проведении монтажно-испытательных работ в реакторном отделении АЭС. Рассмотрены отдельные аспекты вопросов охлаждения строительных конструкций жидким азотом методом орошения в специфических помещениях с малой площадью оконных и дверных проемов для повышения их огнестойкости и локализации пожаров.

В Приложении приведены статистические данные исследования травматизма, техногенно-экономической безопасности, анализ причин наиболее крупных и характерных аварий, сопровождаемых пожарами и взрывами при транспортировке, хранении, добыче и обращении углеродсодержащего топлива в нефтехимической промышленности, объектах ТЭК. Приведены результаты исследований классификации аварий, сопровождаемых пожарами и взрывами; данные планирования и оценки проведения экспериментальных исследований; методика раннего обнаружения аварий путем поиска и выявления течей сред через несплошности; рекомендации по проектированию зондовых автономных устройств диагностики аварий на объектах ТЭК; приведены акты внедрения разработок автора.

#### **Анализ процессов, сопровождающих аварии**

Превентивные мероприятия в области повышения общей и пожарной безопасности, охраны труда и окружающей среды не обеспечивают необходимого уровня безопасности и снижения количества аварий. Их главным недостатком является концепция "реагировать и исправ-

лять", допускающая наличие аварий. Указанных недостатков не имеет направление раннего предупреждения аварий, которое реализует качественно новый подход к авариям, основанный на концепции "предвидеть и предупреждать". Для реализации этого направления обеспечения безопасности ПОО и производств необходимо создавать автоматизированные системы ранней диагностики аварий. Получение информации о возникновении аварии позволяет по заранее разработанному сценарию исключить возможность проявления, развития или снизить масштабы ее размеров и ущерба.

В основе работы систем ранней диагностики лежат процессы газо- и гидродинамических явлений обмена информацией по механизму течей, являющихся предвестниками аварий при нарушении сплошности оболочек, конструкций, а также массивов каменноугольных отложений. Качество и надежность обнаружения ранних предвестников аварий определяет эффективность систем диагностики и повышения уровня безопасности производств, эколого-экономических показателей.

Системы дистанционной диагностики согласно выполняемым ими функциям строятся на принципах сбора и передачи первичной информации по двум раздельным каналам: информационному - для обнаружения параметров, характеризующих аварию (сигналы течей), и управляющему - для передачи на расстояние сообщения об аварийной ситуации. В этих условиях в узкой полосе частот сигналы каждого канала являются дополнительной помехой для другого канала.

Для дистанционной диагностики трубопроводов используется зондовое устройство, снабженное чувствительной аппаратурой к сигналам течей, пропускаемое внутри контролируемого трубопровода, пульт управления и контроля информации которого вынесен за пределы трубопровода. Зондовое устройство и оконечная аппаратура пульта управления связаны между собой акустическим каналом связи, организованным по трубопроводу, как гидроволноводу. При такой системе диагностики на пульт управления информация об аварии поступает в процессе контроля без запаздывания.

При дистанционной диагностике аварий резервуаров, пластов каменноугольных отложений использована стационарная установка аппаратуры диагностики с разнесением информационных датчиков, связанных с ней каналами связи.

Разработка научных основ дистанционной диагностики ПОО с запасами углеродсодержащего топлива, методов ликвидации аварий, расчета и оптимизации проектирования аппаратуры указанного назначения требует детального изучения газо-, гидро- и термодинамических явлений на основе системного подхода. Результаты исследований указанных процессов изложены ниже.

**Методологические и теоретические аспекты исследования причин возникновения аварий, пожаров и их последствий.** В последнее время в народном хозяйстве участились крупные аварии, которые сопровождались крупными пожарами, унесшими человеческие жизни и нанешими материальный ущерб производству и окружающей среде, что незамедлительно сказалось на экономике суверенной Украины. Для устранения или существенного снижения последствий аварий необходим не эмпирический, а научный подход к ним не как к случайному, непредсказуемому событию, а как к закономерной фазе, этапу технологического процесса производства при потере над ним контроля и выходе параметров за пределы допустимых.

На основании анализа аварийных ситуаций сделан вывод, что одной из причин аварий и пожаров является запасенная энергия в технологических процессах в виде обрабатываемых взрыво- и взрывопожароопасных веществ и материалов, сырья и топлива в различных агрегатных состояниях. Установлено, что для роста экономических показателей производство вынуждено на каждом новом витке усовершенствования и усложнения технологических процессов повышать давление, температуру, скорости обращения используемого сырья и материалов, что увеличит статистическую вероятность аварии даже при принимаемых противоаварийных, противопожарных мероприятиях. Существовало мнение, что увеличение надежности отдельных элементов и всей системы технологических процессов на энергоемких объектах с запасами углеродсодержащего сырья и топлива обеспечит безопасность всего производства. Однако аварии продолжаются, что свидетельствует о не совсем правильном методологическом подходе к ним.

Изучение предаварийных ситуаций указывает на определенные закономерности возникновения, развития и протекания аварий, пожаров. Причиной аварий при выполнении всех нормативных требований и проектных решений является, как правило, совокупность нескольких факторов, возникающих и одновременно способствующих образованию "цепи с положительной обратной связью", т.е. поддерживающих развитие аварии по лавинному принципу: наличие скрытых дефектов, старение несущих конструкций и человеческий фактор, что приводит к крупной аварии. К перечисленным причинам добавляется еще износ оборудования при его эксплуатации "до отказа", без плановых ремонтов и реконструкций после выработки ресурса. Это относится к построенным в 50-е годы газо-, нефтепроводам, резервуарам, шахтам. Относительно последних заметим, что в Украине из 255 шахт - 56 построены до 1917г.

Исследования, проведенные на основе системного анализа, позволили классифицировать фазы аварий и пожаров, средства защиты объ-

ектов, окружающей среды. На основании анализа разработана модель дерева отказов и экологической защиты объекта, района аварии, подверженного воздействию опасных факторов техногенной аварии на энергоемких объектах транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего сырья и топлива. Модель дает детерминированный подход, рекомендации предполагаемых сценариев, возможных направлений протекания, развития, путей и средств защиты людей, окружающей среды от антропогенного воздействия. Сделан вывод, что наиболее типичные сценарии протекания аварий связаны с течами и проливом пожаро- и взрывопожароопасного углеродсодержащего топлива в окружающую среду с последующим воспламенением легковоспламеняющихся и горючих веществ или их парообразных производных. Сложность проблемы обнаружения течей пожаровзрывоопасных продуктов связана с тем, что чем меньше размер течи и соответственно размер несплошности, тем труднее она идентифицируется и тем продолжительнее ее действие.

Аналогичные аварии наблюдаются и на предприятиях подземной добычи полезных ископаемых, в частности, в угольной промышленности. Они также связаны с газодинамическими явлениями, трансформированными в других условиях, в пластовых залежах полезных ископаемых при их разработке и резком изменении внутрипластовых напряжений. Управление внутрипластовыми напряжениями и дегазация адсорбированных углем газов снижает, но не устраняет возникновение явлений ВВУГ. После сопоставления газо- и гидродинамических процессов в полых объектах и пластовых залежах установлено их сходство и предложен другой путь повышения безопасности подземных разработок полезных ископаемых. Он состоит в предупреждении и диагностике мест и времени ВВУГ. В такой постановке задача безопасности решается предупреждением и своевременной эвакуацией людей и оборудования из опасных зон выброса. Обобщение сценариев различных видов аварий позволило сделать вывод, что успешное решение проблемы безопасности объектов возможно при:

- определении характерных факторов, однозначно связанных с развитием латентных процессов аварии или пожара;
- выявлении критерия и характерных факторов аварии в условиях двойного воздействия помех при их выделении и передаче;
- применении автоматической системы дистанционного приема-передачи информации об авариях в условиях отсутствия или опасности прямого доступа к энергоопасному объекту, функционирующему в автоматическом режиме;
- диагностике объектов в реальном масштабе времени.

Анализ методов диагностики в соответствии с ГОСТ 18353-79 и учетом особенностей, специфики ПОО при транспортировке, хранении,

добыче углеродсодержащего топлива позволил классифицировать методы дистанционной диагностики объектов для предупреждения аварий. В соответствии с классификацией методов диагностики проведена их оптимизация и сформулированы требования в предположении отсутствия необратимых процессов, влияющих на состояние и свойства диагностируемого объекта. Этим требованиям с учетом особенностей ПОО отвечает метод ДАД. В его основу положено явление регистрации волн напряжений, возбуждаемых в средах газо- и гидродинамическими процессами при их истечении через дефекты в стенках оболочек.

Методологии исследований и построения систем повышения безопасности, защиты окружающей среды, экосистейта ПОО с запасами энергетических источников сырья и топлива на основе исследования газо- и гидродинамических явлений приведены в работах С.В. Вонсовского, В.А. Легасова, Т.Х. Синельникова, В.В. Севрикова, Г.Л.Ф. Гельмгольца, М. Дж. Лайтхилла, Струхала. Однако в них в большинстве рассмотрены отдельные стороны проблемы управления безопасностью объектов, охраны окружающей среды и, естественно, ориентированы на тот уровень технологии производства, экономики государства, который был достигнут на момент проведения исследований с учетом их перспективного развития. Недостатки существовавших подходов к управлению безопасностью связаны не столько с устранением аварий и пожаров, сколько с отсутствием модели хозяйствования, которая на практике внедряла бы методологию социальной и эколого-безопасной экономики. Одним из аспектов этой модели является комплексный подход к раннему предупреждению аварий и пожаров и возникновение чрезвычайных ситуаций. Установлено, что раннее предупреждение чрезвычайных ситуаций может быть реализовано на основе ДАД при возникновении течей через образующиеся несплошности. Вопросы управления безопасностью ПОО с запасами топлива обобщены моделью дерева отказов, протекания аварий и научных основ ДАД, на базе которой определен круг проблем, исследуемых в настоящей работе.

Сделан вывод, что технологический процесс и авария находятся в диалектическом противоречии. Указанное противоречие может быть разрешено, а источником его развития и движущей силой являются знания научных основ дистанционной диагностики аварий, которые расширяют возможности их применения.

Создание структуры системы знаний о дистанционной диагностике аварий и повышения безопасности ПОО является сложным процессом познания, который требует комплексного подхода, синтезирующего знания и достижения различных дисциплин, включающих каждая в своем аспекте классификацию системы знаний об оценке состояния безопас-

МОДЕЛЬ НАУЧНЫХ ОСНОВ ДАД ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ, ХРАНЕНИЯ, ДОБЫЧИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО ТОПЛИВА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ И ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

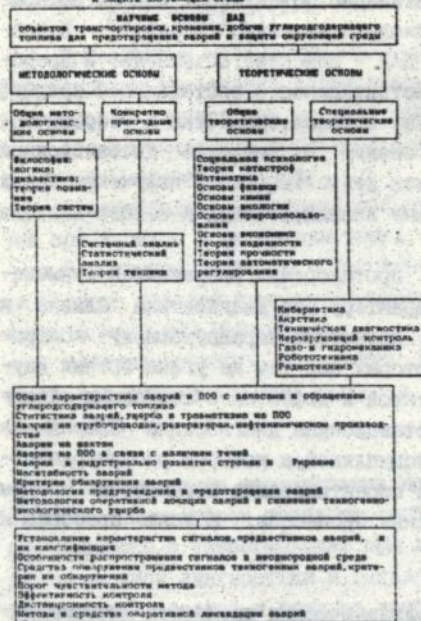


Рис. 1.

ности объектов, а также процессы диагностики аварий.

Поскольку безопасность производств является многогранной областью практики, сочетающей объективно обусловленное и субъективное, структуру системы знаний о дистанционной диагностике аварий на объектах с запасами топлива определяют, опираясь на общую модель знаний о сложной и творческой области практики раннего обнаружения аварий, по составляющим знаниям об его опасности. В состав модели научных основ ДАД объектов транспортировки, хранения, добычи углеводородсодержащего топлива для предотвращения аварий и защиты окружающей среды, приведенной на рис. 1, входят методологические и теоретические основы:

- методологические основы, включающие общие методологические и конкретно прикладные основы. Они базируются на методологических и фундаментальных общественных науках, объект и предмет исследования которых шире проблем безопасности окружающей среды. В их состав входят философия, теория систем, системный и статистический анализ, теория техники;

- теоретические основы, содержащие общие и специальные теоретические основы наук, которые изучают процессы и явления в материальном мире, технике и технологиях, выходящие за пределы безопасности производств, а также конкретные отраслевые науки, у которых объекты исследований имеют общность проблем, связанных с повышением безопасности. К специальным теоретическим основам относятся науки, в состав которых входят разделы, посвященные отдельным сторонам и функциям дистанционной диагностики. Показано, что научные основы ДАД аварий являются как бы центром, где соприкасаются и перекрещиваются предметы исследований разных дисциплин по проблемам оценки аварийного состояния производств и технологических процессов.

Следовательно, научные основы ДАД устанавливают основные принципы, теоретическую систематизацию объективных знаний, раскрывают общие закономерности и подходы к изучению предмета. Непосредственная цель научных основ ДАД - описание, объяснение и предсказание процессов и явлений действительности, составляющей предмет ее изучения, на основе открываемых законов, выработка и теоретическая систематизация объективных знаний о предмете дистанционной диагностики аварий, включающая как деятельность по получению новых знаний, так и ее результат - сумму знаний, лежащих в основе подхода к предмету ее исследований.

Таким образом, технические противоречия разрешаются применением средств ДАД. По своему характеру эта диагностика близка к известным дисциплинам теории катастроф, неразрушающему контролю, технической диагностике, в которых под тем же углом зрения изучаются вопросы обнаружения дефектов и дефектного состояния объектов. Следует учитывать, что дистанционная диагностика аварий на ПОО является общетехнической дисциплиной, в которой рассматриваются и даются исходные данные для проектирования и расчетов систем диагностики аварий технологических процессов, а также приборов и устройств.

**Основы теории газо- и гидродинамических процессов дистанционной диагностики аварий по механизму течей.** Математические модели как газо- и гидродинамических процессов, описывающих нестационарные поля давлений и скоростей по механизму и вероятности возникновения течей, так и тепломассопереноса при оперативном ремонте трубопроводов методом замораживания находящейся в нем жидкости представляют собой совокупность уравнений

1. Уравнения неразрывности потока

а) для жидкости

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{u}) = 0;$$

б) для газа

$$\frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \frac{\partial \rho_r u_r}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

2. Уравнения движения

а) для жидкости

$$-\frac{\partial p}{\partial x} - \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\lambda |u| u}{2D} \right);$$

б) для газа

$$\rho_r \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_r u_r \frac{\partial u_r}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + F_{\text{тр}}. \quad (2)$$

3. Волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{-\alpha t}{e}. \quad (3)$$

4. Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right]. \quad (4)$$

5. Уравнение Лапласа

$$z_1 < \frac{m - np}{[\ln(1-p)]^{1/2}} < z_2; \quad \Phi = \frac{1}{2\pi} \int_{z_1}^{z_2} e^{-(z^2/2)} dz. \quad (5)$$

Приведенные математические модели представляют собой точные формулировки постановки задач газо-, гидро-, термодинамики. Из точных моделей получен ряд частных приближений математических моделей:

- 1) акустических генераторов для идеальных и реальных несплошностей по механизму течей;
- 2) вероятностные методы обнаружения и обработки сигналов течей при двойном воздействии помех;
- 3) оптимизацию формы обтекаемых корпусов зондовых устройств на основе моделей шума, коэффициента гидродинамического сопротивления и критерия Рейнольдса;
- 4) безарматурного перекрытия трубопроводов методом замораживания содержащейся в нем жидкости для оперативного ремонта трубопроводов.

**Теоретические исследования. Модели идеальных и реальных акустических генераторов несплошностей - предвестников аварий. Тепловые процессы в трубопроводах при ликвидации аварий.** Решение задач дистанционной диагностики и выявления несплошностей, раннего предупреждения аварий и пожаров требует априорных знаний частот полёзных сигналов течей и критериев принятия решения на фоне двойного воздействия помех как при обнаружении сигналов, так и при их дистанционной передаче. С этой точки зрения теоретически исследовано влияние параметров идеальных цилиндрических несплошностей при истечении через них сред на частотный диапазон сигналов течей.

В работе исследовано несколько подходов оценки частотного диапазона сигналов течей. Один из методов основан на универсальности критерия Рейнольдса для гидродинамических потоков, распространяющихся через несплошности с шероховатыми стенками. В связи с трудностями измерений таких параметров течи, как амплитуда продольной составляющей скорости, метод дает не количественную, а только качественную сторону и оценку процесса генерирования акустических колебаний, поэтому его не целесообразно использовать в инженерной практике.

Решение задач распространения звуковых волн через цилиндрические несплошности по сути является задачей собственных значений и собственных функций. При рассмотрении звуковых колебаний в цилиндрических несплошностях в виде замкнутого цилиндрического пространства речь идет об нахождении собственных функций в виде нормальных волн  $f(r, \varphi) \exp(j\epsilon x)$  в уравнении Гельмгольца для гармонической волны  $\text{div grad } p + k^2 p = 0$ ,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + k^2 p = 0. \quad (6)$$

Для нормальных и радиальных волн найдено решение уравнения (4) применительно к цилиндрическим несплошностям-дефектам в виде функций Бесселя. Из граничных условий для цилиндрической несплошности радиусом  $r=d/2$

$$\left(\frac{dp}{dr}\right)_{r=d/2} - \eta J_1\{\eta(d/2)\} = 0 \quad (7)$$

определены длины нормальных и радиальных волн на критической частоте в зависимости от диаметра цилиндрической несплошности

$$\lambda_{10} = 1,62(d/2), \quad \lambda_{20} = 0,895(d/2); \\ \lambda_{11} = 3,399(d/2), \quad \lambda_{12} = 1,17(d/2). \quad (8)$$

Анализ зависимостей частоты сигналов течей от размеров цилиндрических круговых несплошностей показывает, что увеличение (снижение) размера несплошности вызывает обратно пропорциональное изменение частоты колебаний, генерируемых течью. Из приведенных отношений видно, что идеализированные модели цилиндрических несплошностей не отражают реальные количественные процессы звукообразования.

Более точный результат получен при идентификации аварийных ситуаций с моделями несплошностей, приближающимися к реальным трещинам. В работе предложена математическая модель несплошности в виде эллиптического цилиндра. При моделировании сделаны допущения, что линейная часть трубопровода является круглым волноводом, несплошность - сквозным каналом эллиптической формы с эксцентриситетом, приближающимся к единице.

Показано, что изучаемые физические явления течей сред, сопровождающих аварии, характеризуются распространением упругих волн в истекающей среде и определяются уравнениями математической физики, например, волновым уравнением с правой частью, описывающей источник колебаний. Для щелевых несплошностей волновое уравнение приводится к решению линейных уравнений в частных производных второго порядка (3).

Для щелевой несплошности в области  $D = \{(x, t); t > 0; 0 < x < a; \omega > 0\}$ , ограниченной вытянутым эллипсом с эксцентриситетом, стремящимся к единице, уравнение (3) решено

для граничных условий

для начальных условий

$$P(x, t) \Big|_{x=0} = 0;$$

$$P(x, t) \Big|_{t=0} = P_0; \quad (9)$$

$$P(x, t) \Big|_{x=a} = 0;$$

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0.$$

В такой постановке задачи получено решение уравнения с помощью

прямого и обратного преобразований Лапласа

$$P(x,t) = \frac{1}{\alpha} \frac{x}{C} + \frac{1}{\alpha^2} [\exp(-\alpha t)] [1 - \exp(-\alpha x/C)] + (P_0 - \frac{1}{\alpha^2}) [1 - \eta(t-x/C)], \quad (10)$$

где  $\eta(t)$  - единичная функция.

Решение (10) уравнения (3) и предложенная модель, описывающая процесс индукции колебаний струйным генератором с учетом влияния внешнего источника, являются обобщающими, дают громоздкое и сложное выражение для инженерного расчета характеристик параметров колебаний. Модель (10) выражает только качественную сторону процесса. Количественная оценка процессов индукции акустических колебаний истекающими струями через щелевые несплошности в герметичных оболочках получена при исследовании волнового уравнения (3) в упрощенной форме без учета источника внешнего воздействия

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = 0, \quad (11)$$

где  $p$  - потенциал давления звуковых колебаний  $p(t, x, y)$  в плоской области применительно к процессу генерирования звуковых колебаний потоком жидкости через несплошности, моделируемые в виде эллиптического цилиндра. При решении уравнения (11) использован аппарат функций Матье. Для реализации поставленной задачи найдена зависимость между частотой генерируемых акустических колебаний, давлением, размером несплошности, свойствами истекающей среды и получено аналитическое выражение

$$p(t, \xi, \eta) = A_n C_n(\xi, q) c_n(\eta, q) \cos(\omega_n t + \Phi_n) + B_n S_n(\xi, q) s_n(\eta, q) \cos(\tilde{\omega}_n t + \tilde{\Phi}_n), \quad (12)$$

где  $A_n, B_n$  - амплитуды давлений гармоник;  $p$  - амплитуда давления в сечении несплошности;  $\omega_n, \tilde{\omega}_n, \Phi_n, \tilde{\Phi}_n$  - частоты гармоник и их начальные фазы.

На основании выражения (12) выявлена зависимость спектров частот и размеров несплошностей от параметрических нулей для сигналов течей. Спектры анализируемых сигналов течей через несплошности оказались дискретными и содержат несколько (до пяти, а в ряде случаев и более) выявляемых гармоник. Частоты этих гармоник при фиксированном давлении  $p = \text{const}$  (величина размера несплошности от частоты) определены из выражений

$$\omega_n = [(2q)^{1/2}] C/a; \quad (13)$$

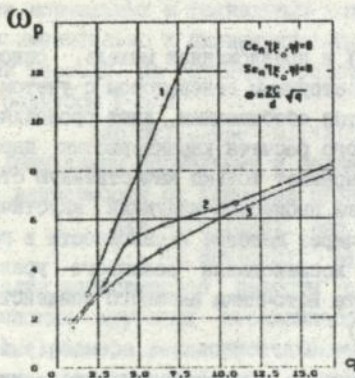
$$a = [(2q)^{1/2}] C/\omega_n, \quad (14)$$

а нормированные частоты  $\omega_n = \omega_n \cdot a/C$ , учитывающие размер несплошности и скорость распространения звука в среде, приведены на рис. 2.

где  $a$  - большая полуось эллипса;  $q$  - параметрические нули (мод) функций Матье;  $n$  - номер моды.

Показано, что проблемы диагностики при решении прямой задачи

Распределение частот, генерируемых течениями сред через несплошности в эллиптических границах в зависимости от параметрических углов решения волнового уравнения



1,2 - частота гармоник, определяемая для несплошности соответственно по малой и большой оси эллипса; 3 - частота гармоник, определяемая по длине несплошности с параллельными берегами

Рис.2

определения мест несплошностей при разрушении защитных оболочек и раннего предупреждения предаварийной (предпожарной) ситуации по спектрам акустических сигналов имеют и обратную задачу (14). Она вытекает из (13) и выделяет размер несплошности на основе анализа принимаемой частоты сигнала течи. Таким образом, оценка размера несплошности имеет не меньшее значение, чем определение места течи при диагностике. Определение размера несплошности дистанционным

методом позволяет количественно оценить состояние герметичности объекта, а также сформулировать критерий опасности объекта при образовании течи для построения автоматизированных систем раннего предупреждения аварий.

Для трубопроводов установлена зависимость между усредненными размерами течей и вероятностью их появления (аварийного события), позволившая построить кривую риска

$$R = \exp[-200,88 - 13,497 \ln p(d) - 0,281 n^2 p(d) - 10 - 31 n^3 p(d)]. \quad (15)$$

Построенный по зависимости (15) график определяет нижнюю область, заключенную между кривой, началом координат, осями ординат и абсцисс, приемлемого риска от верхней области (выше кривой, описываемой выражением (15)) недопустимо большого риска. Предложенная зависимость используется в качестве критерия безопасности, определяющего верхнюю границу допустимой вероятности приемлемого риска. Показано, что аварийные ситуации, вызванные небольшими течениями, приводящими к незначительным последствиям, существенно не отражающимися на здоровье людей и состоянии окружающей среды, возникают сравнительно часто. Для больших течей вероятность их появления должна быть ниже значений приведенной предельной кривой, так как чем больше размер течей, тем меньше должна быть вероятность или частота их появления.

Решение задач диагностики трубопроводов в результате имеет важный аспект, связанный с их испытаниями и ремонтом. Для испытаний и срочного восстановления работоспособности трубопроводов, заполненных нефтепродуктами, жидкостями, без их опорожнения проведены исследования перекрытия путем локального замораживания находящейся в них жидкости. Жидкость замораживается с помощью накладываемых снаружи внешних замораживающих камер. Для получения наперед заданных характеристик процессов перекрытия трубопроводов применено математическое моделирование кинетики процессов замораживания с учетом конкретных размеров трубопроводов и условий окружающей среды.

Расчетная схема для построения математической модели исследуемых процессов, в которой учтены особенности и специфические граничные условия, предполагает, что теплопередача осуществляется от воды (жидкости) с температурой  $T_B(x, r, \tau)$  через лед. Лед имеет распределение температур  $T_L(x, r, \tau)$ , а материал трубы -  $T_M(x, r, \tau)$  по отношению к температуре азота в холодильной камере с температурой  $T_{Az}(x, r, \tau)$ , где  $\tau$  - время;  $x, r$  - текущие соответственно продольная координата и радиус. При теплопередаче учтены важные моменты, заключающиеся в изменении во времени положения границы раздела фаз  $x(\tau)$   $[0, R_0]$ , а также степень заполнения холодильной камеры жидким азотом, что на практике связано с переменным расходом азота  $G_{Az}(\tau)$ , а также не стационарностью условий теплопередачи.

При такой постановке вопроса математическая модель процесса теплопередачи через стенку трубопровода и нарастающий ледяной массив описан идентичными двумерными дифференциальными уравнениями теплопроводности в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} r \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right], \quad (16)$$

где  $r, \theta$  - радиус и угол в цилиндрической системе координат;  $T$  - температура среды.

Уравнение (16) для стенки трубопровода рассмотрено в постоянных границах  $R_0 < r < R_N$ ;  $0 < x < L_{расч}$ , где  $L_{расч}$  - длина расчетного участка трубопровода. Для льда уравнение (16) справедливо в области, ограниченной линиями:  $x=0$ ;  $r=R_0$  и кривой  $x_{гp}(\tau) = f[r, \tau]$ .

В качестве граничных условий по продольной координате заданы условия симметричности относительно камеры холода (как для льда, так и для металла трубы)

$$\frac{\partial T(x, r, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (17)$$

Учитывая длину охлаждающей камеры, накладываем условия ограничения процесса по длине трубопровода и размеру охлаждающей камеры для металла с температурой  $T_M$

$$\frac{\partial T_M(x, r, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=L_{расч}} = 0, \quad (18)$$

а также постоянству температуры фазового перехода на границе раздела фаз для льда

$$\partial T_{л}(x, r, \tau) \Big|_{x=X_{ГР}(t)} - T_{затв}/T_{зам} = 0^{\circ}\text{C}, \quad (19)$$

где  $T_{зам} = 0^{\circ}\text{C}$  - температура замораживания воды.

При обработке экспериментальных данных теплоотдачи в случае кипения жидкого азота в тонкой пленке применительно к условиям замораживания воды в трубопроводе получены следующие модели для удельного теплового потока  $q$ , Вт/(м<sup>2</sup>·град):

$$q = \begin{cases} 2400\pi \times \Delta T^{0,68}, & \Delta T < 4,2^{\circ}\text{C}; \\ 1478,6\pi \times \Delta T^{1,04}, & 4,2 < \Delta T < 7,6^{\circ}\text{C}; \\ 2398,8\pi \times \Delta T^{2,167}, & 7,6 < \Delta T < 30^{\circ}\text{C}. \end{cases} \quad (20)$$

При выполнении операции перекрытия трубопровода одним из важнейших аспектов является задача учета дополнительных напряжений, возникающих в стенке трубопровода, и их оценка. Основной вклад в создаваемый уровень напряжений вносится градиентом температуры по толщине стенки. Проведенные исследования показали, что дополнительная нагрузка и повреждаемость трубопроводов при их перекрытии методом замораживания жидкости не превышает 1%.

**Экспериментальные исследования. Изучение спектрального состава сигналов течей на моделях. Модели сигналов течей.** Для построения систем дистанционной диагностики предупреждения аварий, сопровождаемых пожарами, на энергоемких объектах с запасами в оболочках взрыво- и взрывопожароопасных углеродсодержащего сырья и топлива необходимы исследования частотных характеристик спектрального состава сигналов течей через несплошности. В работе выполнена экспериментальная проверка теоретических предположений влияния параметров цилиндрических и щелевых несплошностей, свойств рабочей, обрабатываемой среды на частотный спектр колебаний, генерируемых течью. Исследования выполнены на специально разработанной многоцелевой установке, представляющей собой герметичный сосуд со сменными имитаторами несплошностей при различных испытательных давлениях. Для снижения количества опытов, ошибок экспериментальных исследований, повышения точности обработки результатов ис-

пользован аппарат математического планирования эксперимента. Изучение процессов генерирования акустических сигналов течей проведено на моделях цилиндрических несплошностей следующих дискретных размеров  $(0,1;0,2;0,5;2;5) \cdot 10^{-4}$  м и щелевой несплошности размером  $10^{-2} \times 5 \cdot 10^{-6}$  м.

Воздействие акустических колебаний на водную струю моделировалось акустическим трансформатором-концентратором, установленным по нормали к поверхности насадки-распылителя, который возбуждался от внешнего акустического генератора. При этом поле акустических колебаний сконцентрировано по оси симметрии водного канала распылителя и оказывало возмущающее воздействие на скорость истечения воды.

Результаты моделирования процессов генерирования акустических сигналов течей воды, газов и нефти через цилиндрические и щелевые несплошности приведены на рис. 3-6. Установлена зависимость размера несплошности и давления от возможности выявления гармоник акустических колебаний, что указывает на связь между изменением размера несплошности, давлением и частотой излучаемых сигналов.

Получены обобщенные модели влияния давления  $P$ , размера несплошности  $d$  на спектральный состав сигналов течей  $f$  воды и газов (рис. 3-6), которые описывают процессы генерирования акустических колебаний уравнением второго порядка:

для воды

$$f = 358,84 + 33,21P + 3239,3d + 134,14Pd - 2P^2 - 4774,2d^2; \quad (21)$$

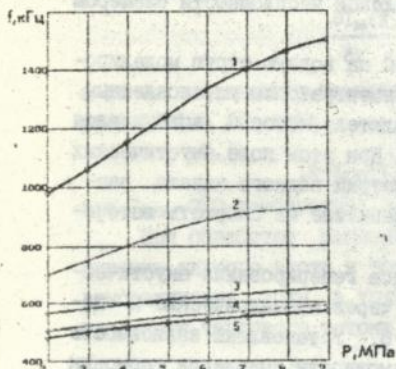
для газа

$$f = 84,9 + 9,5P + 772,2d - 37,01Pd - 542P^2 - 1228,3d^2. \quad (22)$$

Полученные зависимости давления  $P$  и размера несплошности  $d$  на спектральный состав сигналов течей  $f$  нефти, имеют размытые границы и разброс частот, поэтому не могут быть описаны аналитическими зависимостями. Однако характер изменения генерируемых частот имеет сходство с процессами, наблюдаемыми при истечении воды и газов и количественно отличается для различных видов нефти.

Анализ обобщенных моделей генераторов акустических колебаний позволил оценить совокупное влияние давления и размера несплошности на частотный спектр сигналов. Установлено, что во всех исследованиях основное влияние на спектральный состав сигналов, генерируемых течами, оказывают размер несплошности и свойства испытательной среды и меньшее влияние на частоту сигналов течей - давление испытательной среды. Экспериментально подтверждены результаты теоретических исследований спектрального состава сигналов, генерируемых течами, как на цилиндрических, так и на эллиптических моделях с параллельными берегами при эксцентриситете,

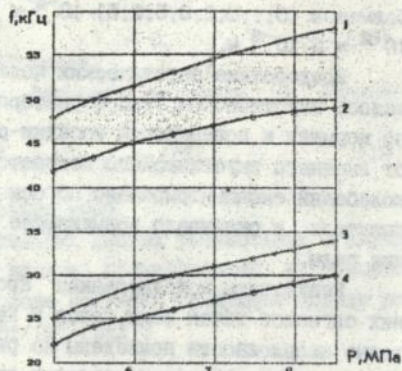
Влияние диаметра цилиндрических несплошностей и давления воды на частотные спектры сигналов течей



1 -  $d = 1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 -  $2 \cdot 10^{-4}$ ;  
3 -  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 4 -  $2 \cdot 10^{-3}$ ;  
5 -  $5 \cdot 10^{-3}$  м

Рис. 3.

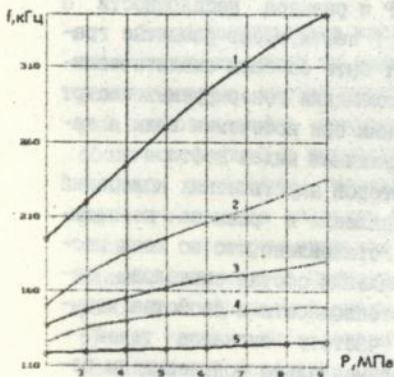
Влияние давления и диаметра цилиндрических несплошностей на частотные спектры сигналов течей нефти



1,2 - область частот, генерируемых течем нефти через несплошность диаметром, равным  $0,5 \cdot 10^{-4}$  м; 3,4 - область частот, генерируемых течем нефти через несплошность диаметром, равным  $1 \cdot 10^{-4}$  м

Рис. 5.

Влияние диаметра цилиндрических несплошностей и давления газа на частотные спектры сигналов течей



1 -  $d = 1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 -  $2 \cdot 10^{-4}$ ;  
3 -  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 4 -  $2 \cdot 10^{-3}$ ;  
5 -  $5 \cdot 10^{-3}$  м

Рис. 4.

Влияние размера щелевой несплошности и давления среды на частотные спектры сигналов течей жидкости (1) и газа (2)

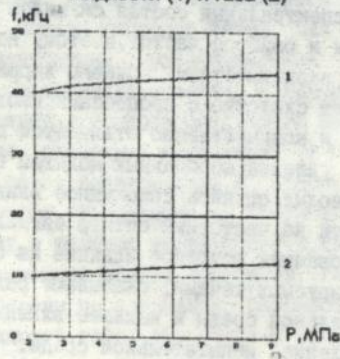


Рис. 6

стремящимся к единице. Сходимость результатов не превышает 7-9%, что подтверждает достоверность результатов.

Получены результаты исследования влияния акустических колебаний внешнего источника на характер и режимы истечения водных струй через насадки. Показано, что при воздействии частоты акустических колебаний на струю потока воды, истекающего через насадку, в полосе частот  $0,8 < (f_1 - f_0) / f_0 < 1,2$  угол распыла изменялся в диапазоне от 0,52 до 0,91 рад.

Исследованы и получены зависимости интенсивности сигналов акустической эмиссии (АЭ) разрушения образцов угля от времени приложения и нагрузки. Показано, что для угля форма акустических сигналов имеет характерный вид сигналов ударного возбуждения. При нагружении образца угля в начальный период интенсивность сигналов АЭ имеет характерный спад, а при приближении разрушения - увеличивается, т.е. производная по времени интенсивности АЭ имеет перегиб и изменяет знак. Установлено, что время разрушения образца зависит от нагрузки и снижается при ее увеличении.

**Исследование распределения спектров помех в гидроакустическом канале передачи информации и влияние конструктивных параметров корпусов автономных зондовых устройств диагностики на показатели эффективности и ресурс их работы.** Дистанционное обнаружение аварий на основе приема акустических сигналов течей, являющихся ранними предвестниками аварий, происходит при аддитивном воздействии на вход приемника полезных сигналов течей и помех. Проектирование систем диагностики аварий основано не только на исследованиях идентификации несплошностей, диапазона, полосы частот, уровня полезных сигналов течей, а также требует изучения характера и распределения помех, действующих на приемник сигналов. Уверенный, надежный прием и работа систем диагностики обеспечивается определенным уровнем сигнала и отношением сигнал/помеха на входе приемника, т.к. основной вклад в уровень помех в трубопроводном канале связи вносят помехи, образованные турбулентным кольцевым потоком жидкости, обтекающей движущийся зондовый аппарат диагностики. В работе изучено распределение спектров шумов, генерируемых кольцевым потоком жидкости, образованным в трубопроводе вокруг движущегося зонда, для выявления взаимовлияния сигналов и помех при приеме. Уровни шумов кольцевого потока исследованы на многофункциональной установке, на которой проведены исследования коэффициента гидродинамического сопротивления по разработанной методике, отличающейся от стандартной тем, что движение потока в трубе при фиксированном положении модели заменено движением модели при непод-

вижной жидкости. Осесимметричная транспортировка модели по гидродинамической трубе осуществлена механизмом центрирования. Испытуемая модель приводилась в движение устройством, использующим силу тяжести тарированных грузов.

Исследования выполнены на двух моделях: первая - в сочетании с передним и кормовым обтекателями, вторая - на модели, составленной из семи одинаковых герметичных цилиндров, собранных в пакет, шесть из которых расположены вокруг центрального - седьмого.

В ходе исследований выявлены закономерности влияния на уровни шумов, генерируемых кольцевым потоком, который образован между внутренней поверхностью трубопровода и зондом, движущимся в трубопроводе, скорости потока и характерного размера зонда  $Re = \varphi(v, d)$ . Получены аксонометрические изображения уровней шумов  $N_{ш} = f(Re)$  для моно- и полиблочных моделей, представленных на рис. 7, 8, а математические модели распределения уровней шумов по частотному диапазону описаны зависимостями:

- для цилиндрической модели с передним и задним обтекателями  
 $N_{Re=107000} = 7,51 \cdot 10^{-1} - 2,67 \cdot 10^{-8} f - 5,79 \cdot 10^{-3} f^2 - 3,87 \cdot 10^{-4} f^3 + 3,3 \cdot 10^{-6} f^4$ ;  
 $N_{Re=155000} = 7,78 \cdot 10^{-1} - 1,79 \cdot 10^{-2} f + 4,1 \cdot 10^{-2} f^2 - 2,57 \cdot 10^{-4} f^3 + 2,18 \cdot 10^{-6} f^4$ ;  
 $N_{Re=176000} = 8,52 \cdot 10^{-1} + 3,19 \cdot 10^{-3} f - 4,28 \cdot 10^{-5} f^2 - 4,38 \cdot 10^{-5} f^3 + 1,39 \cdot 10^{-7} f^4$ ;

- для полиблочной модели, состоящей из семи цилиндров  
 $N_{Re=69500} = 9,47 \cdot 10^{-1} + 4,45 \cdot 10^{-3} f - 1,44 \cdot 10^{-3} f^2 + 1,1 \cdot 10^{-4} f^3 - 9,3 \cdot 10^{-7} f^4$ ;  
 $N_{Re=108000} = 9,52 \cdot 10^{-1} + 3,38 \cdot 10^{-3} f - 1,2 \cdot 10^{-3} f^2 + 9,1 \cdot 10^{-5} f^3 - 7,87 \cdot 10^{-7} f^4$ ;  
 $N_{Re=154000} = 9,59 \cdot 10^{-1} + 5,35 \cdot 10^{-4} f - 4,9 \cdot 10^{-4} f^2 + 3,9 \cdot 10^{-5} f^3 - 3,4 \cdot 10^{-7} f^4$ ;  
 $N_{Re=176000} = 9,8 \cdot 10^{-1} + 2,57 \cdot 10^{-2} f - 6,15 \cdot 10^{-3} f^2 + 4,2 \cdot 10^{-4} f^3 - 3,6 \cdot 10^{-6} f^4$ .

Аксонометрическое изображение частотных зависимостей уровня шумов для моноблочных моделей от числа Рейнольдса

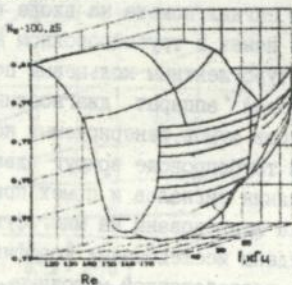


Рис. 7.

Установлено, что уровни акустических шумов, генерируемых кольцевым потоком, возрастают с увеличением числа Рейнольдса в диапазоне частот 5-50 кГц. Для моноблочной модели (рис. 7) максимальный уровень шумов достигает 78 дБ, а зависимость уровня шумов от частоты носит нелинейный характер и имеет область с минимумом шумов. Некоторое снижение уровня шумов до 72 дБ в полосе частот от 1 до 15 кГц объясняется улучшением режима обтекания зондового устройства в трубопроводе. Показано влияние объема модели (диаметра) при постоянной ее длине на уровни излучаемого шума кольцевым по-

током от отношения длина/диаметр зондового устройства.

Частотные зависимости уровня шумов для полиблочных моделей

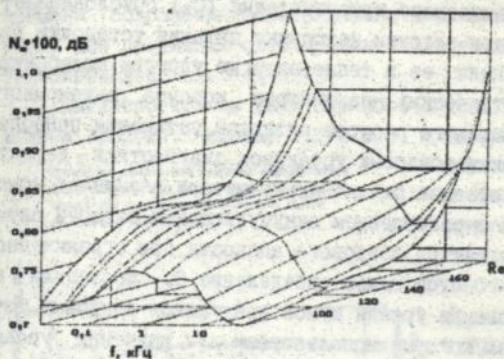


Рис. 8

частотных диапазонов сигналов течей и несущей частоты сигналов служебной связи для уверенного приема и передачи информации и управления. На основании сопоставления при минимальном уровне шумов выявлен нижний диапазон частот сигналов течей воды, равный 80 кГц. Оптимизация частотного диапазона шумов позволила выбрать полосу частот для канала передачи информации и управления зондовыми устройствами с минимальным уровнем шумов, составляющим 72 дБ, в диапазоне частот 1-15 кГц. Разнесение полосы частот по каналам позволило устранить взаимное влияние сигналов между каналами, повысить эффективность и достоверность приема акустических сигналов течей и управления.

На основе анализа результатов исследований частотных зависимостей шумовых сигналов сделан вывод о возможности построения зондовой аппаратуры диагностики дефектного состояния трубопроводов. Обеспечен помехоустойчивый прием при ослаблении взаимного влияния сигналов течей и управления между каналами не менее 20дБ.

Установлено, что образующийся кольцевой турбулентный поток в трубе вокруг движущегося зонда является не только источником мощных гидродинамических (акустических) помех при обнаружении сигналов течей, но и влияет на коэффициент гидродинамического сопротивления.

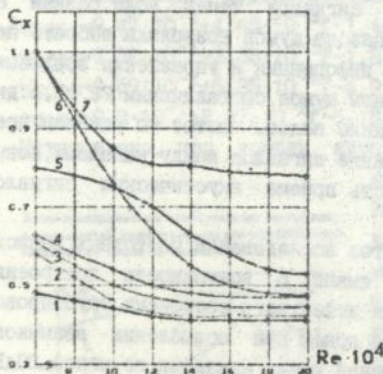
В работе исследованы вопросы повышения энергетических характеристик и живучести, радиуса действия зондовой установки диагностики трубопроводов, оптимизации конструктивных параметров ее кор-

Для выбора помехоустойчивого приема информационных сигналов и несущих частот управления сопоставлены и проанализированы диапазоны частот акустических сигналов течей и частотный диапазон помех, генерируемых кольцевым потоком сред при движении зонда в трубопроводе. Установлена возможность разнесения частотных диапазонов сигналов течей и несущей частоты сигналов служебной связи для уверенного приема и передачи информации и управления. На основании сопоставления при минимальном уровне шумов выявлен нижний диапазон частот сигналов течей воды, равный 80 кГц. Оптимизация частотного диапазона шумов позволила выбрать полосу частот для канала передачи информации и управления зондовыми устройствами с минимальным уровнем шумов, составляющим 72 дБ, в диапазоне частот 1-15 кГц. Разнесение полосы частот по каналам позволило устранить взаимное влияние сигналов между каналами, повысить эффективность и достоверность приема акустических сигналов течей и управления.

пуса на основе выбора коэффициента гидродинамического сопротивления и снижения уровня внешних шумов, воздействующих на приемник сигналов течей автономной системы зондовой диагностики. Величина коэффициента гидродинамического сопротивления ( $C_x$ ) обуславливает непрямые потери энергии источника питания установки при движении и преобразовании ее в тепло, энергию упругих колебаний, влияет на выбор геометрических параметров корпуса автономного устройства и энергетического ресурса питающей установки привода. В процессе проектирования зондовых установок диагностики дефектного состояния трубопроводов различных диаметров возникает комплекс проблем, связанных с размещением аккумуляторных батарей автономного блока питания внутри зондового аппарата, при ограниченном объеме корпуса зонда. С этой целью определение  $C_x$  проводили на установке для исследования уровня шумов движущихся зондовых устройств и тех же моделях, которые использовали для изучения уровня шумов в трубопроводе при фиксированных значениях числа Рейнольдса.

На рис. 9 показано влияние  $C_x = f(Re)$  от числа Рейнольдса.

Зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса



- 1 - модель с передним и задним обтекателем
- 2, 4 - модели с передним обтекателем
- 5 - модель с ребром
- 6 - модель с карманным обтекателем
- 7 - потопляющая модель

Рис. 9.

Для проверки результатов моделирования термодинамических процессов перекрытия трубопроводов проведены экспериментальные исследования характеристик процессов перекрытия для конкретных размеров трубопроводов и условий окружающей среды. Исследования

Анализ зависимостей для изучаемых форм моделей при исследуемых скоростях движения позволяет сделать вывод о турбулентном режиме течения потока  $Re > 2300$ . Установлено, что при  $Re \geq 1,5 \cdot 10^5$  величина  $C_x$  не зависит от числа Рейнольдса, т.е. наблюдается режим автомодельности кольцевого течения. Этот режим на основе критерия Рейнольдса позволяет выбрать оптимальные с точки зрения минимального уровня шумов и  $C_x$  режимы движения зондовых аппаратов и обоснованно вести расчеты параметров движения зондовых устройств диагностики трубопроводов по результатам экспериментальных исследований, полученным на физических моделях.

уровня сигналов течей в трубопроводах проведены на базе многофункциональной установки по разработанной методике. Основой методики являлось измерение скорости изменения температурных полей в трубопроводе в зависимости от расхода азота и исследование ресурса времени сохранения образованного перекрытия при проведении испытаний для различных схем подачи хладагента и различных диаметров трубопроводов.

Выявлено, что из двух способов подачи хладагента: снизу и орошением (рис. 10, кривые 1, 2 и 5, 6) - второй в большинстве случаев

Сравнение показателей процесса замораживания  
ледяной пробки при двух способах подачи хладагента для трубопроводов диаметров 0,219  
/1, 2, 5, 6/ и 0,426 /3, 4, 7, 8/ м

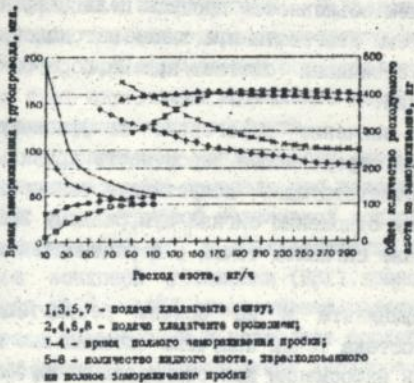


Рис. 10.

и ресурс существования ледяного перекрытия (рис. 10, кривые 1, 2) зависит от диаметра трубопровода и температуры окружающей среды. С увеличением диаметра трубопровода и повышением температуры окружающей среды время замораживания возрастает. Наиболее экономично - орошение, т.к. по сравнению с подачей снизу расход азота снижается на 35-45%.

Исследован подход к замораживанию "перемычек" в трубопроводах при подвижной жидкой среде. В таком режиме в несколько раз увеличивается расход хладагента на замораживание ледяного перекрытия. Изменения связаны с расходом холода на теплопритоки от потока жидкости. Экспериментальные исследования показывают двукратное увеличение расхода и более чем пятикратное - времени замораживания.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты исследования близки (расхождение до 7%), имеют практическое применение

ние при оперативном проведении испытаний без разрезки трубопроводов на отдельные плети и участки, устранении причин аварий на действующих трубопроводах для безарматурного их перекрытия в условиях, при которых не возможно опорожнение, а также при охлаждении конструкций объектов в случае тушения пожаров.

**Результаты практической реализации теоретико-экспериментальных исследований применительно к диагностике энергоемких объектов с запасами и обращением угле- и углеродсодержащего топлива.** Особенности структурного построения систем дистанционной диагностики рассмотрены с точки зрения повышения эффективности обнаружения аварий при одновременном влиянии на приемную аппаратуру полезных сигналов и помех. Этим влиянием объясняется пропуск цели (дефекта) и ложное срабатывание системы диагностики, а также методология разработки достоверных, помехоустойчивых систем приема, обработки информации и технических решений.

Установлено критериальное значение порогового коэффициента  $\delta_{\text{вых}}$  приемников сигналов течей, определяющее вероятность правильного обнаружения сигнала, соответствующее допустимому значению пропуска цели их и принятому отношению сигнал/шум, равному 2,8, которое обеспечивает обнаружение сигналов течей с вероятностью не менее 0,95.

С учетом порогового коэффициента и на основе результатов исследования спектрального состава течей получены оптимальные по энергоемкости частоты передачи информации для стандартных трубопроводов. Полученные численные значения оптимальных частот передачи информации позволили селективировать при приеме спектры частот сигналов течей и информационного канала управления в зависимости от диаметра трубопровода, повысить помехоустойчивость и надежность приема сигналов.

Обнаружение низких уровней сигналов течей при диагностике аварий позволяет отслеживать развитие процессов разрушения конструкций в начальной стадии, а это дает запас времени для принятия решения. Для повышения выигрыша в случае обнаружения слабых сигналов в течи при внутренней диагностике использован режим нерегулярной качки в соответствии с выражением

$$\int_{-\infty}^{\infty} S_1(t) S_2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{S1} G_{S2} \cos(\varphi_{S1} - \varphi_{S2}), \quad (23)$$

где  $S_1(t), S_2(t)$  и  $G_{S1}, G_{S2}$  - сигналы и спектральные функции взаимодействующих колебаний течей и нерегулярной качки.

Показано, что в случае использования метода нерегулярной качки при обработке сигналов течей согласно выражению (23) общая

энергия продуктов взаимодействия двух колебаний: сигналов течи и вспомогательного генератора нерегулярной качки в определенных условиях ( $\Phi_{S1} - \Phi_{S2}$ )-0 может превысить сумму этих колебаний.

Изложенный метод обнаружения течей реализован на практике в автономных и неавтономных системах зондовой внутритрубной диагностики, стационарных системах поиска течей газо- и гидродинамических, пожаро- и взрывопожароопасных сред, предшествующих авариям и пожарам.

Для предупреждения аварий и поиска течей сред предложен алгоритм обнаружения и обработки сигналов, оценивающий по моделям (14) спектров частот размеры несплошностей, разработаны системы зондовой диагностики дефектного состояния трубопроводов в режиме испытаний и эксплуатации. В зависимости от режима работы трубопроводов (транспортировка продукта, испытания) диагностическая аппаратура при перемещении осуществляет контроль в автономном режиме за счет внутренних источников энергии (аккумуляторов) или потоком транспортируемого продукта.

Проведенные исследования при диагностике трубопроводов зондовыми методами показали, что вероятность пропуска течей автономной внутритрубной установкой зондовой диагностики (АВУД) не превышает  $4,037 \cdot 10^{-4}$  и соответственно при использовании внутритрубной зондовой установки (ВЗУ), транспортируемой потоком продукта,  $1,27 \cdot 10^{-3}$ . АВУД обеспечивает передачу информации о течах в процессе диагностики и позволяет продублировать контроль подозреваемых участков. Многократное дублирование при поиске течей осуществляется заложенным в алгоритм и методику диагностики техническими возможностями системы ограничено перемещать АВУД в прямом и обратном направлении (цепной режим) около подозреваемых участков трубопроводов. Этим преимуществом ВЗУ не обладает. При диагностике трубопроводов с помощью ВЗУ одним из недостатков системы является запаздывание выдачи информации, определяемое полным циклом проведения исследований.

В соответствии с основными принципами структурного построения систем диагностики и раннего предупреждения аварий на трубопроводах на основе газо- и гидродинамических явлений разработана методология обнаружения течей в резервуарах и пластах полезных ископаемых (угля), построенная на принципах определения координат источника сигнала по известным его характеристикам.

Для диагностики мест несплошностей резервуаров, заполненных нефтепродуктами или топливом, и явлений внезапных выбросов угля, газа (ВВУГ) в разрабатываемых пластах предложен алгоритм поиска сигналов, инициирующих место течи (газов или жидкостей), и разра-

ботана аппаратура диагностики со стационарной установкой датчиков. Алгоритм поиска несплошностей построен на определении места течи в точке пересечения "гипербол". Система диагностики резервуаров построена на использовании принципа и алгоритма диагностики газо- и гидродинамических явлений при истечении потоков сред из герметичных оболочек.

Одной из особенностей диагностических систем резервуаров и пластов полезных ископаемых является создание акустического контакта между датчиком и диагностируемым объектом, что определяет эффективность и качество поиска мест течей. В условиях горных работ акустические датчики устанавливали на пласт в штреке, создавая акустический контакт, с помощью однородных быстротвердеющих составов (алебастра) или системы скважин-шпуров, пробуренных с поверхности земли до целика пласта, на дно которых помещали акустические системы, связанные с диагностирующей аппаратурой. В простейшем случае использовался проводной канал связи. Более эффективным и мобильным является радиоканал. Эффективность систем диагностики ВВУТ определяли отстройкой и фильтрацией уровней шумов, сопровождающих технологические процессы добычи угля. На экспериментальных участках выявление концентраторов ВВУТ не снижалось ниже 30-35%.

Моделирование несплошностей в резервуарах показало, что вероятность пропуска течей не превышает  $(1-1,4) \cdot 10^{-3}$ . Снижение вероятности обнаружения течей обусловлено как изменяющимся внаким давлением продукта, его вязкостью, зависимостью от температуры, а также наличием специфических помех. Диагностика резервуаров существенно затруднена при заполнении или освобождении резервуара от топлива или продукта. В условиях динамической загрузки (заполнения или слива) уровень акустических шумов по сравнению с состоянием хранения повышается от 6 до 80 дБ при работе насосов и наличии потока заполняемой жидкости, что подтверждается результатами исследования шумов в резервуарах. Следовательно, эффективность диагностики в условиях динамического режима резко падает.

Успешная диагностика состояния резервуаров и пластов каменноугольных отложений возможна на принципах использования газо- и гидродинамических явлений. АЗ при превышении полезным сигналом уровня помех. Проведенные исследования показали на практике возможность определения методами АЗ и кинетической теории прочности не только координат расположения течи, но и инженерного расчета ресурса работы несущей конструкции.

Подтверждена справедливость теоретических предположений и принципов дистанционного обнаружения течей. В частности, доказана возможность использования внутренней диагностики трубопроводов

вопреки существующему мнению о приоритете диагностики через поверхность грунта.

**Реализация результатов исследований** газо-, гидродинамических явлений по обмену информацией на основе механизма течей на ПОО транспортировки, хранения, добычи углеводородсодержащего топлива для предотвращения аварий. На основе сравнения теоретических и экспериментальных результатов сделан вывод об адекватности выходных сигналов модели несплошности и спектрального состава сигналов течей. Благодаря адекватности модели в качестве критерия можно использовать полученные зависимости  $f = \Phi(d, P)$  для разработки методики и системы технической аускультации несплошностей на этапе испытаний с оценкой состояния и общей надежности, техногенно-экологической безопасности эксплуатации трубопроводов и пластов каменноугольных отложений.

На основе проведенных исследований коэффициента гидродинамического сопротивления показано, что для проектирования и разработки зондовой аппаратуры диагностики трубопроводов диаметром от 0,219 до 0,426 м целесообразно выбрать цилиндрический корпус зонда с передним и задним обтекателем (при параметрах  $V^{1/3}U_0 = 0,532$ ), где  $U_0, V$  - внутренний объем и скорость зондового аппарата. Выполнение этих условий обеспечивает оптимальный коэффициент  $C_x = 0,44$  и минимальный уровень возбуждаемых шумов и потерь на преодоление сил гидродинамического сопротивления при движении зонда со скоростью диагностики  $U_0$ .

На основании проведенных исследований разработана методика подачи хладагента для перекрытия трубопроводов методом замораживания, которая применена при испытаниях и ремонте трубопроводов, а также испытаниях и ускоренном ремонте технологических трубопроводов контуров АЭС в условиях воздействия радиационных полей.

Использование методов ускоренного безарматурного перекрытия сечения трубопроводов позволяет локализовать и сократить время аварийного выброса нефтепродуктов в почву и тем самым повысить техногенно-экологическую и пожарную безопасность объекта, снизить уровень опасных факторов аварии.

#### **Основные результаты и выводы**

На основе выполненных исследований получено решение научно-технической проблемы предупреждения техногенных аварий, пожаров, имеющее важное социальное, экономическое и народнохозяйственное значение. Проблема, заключающаяся в повышении эффективности функционирования систем раннего предупреждения и предотвращения тех-

погодных аварий и катастроф, снижения уровня пожарной опасности на объектах ТЭК, решается путем разработки научных основ ДАД и неразрушающего контроля технологических процессов транспортировки, хранения, добычи пожаро- и взрывопожароопасных веществ и топлива, контроля протекания предаварийных процессов, снижения последствий аварий, влияющих на состояние окружающей среды.

Основные научные результаты и практическая значимость работы следующие.

1. Выявлены основные закономерности и причины аварий газо-, нефте- и продуктопроводов, резервуаров, систем транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива; в числе основных факторов существенное влияние на состояние аварийности оказывает низкая конструктивная надежность защитных конструкций и оболочек, что приводит к повышению уровня опасности эксплуатации взрывопожароопасных и пожароопасных технологических объектов и производств, сопровождается потерями транспортируемых и сохраняемых продуктов, загрязнением окружающей природной среды.

2. Сопоставлены и классифицированы существующие методы, средства неразрушающего контроля и ранней диагностики, обеспечивающие безопасность эксплуатации трубопроводов и резервуаров, что позволило обосновать методологию применения шумоакустической диагностики дефектного состояния полых объектов (резервуаров, трубопроводов), находящихся под избыточным давлением. Определен критерий обнаружения несплошности - частотный спектр акустических колебаний, генерируемый течами через несплошности в стенках полых изделий (труб).

3. Разработаны математические модели газо- и гидродинамических процессов истечения сред через насадки, щелевые несплошности защитных оболочек, обнаженные поверхности в пластах каменноугольных отложений, оросителях, пожарных стволах-распылителях и предложен расчет их параметров на базе решения волнового уравнения Гельмгольца при описании течей динамических потоков жидкостей и газов, позволившие выявить качественную связь между параметрами несплошности и спектрами акустических сигналов, генерируемых течью через несплошности.

4. Установлены на моделях закономерности изменения частотных спектров акустических сигналов течей, возбуждаемых в несплошностях, в диагностируемом технологическом оборудовании и технологических процессах от давления, физико-акустических свойств среды, размера несплошностей.

5. Выявлено влияние на частоту генерируемых акустических колебаний: размера несплошности, давления и физико-механических

свойств среды  $f = \Phi(P, v, d)$ ; показано, что все продукты генерируемых частот  $f = (2q^{1/2})C/d$  сгруппированы в единую систему, в которой определены области и границы физического устойчивого существования (генерирования) акустических колебаний.

6. Получены интегральные зависимости для случайных щелевых несплошностей  $d = \Phi_1(f)$ , являющихся критерием при определении риска возникновения аварий на трубопроводах, исходя из установленных закономерностей изменения частоты колебаний (от акустических свойств среды, конструкции оболочек, нагрузки).

7. Выявлена зависимость риска возникновения аварий  $R = F(d, p(t)) = \Phi(f)p(t)$  от размера несплошности и давления при акультации разрушающегося объекта на основании установленных закономерностей изменения частоты сигналов, генерируемых случайными несплошностями.

8. Выявлены зависимости размера несплошности - частота генерируемых колебаний, осуществлена систематизация и установлены критические значения размеров несплошностей при определении риска аварий.

9. Установлены закономерности и разработана методология определения критерия риска опасности производства, характеризующая вероятность возникновения аварий (пожара) и размера течи на примере систем трубопроводного транспорта углеродсодержащего топлива, а также общие подходы к разработке критерия риска опасности производства транспортировки, хранения, добычи, переработки углеродсодержащего топлива.

10. Разработаны методики и созданы лабораторные установки, позволившие исследовать на моделях газо- и гидродинамические явления возбуждения течениями акустических колебаний через несплошности; уровни гидродинамических шумов, генерируемых кольцевым потоком жидкости, при движении автономных зондовых аппаратов внутри трубопровода в режиме диагностики; влияние технических параметров зондовых устройств внутритрубной диагностики на их энергетические характеристики.

11. Разработана математическая модель турбулентного генератора шумов, возбуждаемых кольцевым потоком жидкости в межтрубном пространстве при движении зондовых устройств внутри трубопроводов, и исследованы уровни шумов  $N_{ш} = f(Re)$ , коэффициент гидродинамического сопротивления  $C_x = \Phi(Re)$  для различных моделей от числа Рейнольдса, на основе которых оптимизированы конструктивные параметры и режимы движения зондовых устройств, а также способы обнаружения и обработки сигналов течей при авариях, потере герметичности полых объектов.

12. Исследованы уровни гидродинамических шумов в трубопроводном канале передачи данных дистанционной диагностики и оптимизирован целенаправленный выбор уровня сигнала, полосы частот, передаваемых сообщений и критерия апостериорной обработки сигналов.

13. Обоснованы методы формализованного подхода к пониманию явлений аускультации для выявления латентного характера разрушения объектов и технологических процессов в предаварийном состоянии. Разработаны методология, модели и алгоритмы, способы дистанционной диагностики отдельных объектов и технологических процессов с запасами топлива методом пассивной и активной локации полых объектов, трубопроводов, резервуаров, пластов каменноугольных отложений.

14. Разработана аппаратная методика диагностики трубопроводов (без существенной перестройки, организации и технологии производства) на основе реализации результатов исследований спектрального состава течей, коэффициента гидродинамического сопротивления зонда и уровня шумов, создан комплекс аппаратуры зондовой диагностики дефектного состояния трубопроводов. Подтверждена высокая эффективность и надежность системы дистанционной диагностики при испытаниях. При использовании автономного внутритрубного устройства диагностики вероятность пропуска течи составляет  $4,037 \cdot 10^{-4}$ , а при внутритрубном течеискателе, перемещающемся потоком транспортируемого продукта, -  $1,27 \cdot 10^{-3}$ .

15. Обобщены результаты выполненных исследований и разработана теоретическая основа дистанционной диагностики энергоемких объектов с запасами углеродсодержащего топлива, которая обеспечивает возможность дистанционной оценки (прогноза, риска) работоспособности и функционирования объекта как на базе известных подходов, так и по результатам исследований, проведенных в данной работе в режимах эксплуатации и испытаний.

16. Предложена и разработана методология диагностики технологических процессов: транспортировки, хранения и переработки углеродсодержащего топлива, а также процессов добычи угля, сопровождаемых газодинамическими явлениями, позволяющая эксплуатировать перечисленные объекты с системами диагностики без привлечения обслуживающего персонала в опасные зоны. Реализация изложенных методов на пожаро- и взрывопожароопасных объектах и предприятиях ведет к значительному повышению уровня охраны труда, эксплуатационной и конструктивной надежности как по факту отсутствия людей в рабочей зоне, так и своевременного обнаружения мест несплошностей и предупреждения аварий, повышения экологической безопасности технологических процессов и производств.

17. Разработана методика оперативного устранения причин аварий

на трубопроводах и коммуникациях предприятий топливно-энергетического комплекса на основе исследования явлений кинетики безарматурного перекрытия трубопроводов методом замораживания жидкости, которая содержится в нем.

18. Показано, что ключевым моментом промышленной безопасности потенциально опасных энергоемких объектов с запасами топлива является изучение и обмен информацией по механизму течей, рассеяния энергии, топлива и их воздействия на человека, окружающую среду. Предложены модели и методология для построения систем ДАД с использованием явлений (механизма) течей, которые связаны с потерей объектами герметичности позволяют преобразовать (проблемы, задачи, предмет) промышленную безопасность и охрану труда в активный автоматизированный процесс обеспечения раннего предупреждения техногенных аварий, пожаров. Внедрение системы ДАД в практику позволяет совершить переход на качественно новый уровень безопасности производства от концепции "реагировать и исправлять" к "предвидеть и предупреждать" аварии, а вследствие этого обеспечить раннее предупреждение аварий, пожаров, несчастных случаев, загрязнения окружающей природной среды.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:**

1. Шиян В.Д. Приемник сигналов АЭ для дефектоскопии сварных соединений // Нефтяная и газовая промышленность. - 1983. - N 2. - С. 38-40.
2. Шиян В.Д. Спектральный состав сигналов, генерируемых при истечении жидкости // Там же. - С. 43.
3. Сабарно Р.В., Шиян В.Д. Дистанционный контроль при зондовой дефектоскопии трубопроводов // Там же. - 1984. - N 2. - С. 43-45.
4. Шиян В.Д., Сабарно Р.В. Классификация методов обнаружения утечек строящихся магистральных трубопроводов на этапе испытаний // Строительство предприятий нефтяной и газовой промышленности. Серия: Линейное трубопроводное строительство: ЗИ. - 1985. - Вып. 6. - С. 8-12.
5. Шиян В.Д. Гидродинамическая модель движения зондовых аппаратов внутри трубопроводов // Нефтяная и газовая промышленность. - 1986. - N 1. - С. 49-51.
6. Шиян В.Д. Бесконтактный датчик скорости и пути // Горная электромеханика и автоматика. - 1986. - Вып. 49. - С. 44-49.
7. Шиян В.Д. Экспериментальное исследование движения зондовых аппаратов внутри трубопроводов на гидродинамической модели // Сб. науч. трудов КАДИ. - 1988. - Вып. 46. - С. 59-64.
8. Шиян В.Д. Робототехническая система диагностики с приме-

нением микропроцессоров//Строительство магистральных трубопроводов: ЭИ. - 1988. - Вып.4. - С.21-23.

9. Шиян В.Д. Моделирование трещин, излучающих звук//Нефтяная и газовая промышленность. - 1990. - № 1. - С.43-45.

10. Вайсман С.М., Ковицкий В.И., Миленский В.И., Могильный В.И., Шиян В.Д. Возможности интенсификации процессов замораживания ледяных пробок в испытываемых трубопроводах//Хим. машиностроение. - 1988. - № 48. - С. 96-98.

11. Севриков В.В., Чмовж В.В., Шиян В.Д. Звук, излучаемый протяженными трещинами//Нефтяная и газовая промышленность. - 1992. - №3. - С.46-48.

12. Севриков В.В., Шиян В.Д., Лебедев Н.Н. Прогноз и предупреждение аварий при внезапных выбросах методами акустической диагностики//Уголь Украины. - 1993. - №7. - С. 33-36.

13. Севриков В.В., Шиян В.Д. Проблемы прогнозирования и предупреждения аварий в горных выработках при внезапных выбросах угля и газа методами технической диагностики//Охрана окружающей среды и мониторинг. Сб. трудов СПИ. - 1993. - Вып.2. - С.253-256.

14. Севриков В.В., Шиян В.Д. Підвищення перешкодостійкості приймачів систем шумоакустичної зондової діагностики трубопроводів//Нафтова та газова пром-сть. - 1993. - №2. - С.34-36.

15. Шиян В.Д. Повышение пожаро- и взрывопожаробезопасности объектов добычи, транспорта, хранения углеродсодержащего сырья и топлив методами технической диагностики//Тез. докл. I Межгосударст. семинара "Проблемы огнезащиты строительных материалов и конструкций" (Львов, 26-30 мая 1994). - 1994. - С.256-261.

16. Севриков В.В., Шиян В.Д. Прогнозування залишкового ресурсу роботи газо-, нафто-, продуктопроводів за результатами їх діагностики//Нафтова та газова пром-сть. - 1994. - №4. - С.47-50.

17. Шиян В.Д. Научные проблемы безопасности и риска в промышленности добычи, транспорта, хранения углеродсодержащего сырья и топлива//Тез. науч.-практ. конф. "Проблеми пожежної безпеки" (Київ, 14-16 червня 1995). - 1995. - С.373-375.

18. Присяжнюк Л.А., Севриков В.В., Шиян В.Д. Принципы создания систем раннего обнаружения и прогнозирования развития аварий на пожароопасных и взрывопожароопасных объектах//Тез. науч.-практ. конф. "Проблеми пожежної безпеки" (Київ, 14-16 червня 1995). - 1995. - С.79-80.

19. Севриков В.В., Шиян В.Д. Повышение пожарной безопасности объектов транспорта, хранения, переработки углеродсодержащего сырья и топлива//Нефтяная и газовая промышленность. - 1994. - №4 - С. 47-50.

Шиян В. Д. Научные основы дистанционной акустической диагностики объектов транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива для предотвращения аварий и защиты окружающей среды. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.26.01 - Охрана труда, 05.26.04 - Технические средства защиты окружающей среды. Севастопольский государственный технический университет. Севастополь, 1996.

Защищается 49 научных работ, включающих 2 учебно-методических пособия, 4 авторских свидетельства, в которых содержатся научные основы дистанционной акустической диагностики объектов транспортировки, хранения, добычи углеродсодержащего топлива для предупреждения аварий и защиты окружающей среды, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований газо-, гидродинамических явлений обмена информацией по механизму течей. Предлагаются новые модели предвестников аварий. С их использованием разработана методология расчетов и конструирования систем дистанционной диагностики и повышения безопасности технологических объектов с запасами углеродсодержащего топлива, устраняющих пробелы мониторинга, охраны труда и окружающей природной среды, пожарной безопасности. Внедрение исследуемых систем в производство позволит открыть качественно новый переход в эксплуатации потенциально опасных объектов от концепции "реагировать и исправлять" к концепции "предвидеть и предупредить".

Basil D. Sheyan. Scientific Basis of distant acoustic diagnostics of the objects of extraction, transportation and storage of carboncontaining fuels to prevent accident and to protect environment. Thesis for Ph.D. (Tech.) degree in 05.26.01 - Labour safety; 05.26.04 - Technical hardware for protection of environment. Sevastopol, 1996. Sevastopol State Technical University.

Forty nine scientific works, including 2 manuals and 4 certificates of authorship on distant acoustic diagnostics of the objects of extraction, transportation and storage of carboncontaining fuels to prevent accident and protect environment are being defended. The results of theoretical and experimental research works on gas-and hydrodynamic phenomena of interchange of data about leak gear are presented. New models of the accident heralds are developed. The methodology of calculation and construction of distant diagnostic systems and increase of safety of technological objects having reserves of carboncontaining fuels is worked out with the use of these new models. The disadvantages in labour and environment protection and in fire safety can be avoided by using of this systems.

Introduction of the systems under study into practice would open new in kind transition in operation of potentially dangerous objects from the conception "react and correct" to the conception "foresee and prevent".

Ключевые слова: аварии, пожары, охрана труда и окружающей природной среды, диагностика, течи, несплошности, углеродсодержащее топливо, модели.

*Шиян В. Д.*

441089

АВ. 35.850  
АВ 35.850

Подписано к печати 6.06.96 г.      Формат 60x84/16  
Бумага офсетная.      Усл.-печ.лист.20Уч.-изд.лист 2,0.  
Тираж 100      Заказ 339      Цена договорная.

---

Полиграф. уч-к Институту электродинамики НАН Украины  
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.