

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт инженерной и экологической безопасности

(наименование института полностью)

20.04.01 Техносферная безопасность

(код и наименование направления подготовки)

Управление промышленной безопасностью, охраной труда и окружающей среды в
нефтегазовом и химическом комплексах

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Анализ и разработка методов безопасной
эксплуатации турбокомпрессоров на объектах нефтехимического комплекса

Обучающийся

А.А. Липкин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

д.т.н., профессор, Тарасов В.А.

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

к.э.н., доцент, Фрезе Т.Ю.

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Содержание

Введение.....	3
Термины и определения	9
Перечень сокращений и обозначений.....	10
1 Состояние проблемы обеспечения безопасности эксплуатации оборудования для переработки нефти	11
1.1 Анализ аварийности на предприятиях нефтепереработки	11
1.2 Нормативно–правовая база обеспечения безопасности эксплуатации опасных производственных объектов.....	22
1.3 Система неразрушающего контроля и основные направления ее развития, методы и средства неразрушающего контроля	34
2 Технические элементы, обеспечивающие безопасную эксплуатацию технологического оборудования	46
2.1 Герметизация технологического оборудования	46
2.2 Защитные устройства и защитная арматура	64
2.3 Обеспечение защиты от производственных вибраций	71
3 Диагностика – основа безопасной эксплуатации оборудования.....	88
3.1 Виды контроля (визуально-оптический, радиационный методы неразрушающего контроля контроль, акустические методы неразрушающего контроля). Их достоинства и недостатки.....	88
3.2 Технология организации и проведения контроля. Выбор метода диагностики оборудования	102
3.3 Анализ и оценка эффективности организации и проведения диагностики и контроля оборудования	108
Заключение	119
Список используемой литературы и используемых источников	121

Введение

Актуальность и научная значимость настоящего исследования. В современных условиях развития нефтехимической промышленности, турбокомпрессоры играют ключевую роль в обеспечении непрерывной работы производственных процессов. Однако безопасная эксплуатация этого оборудования является сложной задачей, требующей постоянного внимания и разработки новых методов и технологий. Аварийные ситуации, связанные с турбокомпрессорами, могут иметь серьезные последствия как для персонала, так и для окружающей среды, поэтому обеспечение их безопасной эксплуатации важная задача для нефтехимического комплекса [30].

«Одной из важнейших составляющих охраны труда является защита от производственных вредностей – факторов, которые негативно влияют на состояние здоровья работников.

Отклонения от допустимых условий деятельности, вызывающие эти негативные факторы, отрицательно влияют на производительность труда, ухудшают самочувствие, приводят к травмам, заболеваниям, а иногда и к гибели людей» [29].

В нашей стране развитие промышленности было связано с чрезвычайно высоким ростом энергонасыщенности предприятий, неравномерным сосредоточением их в отдельных регионах, значительным укрупнением единичных мощностей агрегатов и производств, что в свою очередь приводило к резкому увеличению масштабов отгрузки, увеличению объемов хранения опасных химических веществ на товарно-сырьевых и промежуточных складах.

Экономически выгодное, но нерациональное с точки зрения обеспечения безопасности населения, размещение химико-технологических комплексов на территории России, чрезмерная их концентрация в некоторых регионах обусловили образование крупных промышленных центров, примыкающих непосредственно к селитебной части городов, что привело к

росту не только производственного, но и социального риска, связанного с возможностью возникновения крупных аварий техногенного характера [31]. К таким центрам можно отнести промышленные комплексы г.г. Ярославля, Перми, Березняков, Волгограда, Самары, Новокуйбышевска, Салавата, Уфы, Стерлитамака, Кемерово, Дзержинска, Новомосковска и многих других городов [4].

Объект исследования: объекты нефтехимического комплекса.

Предмет исследования: эксплуатация турбокомпрессоров на объектах нефтехимического комплекса.

Цель исследования: предотвращение аварийных ситуаций и обеспечение непрерывной работы оборудования на объектах нефтехимического комплекса при условии исследования и разработки методов безопасной эксплуатации турбокомпрессоров.

Гипотеза исследования состоит в том, что предотвращение аварийных ситуаций и обеспечение непрерывной работы оборудования на объектах нефтехимического комплекса при условии исследования и разработки методов безопасной эксплуатации турбокомпрессоров будет достигнуто, если:

- проанализирована аварийность на предприятиях нефтепереработки с целью выявления основных причин возникновения аварий;
- выбрано технологическое оборудование с целью обеспечения безопасной эксплуатации и предложить конструктивные изменения;
- проанализированы методы эксплуатации турбокомпрессоров;
- разработаны методы диагностики оборудования.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать аварийность на предприятиях нефтепереработки с целью выявления основных причин возникновения аварий;
- выбрать технологическое оборудование с целью обеспечения безопасной эксплуатации и предложить конструктивные изменения;
- проанализировать методы эксплуатации турбокомпрессоров;

— разработать методы диагностики оборудования.

Теоретико-методологическую основу исследования составили: научные публикации, учебники, учебные пособия по теме исследования.

Базовыми для настоящего исследования явились также сведения, используемое в патентно-информационном анализе.

Методы исследования: метода неразрушающего контроля узлов и деталей турбокомпрессоров.

Опытно-экспериментальная база исследования на нефтеперерабатывающих предприятий.

Научная новизна исследования заключается в:

— разработке новых методов контроля и обслуживания турбокомпрессоров, основанных на современных технологиях и научных исследованиях в области безопасности промышленного оборудования.

Теоретическая значимость исследования заключается в разработке мероприятий внедрения методов на объектах нефтяной отрасли для последующего снижения количества аварий.

Практическая значимость работы заключается в исследовании выявления причин аварий, как на рассматриваемом объекте, так и на других.

Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивались:

— анализом публикаций российских и зарубежных авторов по теме исследования;

— изучением существующих технических разработок по теме.

Личное участие автора в организации и проведении исследования состоит в разработке рекомендаций по внедрению новых методов безопасной эксплуатации турбокомпрессоров на объектах нефтехимического комплекса.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования. Его результаты представлены в опубликованной статье на тему диссертации: Липкин А.А. Анализ и разработка методов безопасной

эксплуатации газозаправочных объектов // Форум молодых ученых. 2024. №10(98).

На защиту выносятся:

- результаты анализа аварийности на предприятиях нефтепереработки с целью выявления основных причин возникновения аварий. На предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности происходят аварии, после анализа были выявлены причины их возникновения. Причины возникновения аварий: ошибки персонала, нехватка квалифицированных кадров, недостатки конструкции оборудования, недостаточная оснащённость средствами контроля, износ оборудования. Самая опасная авария разгерметизация, которая обуславливается не совершенствованием конструкции, дефектами, коррозионным и эрозионным разрушением, повышением напряжения в элементах и повышением давления в аппаратуре. Виды аварий и повреждений: свищи, трещины, разрывы, пробой.
- результаты выбора технологического оборудования с целью обеспечения безопасной эксплуатации и предложение конструктивных изменений. Результаты анализа аварийности на предприятиях нефтепереработки позволили в качестве приоритета рассмотреть технологическое оборудование с целью обеспечения безопасной эксплуатации и предложить конструктивные изменения. Оценка состояния турбокомпрессоров и анализ их неполадок позволили научно подойти к проблеме отказов данных агрегатов. Исследование показало, что основной причиной, способствующей 80% выходов из строя, является изнашивание таких критических компонентов, как подшипники скольжения, валы и уплотнения. Также стоит отметить, что в 5% случаев неисправности обусловлены воздействием чужеродных элементов на рабочие лопатки компрессора и турбины. Ещё 5% инцидентов связаны с

нарушениями в системе смазки и другими обстоятельствами, которые не вписываются в основные ситуации поломок. Стратегии по предотвращению таких аварийных ситуаций включают ряд предписаний. Важным моментом является своевременная замена воздушных фильтров, что предотвращает попадание внешних объектов в механизмы. Кроме того, жизненно необходимо обеспечить адекватную температурную регулировку турбокомпрессоров, избегая превышения пределов тепловой нагрузки. Наконец, качественное масло в системе смазки, подаваемое в надлежащем объёме, также является решающим фактором в сохранении эффективности и надежности работы турбокомпрессоров. Использовать сотовые и гладкие уплотнения в качестве периферийных для безбандажного рабочего колеса для эффективной работы.

- результаты анализа методов эксплуатации турбокомпрессоров помогли выявить их недостатки с точки зрения безопасности. В исследовании неисправностей газоперекачивающих агрегатов более уязвимые узлы: лопатки, подшипниковые узлы, камеры сгорания, теплообменники, корпусные элементы, уплотнения. Надежность и долговечность зависит от условий эксплуатации, от металла проточной части, частоты и скорости пусков, окружающей среды, а также методов и организации эксплуатации и обслуживания. К примеру, исследования надежности осевых компрессоров показывают, что важную роль играет устойчивость их лопаточных аппаратов. Основные факторы, определяющие нагрузку на лопаточный аппарат, включают динамические усилия, генерируемые потоком циркулирующего воздуха, а также центробежные силы, возникающие из-за массы самих лопаток.
- внедрение новых методов контроля и обслуживания оборудования помогут предотвращать аварийные ситуации. Ключевые методы для

сбора и анализа диагностических данных: трибодиагностика, диагностика на основе анализа продуктов износа в газах, возникающих при сгорании; оценка температурного состояния компонентов; метод акустической эмиссии; радиографический анализ; магнитно-порошковая дефектоскопия; вихретоковая диагностика; ультразвуковая проверка; капиллярная проверка; вибрационная диагностика; акустическая диагностика; методы параметрической диагностики и другие. Существующие подходы к оценке прочности компонентов агрегатов в процессе проектирования почти всегда позволяют своевременно обнаруживать начало разрушений, возникающих под статическими нагрузками. На основе собранных данных в ходе технического диагностирования объекта, определяется остаточный ресурс, прогнозируя изменение ключевых параметров до того, как они достигнут критических значений. В методе определения остаточного ресурса необходимо обосновать выбор подхода к прогнозированию, установить требования к его точности, а также провести оценку рисков, связанных с дальнейшей эксплуатацией объекта. Остаточный ресурс представляет собой общую наработку объекта с момента проверки его технического состояния до момента, когда он достигнет предельного состояния.

Структура магистерской диссертации. Работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, содержит 31 рисунок, 8 таблиц, список используемой литературы (40 источников). Основной текст работы изложен на 126 страницах.

Термины и определения

Требования пожарной безопасности – специальные условия социального и (или) технического характера, установленные в целях обеспечения пожарной безопасности законодательством Российской Федерации, нормативными документами или уполномоченным государственным органом.

Федеральный государственный пожарный надзор – деятельность уполномоченных федеральных органов исполнительной власти.

«Система обеспечения пожарной безопасности – совокупность сил и средств, а также мер правового, организационного, экономического, социального и научно–технического характера, направленных на борьбу с пожарами».

Неразрушающий контроль – это технический контроль, при котором пригодность детали не нарушается. В противном случае контроль называется разрушающим.

Радиоволновой неразрушающий контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом.

Перечень сокращений и обозначений

НПС – насосные перекачивающие станции.

ФЗ – федеральный закон.

РФ – Российская федераций.

МЧС – министерство по чрезвычайным ситуациям.

ГПН – государственного пожарного надзора.

НК – неразрушающий контроль.

ОК – объект контроля.

СВЧ – сверхвысокие частоты.

ТД – технической диагностики.

ТКР – турбокомпрессор.

КПД ГПА – коэффициент полезного действия газоперекачивающего агрегата.

ЦБН – центробежный нагнетатель.

ТВД – турбина высокого давления.

ТНД – турбина низкого давления.

ГТУ – газотурбинных установок.

МНК – методы радиационного контроля.

РК – радиационный контроль.

ИИ – ионизирующее излучение.

1 Состояние проблемы обеспечения безопасности эксплуатации оборудования для переработки нефти

1.1 Анализ аварийности на предприятиях нефтепереработки

На предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, эксплуатирующихся во всем мире, в среднем каждые два месяца происходит крупная авария. Эти аварии сопровождаются пожарами, взрывами и выбросами токсичных веществ.

Такие аварии в мировой практике принято называть «основными опасностями химических производств» [21]. Поражающими факторами для обслуживающего персонала и населения при реализации таких опасностей могут быть:

- перегрев или переохлаждение;
- избыточное внешнее давление;
- механические травмы;
- кислородное голодание (удушьё);
- массовые возгорания при избыточной концентрации кислорода;
- токсические нагрузки на кожные покровы и органы дыхания.

Кроме того, в отечественной практике к основным нефтехимическим опасностям относят, прежде всего, взрыв и внезапный токсичный выброс [7]. Пожар не относят к специфическим опасностям, хотя пожары на нефтехимических объектах являются источником или последствием взрывов.

Взрывы и пожары на химических предприятиях часто сопровождаются выделением (часто и образованием) большого количества вредных для человека химических веществ. В огромных количествах на предприятиях обращаются химические соединения, которые при пожарах выделяют токсические вещества (оксид углерода, сернистый ангидрид, фосген, хлорид водорода и многие другие).

Опасность химического (токсического) поражения тесно связана с проблемой промышленных взрывов. Во многих случаях токсические вещества одновременно являются и взрывоопасными и обладают запасом потенциальной энергии, которая при аварийных ситуациях (взрывных процессах), высвобождаясь, служит «разносчиком» токсичных продуктов на огромные территории. Масштабы токсического поражения химическими продуктами характеризуются не только природой и свойствами химических продуктов, но и физико–химическими и технологическими свойствами промышленных объектов [22].

Поэтому при оценке опасности любого химического производства следует учитывать не только токсические свойства химических продуктов, но и их физико–химические свойства, а также условия обращения данных веществ в технологическом процессе.

Несмотря на предпринимаемые меры в области промышленной безопасности полностью исключить вероятность возникновения аварии практически невозможно.

В большинстве случаев причинами аварий являются нарушения технологического процесса, правил эксплуатации технологического оборудования, машин и механизмов, низкая трудовая и технологическая дисциплина, несоблюдение мер безопасности, отсутствие должного надзора за состоянием оборудования. Одной из возможных причин являются стихийные бедствия.

Анализ аварий, проведенный автором, которые произошли на химических и нефтехимических предприятиях с 2005 по 2015 гг., показал, что аварии, как правило, обусловлены комплексом причин [19], среди которых:

- ошибки персонала вследствие низкого уровня подготовки к действиям в экстремальных ситуациях и недостаточных знаний безопасных методов ведения процессов;
- нехватка и большая текучесть квалифицированных кадров;

- низкое качество проектов и неудовлетворительная организация работ по их выполнению;
- несовершенство технологии и недостаточная изученность химизма технологических процессов;
- конструктивные недостатки оборудования и арматуры;
- недостаточная оснащенность технологических процессов необходимыми средствами контроля и противоаварийной защиты;
- износ основных производственных фондов и неудовлетворительное обеспечение производств современным оборудованием и запасными частями.

В литературе [32] указано, что на ошибки обслуживающего персонала приходится от 30 до 62%, на недостатки проектирования около 30% и на долю аварий, происходящих из-за повреждения оборудования приходится от 10 до 20 %. Анализ аварий, зарегистрированных Госгортехнадзором России, не позволяет провести достоверного статистического анализа по всему многообразию конкретных причин их возникновения. [37]

Известно, что на предприятиях химической индустрии ежегодно происходит порядка 4–4,5 тысяч инцидентов (отказов или повреждений технических устройств, отклонений от режимов технологических процессов), приводящих к аварийным ситуациям, что на три порядка больше, чем количество аварий. Хотя причинами аварий и инцидентов могут быть одни и те же факторы. Масштабы последствий определяются структурой промышленного предприятия, используемой технологией, квалификацией обслуживающего персонала и т.д.

Особую опасность представляют аварии (аварийные разгерметизации) с выбросом токсических веществ, возникающие в результате взрыва, пожара, поломки оборудования, транспортной емкости или трубопровода [36]. «Аварийная разгерметизация технологической системы и залповый выброс опасных веществ, связаны со следующими факторами:

- несовершенством конструкции и дефектами в сборке разъемных соединений узлов и деталей в аппаратуре, оборудовании и трубопроводах;
- дефектами в исполнении неразъемных сварных соединений в аппаратуре и трубопроводах;
- коррозионным и эрозионным разрушением конструкционных материалов;
- повышенным напряжением в конструктивных элементах аппаратов и трубопроводов, возникающим при температурных деформациях;
- повышением давления в аппаратуре и трубопроводах и аварийным срабатыванием предохранительных устройств» [33].

В результате аварийной разгерметизации оборудования нефтехимического производства происходит выброс нефтепродукта, растекание его по рельефу местности.

Протокол реагирования на типовые аварии в нефтепроводных системах предусматривает серию последовательных шагов для локализации утечек. Инициирование процедуры начинается с прекращения работы насосов, обнаруживших утечку, за которым следует изолирование поврежденного сегмента трубопровода путем закрытия соответствующей запорной арматуры. Такие действия обеспечивают отсечение аварийного участка от остального оборудования, препятствуя дальнейшему распространению нефтепродуктов.

Процедура истечения нефти из дефекта в трубопроводе классифицируется на основе временных периодов, характеризующихся различными параметрами потока. Первый из этих периодов – насосный режим истечения – возникает сразу же после возникновения прорыва и длится до момента отключения насоса. Во время этой фазы в трубопроводе поддерживается давление, задаваемое спецификациями насоса и параметрами самого трубопровода, включая размеры образовавшегося отверстия. Скорость утечки продукта через это отверстие зависит и от его

площади, и от режима работы насосных установок. Можно отметить, что в случае малых отверстий, не оказывающих значительного влияния на рабочее давление в трубопроводе, пропускная способность дефекта будет обусловлена в первую очередь его размерами.

Продолжительность насосного режима истечения определяется длительностью, необходимой для выявления прорыва, а также временем, требуемым для принятия мер по его локализации. Для крупных отверстий это время варьируется от 3 до 20 минут, для мелких повреждений, таких как свищи, процесс может занимать несколько часов. В период насосного режима давление нефти колеблется между 2 и 5 МПа, а интенсивность утечки определяется исходя из этого давления и характеристик аварийного отверстия.

В постнасосном периоде оперативного реагирования на аварию в нефтепроводной системе предусматривается два ключевых режима, отличающиеся динамикой истечения нефтепродукта в связи с отключением насосов и последующей локализацией утечки.

Пьезометрический режим общего истечения

Этот режим активизируется сразу после прекращения работы насосов и продолжается до момента изоляции аварийной секции трубопровода. При этом начальное давление жидкости перед отверстием диктуется не только размерами дефекта, но и высотными отметками ближайших нефтеперекачивающих станций относительно точки прорыва, а также длиной секций трубопровода. Продолжительность данного режима варьируется в зависимости от скорости реагирования запорной арматуры — от 2 минут при использовании автоматизированных систем с дистанционным управлением до часа при необходимости механического перекрытия и ограниченной доступности места утечки. В этих условиях расход утечки нефти будет прямо зависеть от давления нефти в трубе, изменяющегося со временем, особенно в промежутке между насосными станциями.

Пьезометрический режим истечения непосредственно из аварийной секции

Этот режим наступает после физического изолирования участка трубопровода путем закрытия линейной запорной арматуры и продолжается до полного опустошения аварийной секции. Давление перед отверстием теперь будет обусловлено давлением столба жидкости, учитывая любые потери давления по длине трубопровода вплоть до места прорыва. Для определения скорости утечки нефти и времени истечения в данном режиме необходимо учитывать множество факторов: габариты дефекта, шероховатость трубы, длину поврежденного сегмента, а также высоту нефтяного столба между точками закрытия в рамках трубопровода, основываясь на их относительном положении к точке утечки.

Продолжительность и интенсивность истечения в этих режимах зависят от технических и физических условий эксплуатации трубопровода, и могут варьироваться в зависимости от конкретной ситуации, потребовав точных расчетов и оперативных действий со стороны обслуживающего персонала.

В рамках анализа режимов истечения из нефтепровода, напорный период – это фаза, когда поток жидкости через отверстие регулируется высоким внутренним давлением ($\beta = p_0/p_3 < \beta_{кр} = 0,546$). В рамках пьезометрического режима, напорное истечение обусловлено давлением, создаваемым столбом жидкости в трубопроводе непосредственно над местом повреждения. Важной характеристикой этого периода является постепенное уменьшение давления столба жидкости, поскольку нефть продолжает вытекать из системы.

Этот процесс динамического снижения давления является результатом уменьшения объема нефти в трубопроводе во время утечки. По мере того как столб жидкости над отверстием сокращается, соответственно понижается и давление, которое обеспечивает напор истечения. В связи с этим, можно ожидать, что интенсивность утечки будет снижаться со временем, до тех пор,

пока в системе не будет достигнуто более стабильное состояние давления или пока утечка не будет полностью локализована согласно применяемым аварийным процедурам.

Объемная производительность источника. Объемный расход однофазной жидкости через отверстие определяется из уравнения Бернулли:

$$Q = \mu \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (1)$$

где $\Delta p = p - p_0$ – избыточное давление в трубопроводе, Па;

F_0 – площадь аварийного отверстия (трещины), м^2 ;

μ – коэффициент расхода;

ρ – плотность нефтепродукта, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При постоянном давлении, что характерно для первого периода, объем вытекшей нефти пропорционален времени истечения:

$$V = Q \cdot \tau, \text{ м}^3. \quad (2)$$

где τ – продолжительность истечения нефти, ч.

Во второй фазе, охватывающей временной отрезок между отключением насосов и перекрытием задвижек, уровень давления на участке аварии обуславливается разностью высотных позиций нефтеперекачивающих станций (НПС) относительно точки прорыва. Предполагается, что высота расположения НПС прямо влияет на давление жидкости в трубопроводе, вследствие гидростатического давления столба нефти.

В третьем периоде, когда задвижки уже перекрыты, давление в аварийной секции нефтепровода определяется объёмом столба нефти, зафиксированным между ближайшими запорными устройствами. В этот момент, в условиях замкнутого пространства, давление будет меняться в зависимости от количества оставшейся жидкости в изолированном сегменте.

Перераспределение жидкости после внешнего истечения также требует рассмотрения. При аварийном выходе нефтепродукта в окружающую местность происходит образование временного потока или русла, принимающего форму в соответствии с рельефом, климатическими факторами, а также объёмом и скоростью растекания жидкости. Топография местности будет направлять нефть, формируя стоки, которые отличаются по своей глубине и ширине, в то время как климатические условия такие как температура и осадки могут изменять вязкость и скорость растекания нефти.

Выделяют следующие виды движения жидкости в потоках: равномерное, неравномерное, неустановившееся.

В анализе производительности аварийного источника на нефтепроводе при напорном режиме истечения, применяется ряд теоретических допущений, облегчающих проведение расчётов:

Идеальное рабочее тело. Содержимое в трубопроводе предполагается быть идеальным рабочим телом, что облегчает моделирование путём пренебрежения вязкостью и другими текучими свойствами нефти.

Адиабатическая система. Система считается адиабатической и открытой, исключая обмен теплотой с окружающей средой и предполагая, что какая-либо работа происходит из-за истечения нефти.

Квазистатический процесс. Предположение о квазистатическом процессе означает, что любые изменения происходят достаточно медленно, чтобы система была близка к равновесию в любой момент времени. Здесь отношение давлений β меняется от значения ниже критического ($\beta < \beta_{кр}$) до равного единице.

Критическое отношение давлений. Предполагается, что $\beta_{кр} = 0.546$, что является пороговым значением отношения давлений, ниже которого истечение переходит в дозвуковой режим из сверхзвукового.

Массовый расход. Критический массовый расход, происходящий при $\beta < \beta_{кр}$, определяется существующими условиями внутри трубопровода и

может быть рассчитан, исходя из плотности ρ как производное от массы вещества $M(\tau)$ и его объёма V .

Форма и коэффициент сжатия струи. Учитывается тот факт, что истечение сопровождается сжатием струи на выходе, что часто наблюдается на практике. Коэффициент ξ , учитывающий сжатие и форму отверстия, для трещины составляет $\xi = 0.6$.

Геометрия дефект. Для упрощения расчётов предполагается, что дефектные отверстия имеют ромбовидную форму с соотношением длины к ширине 8:1, что позволяет стандартизировать образование струи при различных типах повреждений.

В таблице 1 приведены параметры дефектных отверстий.

Таблица 1 – Параметры дефектных отверстий

Размер	Свищ	Трещина	Гильотинный порыв
F/F_0	0,0072	0,0448	0,179

Динамика движения нефти в среде ее транспортировки определяется рядом физических характеристик, среди которых вязкость играет особенно важную роль. Влияние физических свойств на текучесть нефти может быть разделено на несколько категорий:

- Фракционный состав. Нефть может быть сырой (содержащей больше легких фракций и летучих компонентов) или стабилизированной, где большинство газов и легких фракций удалены.
- Плотность. Классификация на легкую и тяжелую нефть отражает удельный вес углеводородного состава, который определяет, как нефть будет вести себя при транспортировке и переработке.
- Вязкость. В зависимости от способности текучести, нефти подразделяются на маловязкие (легче перемещающиеся по трубопроводам) и средней вязкости, что напрямую влияет на

потребность в нагреве или разбавлении для обеспечения эффективной транспортировки.

- Содержание парафинов и серы. Присутствие этих веществ сильно влияет не только на подготовку нефти к транспорту, но и на последующую её переработку, так как высокие концентрации могут вызывать образование отложений и коррозию оборудования.

Плотность нефти задаётся в диапазоне от 720 до 1000 кг/м³ и может значительно варьироваться в зависимости от геологических параметров месторождения, откуда она добыта. Более тяжелая нефть обычно имеет более высокую плотность и вязкость, что может усложнить её транспортировку и обработку по сравнению с легкой нефтью, обладающей более низкими значениями этих показателей.

Виды аварий и повреждений и причины, сопутствующие этим ситуациям, представлены в таблице 2.

«В зависимости от расположения на трубопроводе аварии подразделяются:

- по основному металлу труб;
- в сварных соединениях (продольный или поперечный швы);
- на запорной арматуре;
- на устройствах трубопровода (вантузы, отборы давления и манометрические сборки, указатель прохождения средств очистки и диагностики и др.)» [10].

Таблица 2 – Виды аварий и повреждений

Виды аварий и повреждений	Характерные особенности	Причины
«Свищи (одиночные)	Сквозные локальные поражения стенок трубопровода, заводских продольных (спиральных) швов на малой площади	Износ из-за коррозии, прогрессирующие коррозионные вредные воздействия на металл, высокие уровни солей в водоносных слоях, действующих как электролиты, незаконные действия лиц, совершающих проникновение в трубу (например, бурение отверстий) для кражи» [10]

Продолжение таблицы 2

Виды аварий и повреждений	Характерные особенности	Причины
«Свищи (групповые)	Сквозные поражения стенок трубопровода и продольных (спиральных) швов площадью до 5 мм ²	Качественные изъяны сварочных работ, недостатки в покрытии изоляционного слоя, изъяны связанные с коррозией» [10]
«Трещины	Трещины в стенке или сварных швах трубопровода, на соединительных деталях (переходнике и т.д.)	Стресс-концентрация из-за неисправностей сварных соединений, неправильная геометрия трубы, превышающая нормативные параметры, внешние механические повреждения, недобрительные условия опоры на природные или созданные подпорные конструкции
Разрывы	Разрывы по целому металлу, по кольцевому монтажному шву, по околошовной зоне заводского (спирального) шва и т.д., сопровождаются деформацией разорванных кромок	Неподходящий эксплуатационный режим включая рапидное повышение давления, недостатки сварных швов включая пористость, включения, несплошность сварки, неправильные обрезки, а также разделение структуры металла, макро и микротрещины из-за поверхностных повреждений таких как сколы, вмятины, царапины и прочее
Пробоины	Нарушение герметичности в теле трубы вследствие внешнего ударного воздействия на трубопровод	Воздействие волокуш, якорей, действия сторонних организаций, чьи трубопроводы находятся в одном техническом коридоре, действия физических лиц» [10]

В зависимости от аппаратного оформления процессы подразделяются на непрерывные и периодические. Для периодических процессов характерны аналогичные опасности, но на ряду с ними аварии и инциденты связаны с высокой вероятностью ошибочных действий персонала при ведении технологических операций по загрузке и выгрузке сырьевых материалов и продуктов, закрытию и открытию арматуры, переходе с одного режима на другой. При осуществлении данных операций наиболее вероятна разгерметизация аппаратуры и выброс опасных веществ.

1.2 Нормативно–правовая база обеспечения безопасности эксплуатации опасных производственных объектов

Задача обеспечения пожарной безопасности признана одной из главных государственных задач. Основные правовые принципы и регулирующие механизмы в этой сфере находят подкрепление в Конституции РФ и установленных международными договорами стандартах, а также закреплены в ряде федеральных законов. В числе важнейших нормативно-правовых документов выделяются:

- ФЗ № 69–ФЗ от 21.12.1994 «О пожарной безопасности», последние изменения которого внесены 12.03.2014, устанавливающий правовые, экономические и социальные основы деятельности в данной области [16];
- ФЗ № 184–ФЗ от 27.12.2002 «О техническом регулировании» с изменениями от 28.12.2013 регламентирующий порядок установления стандартов и правил в технических системах, включая корректную эксплуатацию оборудования и технических устройств [18];
- ФЗ № 123–ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», изменения к которому были приняты 02.07.2013, конкретизирующий требования к мероприятиям по предупреждению пожаров [28].

«ФЗ № 69–ФЗ от 21.12.1994 «О пожарной безопасности» содержит положения, регулирующие взаимодействие трех уровней власти – федерального, регионального и муниципального – в деле обеспечения пожарной безопасности, а также включает правила взаимодействия государственных органов с коммерческими организациями, общественными объединениями, индивидуальными предпринимателями и гражданами, включая иностранных граждан и лиц без гражданства» [16].

В соответствии с ФЗ № 69–ФЗ, нарушение требований пожарной безопасности является невыполнение или ненадлежащее выполнение требований пожарной безопасности.

Федеральный государственный пожарный надзор – деятельность уполномоченных федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, осуществляющих переданные полномочия, а также подведомственных им государственных учреждений, направленная на предупреждение, выявление и пресечение нарушений организациями и гражданами требований, установленных законодательством Российской Федерации о пожарной безопасности, посредством организации и проведения проверок деятельности организаций и граждан, состояния используемых (эксплуатируемых) ими объектов защиты, проведения мероприятий по контролю на лесных участках, на подземных объектах, при ведении горных работ, при производстве, транспортировке, хранении, использовании и утилизации взрывчатых материалов промышленного назначения, принятия предусмотренных законодательством Российской Федерации мер по пресечению и (или) устранению выявленных нарушений, и деятельность указанных уполномоченных органов государственной власти по систематическому наблюдению за исполнением требований пожарной безопасности, анализу и прогнозированию состояния исполнения указанных требований при осуществлении организациями и гражданами своей деятельности.

«Система обеспечения пожарной безопасности представляет собой комплексное сочетание сил и ресурсов, применяемых в комплексе с правовыми, организационными, экономическими, социальными и научно-техническими мероприятиями, нацеленными на предотвращение, борьбу и ликвидацию пожаров». [16]

«Основные задачи системы включают в себя:

- Регламентацию и внедрение государственных мер в сфере предотвращения пожаров, в том числе через разработку и исполнение правовых актов.
- Образование профессиональной пожарной охраны и координация ее действий.
- Разработку стратегии и исполнение конкретных действий пожарной безопасности.
- Закрепление и исполнение правовых норм, обязанностей и ответственности по вопросам предотвращения пожаров.
- Проведение агитационно-просветительской деятельности и обучение населения основам пожарной безопасности.
- Поддержку инициатив добровольных пожарных отрядов, мобилизацию граждан для участия в деле обеспечения пожарной безопасности.
- Развитие научно-технических решений и технологий в области предотвращения пожаров.
- Распространение информации, обучающих материалов и рекомендаций по вопросам пожарной безопасности.
- Осуществление надзора и контроля за соблюдением норм и стандартов пожарной безопасности.
- Производство и снабжение специализированным оборудованием и техникой для пожаротушения.
- Оказание специализированных услуг, связанных с обеспечением пожарной безопасности, включая выполнение работ.
- Лицензирование деятельности, связанной с мерами пожарной безопасности, и подтверждение качества продукции и услуг в этой сфере.
- Непосредственное участие в тушении пожаров и проведение спасательных операций в чрезвычайных ситуациях.

- Ведение учетных данных о пожарах и анализ их последствий.
- Установление и поддержание особого режима в районах повышенного пожарного риска» [16].

Меры пожарной безопасности разрабатываются в соответствии с законодательством Российской Федерации по пожарной безопасности, а также на основе опыта борьбы с пожарами, оценки пожарной опасности веществ, материалов, технологических процессов, изделий, конструкций, зданий и сооружений.

В сфере пожарной безопасности процесс подтверждения соответствия представляет собой официальное подтверждение в документальной форме того, что изделия или различные объекты, а также выполнение работ и предоставление услуг, соответствуют установленным техническим регламентам, стандартам и нормативам пожарной безопасности или договорным условиям.

«ФЗ № 184–ФЗ регулирует отношения, возникающие при [16]:

- разработке, принятии, применении и исполнении обязательных требований к продукции, в том числе зданиям и сооружениям (далее – продукция), или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации;
- разработке, принятии, применении и исполнении на добровольной основе требований к продукции, процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг;
- оценке соответствия.»

Согласно 3 статье настоящего Федерального закона техническое регулирование осуществляется в соответствии с принципами:

- применения единых правил установления требований к продукции или к продукции и связанным с требованиями к продукции процессам проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнению работ или оказанию услуг;
- соответствия норм технического регулирования с эволюцией национальной экономики, усовершенствованием материально-технического оснащения и достигнутыми степенями научно-технического прогресса;
- независимости органов по аккредитации, органов по сертификации от изготовителей, продавцов, исполнителей и приобретателей, в том числе потребителей;
- единой системы и правил аккредитации;
- единства правил и методов исследований (испытаний) и измерений при проведении процедур обязательной оценки соответствия;
- единства применения требований технических регламентов независимо от видов или особенностей сделок;
- недопустимости ограничения конкуренции при осуществлении аккредитации и сертификации;
- недопустимости совмещения одним органом полномочий по государственному контролю (надзору), за исключением осуществления контроля за деятельностью аккредитованных лиц, с полномочиями по аккредитации или сертификации;
- недопустимости делегирования функций аккредитации и сертификации единственным учреждением;
- недопустимости финансирования деятельности государственного контроля (надзора) за соблюдением технических регламентов из внебюджетных источников;

— недопустимости назначения идентичных полномочий в области соблюдения требований технических регламентов нескольким органам государственного контроля (надзора).

«Законодательный корпус Российской Федерации, регламентирующий техническую сферу, включает в себя данный Федеральный закон, все федеральные законы, принятые на его основе, а также прочие регулирующие документы РФ. Отдельные статьи федеральных законов и других нормативных актов, имеющих отношение к области действия упомянутого Федерального закона и содержащих положения о контроле (надзоре) за выполнением технических регламентов, находят применение только в той мере, в какой они не противоречат основному закону». [16]

«Федеральный закон № 123-ФЗ был издан с целью охраны жизни, здоровья и имущества как физических, так и юридических лиц, а также защиты собственности государственных и муниципальных органов от пожарной опасности. Он устанавливает основные аспекты технического управления в сфере пожарной безопасности и вводит универсальные требования по пожарной защите для объектов защиты, включая продукцию, здания, сооружения, промышленные площадки, пожарно-технические изделия и товары массового пользования.» [16]

Закон РФ обязывает соблюдать следующие положения Федерального закона в определенных сферах деятельности:

- На этапах проектных работ, возведения объектов, осуществления капремонта, реконструкции, модернизации технического оснащения, смены целевой функции объектов, их техобслуживания, использования и ликвидации;
- при формировании, утверждении, реализации и обеспечении выполнения технических регламентов, разрабатываемых в соответствии с законом «О техническом регулировании», включающих постановления о пожарной безопасности, и стандартных документов по пожарной безопасности;

- в процессе создания технической документации для объектов, которые нуждаются в защите.

«Регулирование технических аспектов в области пожарной безопасности включает в себя:

- закрепление требований пожарной безопасности в нормативно-правовой базе РФ и в стандартных документах, касающихся продукции и процессов её проектирования, изготовления, использования, хранения, перевозки, продажи и утилизации;
- юридическую регламентацию взаимоотношений, связанных с применением и выполнением норм пожарной безопасности;
- юридическую регламентацию взаимоотношений, связанных с оценкой соответствия установленным требованиям.» [16]

Документами, регламентирующими нормы пожарной безопасности, являются государственные стандарты и своды правил, в которые включены соответствующие положения, а также другие регулирующие акты, добровольное применение которых позволяет обеспечить соблюдение постановлений данного Федерального закона.

К обязательным для исполнения нормативным правовым актам, кроме вышеуказанных Федеральных законов, регулирующих правоотношения в сфере пожарной безопасности, можно отнести Постановление Правительства РФ № 390 от 25.04.2012 (в ред. Постановления Правительства РФ от 17.02.2014) («Правила противопожарного режима в Российской Федерации») и Приказ МЧС России от 28.06.2012 № 375 (ред. от 27.12.2013) «Об утверждении Административного регламента Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий исполнения государственной функции по надзору за выполнением требований пожарной безопасности» (далее – Административный регламент МЧС России).

Правила противопожарного режима содержат требования пожарной безопасности, устанавливающие правила поведения людей, порядок

организации производства и (или) содержания территорий, зданий, сооружений, помещений организаций и других объектов в целях обеспечения пожарной безопасности.

Административный регламент МЧС России регламентирует исполнение государственной функции по надзору за выполнением требований пожарной безопасности.

Исполнение государственной функции по надзору за выполнением требований пожарной безопасности осуществляется Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий и его территориальными органами.

Предметом государственного надзора за выполнением требований пожарной безопасности органами власти, организациями и гражданами является:

- соблюдение требований пожарной безопасности органами власти, в том числе на объектах защиты, используемых (эксплуатируемых) ими в процессе осуществления своей деятельности;
- соблюдение требований пожарной безопасности организациями и гражданами на объектах защиты, используемых (эксплуатируемых) ими в процессе осуществления своей деятельности;
- соблюдение обязательных для применения и исполнения на таможенной территории Таможенного союза требований к пиротехническим изделиям и связанным с ними процессам производства, перевозки, хранения, реализации, эксплуатации, утилизации и правил их идентификации в целях защиты жизни и (или) здоровья человека, имущества;
- соответствие сведений, содержащихся в уведомлении о начале осуществления отдельных видов предпринимательской деятельности, требованиям пожарной безопасности;

- выполнение предписаний органов государственного пожарного надзора (ГПН);
- проведение мероприятий по предотвращению причинения вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям, имуществу организаций и граждан, государственному или муниципальному имуществу, угрозы возникновения пожара.

Органы ГПН и должностные лица органов ГПН в соответствии с компетенцией:

- а) организуют и проводят проверки органов власти, организаций и граждан;
- б) принимают предусмотренные законодательством Российской Федерации меры по результатам проверок в отношении:
 - 1) руководителей органов власти;
 - 2) собственников имущества;
 - 3) лиц, уполномоченных владеть, пользоваться или распоряжаться имуществом, в том числе руководителей организаций;
 - 4) лиц, в установленном порядке назначенных ответственными за обеспечение пожарной безопасности;
 - 5) должностных лиц в пределах их компетенции;
 - 6) граждан.

Итогом реализации полномочий государственного органа служит окончание административных операций, определенных данным Административным регламентом.

Кроме того, одним из важных направлений решения задачи повышения промышленной безопасности производств, является объективная оценка основных опасностей этих производств [14].

«Нормативные документы в области промышленной безопасности должны содержать требования промышленной безопасности, которые в соответствии с ФЗ–116, определяются как: – условия, запреты, ограничения и

другие обязательные требования, принимаемые в установленном порядке и соблюдение которых обеспечивает промышленную безопасность» [6].

Требования промышленной безопасности должны соответствовать нормам в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, санитарно–эпидемиологического благополучия населения, пожарной безопасности, охраны труда, строительства, а также требованиям государственных стандартов [25].

Регулирование стандартов, а также организация особого разрешения, осуществление надзора и контроля в сфере промышленной безопасности возложены Правительством Российской Федерации на Государственную горно-техническую инспекцию России. Это федеральный исполнительный орган, который имеет полномочия в области промышленной безопасности, задачей которого является принятие эффективных профилактических действий, предусмотренных законодательством и стандартами промышленной безопасности [15].

Цель работы по идентификации опасностей заключается в грамотном управлении рисками в сфере охраны труда – добиваясь уменьшения вероятности производственных несчастных случаев, инцидентов, аварий, пожаров, а также профессиональных заболеваний. На основе анализа рисков формируются и реализуются обоснованные меры и рекомендации, направленные на укрепление здоровья и повышение качества безопасности для сотрудников через превентивные действия, методы и практики.

Задачи, связанные с идентификацией опасностей, включают процессы выявления и описания потенциальных угроз, анализ возможных последствий их проявления, а также уменьшение рисков и их влияние на безопасную рабочую среду.

Системное обнаружение опасностей и соответствующая оценка рисков лежат в основе планирования и внедрения программ по здоровью и профессиональной безопасности работников, предназначенных для избежания травм и ухудшения состояния здоровья в рабочем процессе.

Процедура идентификации угроз и анализа рисков включает в себя несколько основных шагов:

- заготовка необходимых сведений для выявления опасностей и проведения оценки рисков;
- выделение тех видов деятельности или процессов работы, которые могут негативно повлиять на здоровье и безопасность персонала, сотрудников подрядных организаций и посетителей;
- выявление опасностей;
- анализ рисков;
- формирование перечня выявленных опасностей;
- риск-менеджмент: разработка и внедрение соответствующих стратегий управления и мер по сокращению или устранению рисков;
- создание программы по управлению рисками в секторе охраны здоровья и труда;
- информирование и обучение персонала в отношении выявленных опасностей и оценки рисков.

В рамках идентификации потенциальных угроз на территории отделений или предприятий особое внимание уделяется рассмотрению опасных и вредных производственных факторов. К таковым относятся физические, химические, психофизиологические и биологические факторы, которые соответствуют установленным нормам ГОСТ 12.0.003 [23].

В соответствии с документом [17], начиная с 1 января 2014 года, процесс аттестации рабочих мест на предмет условий труда был заменен на специальную оценку условий труда. Если аттестация рабочих мест была завершена до введения в действие Федерального закона о специальной оценке условий труда, то в дальнейшем такая оценка для указанных рабочих мест может быть не проведена в течение пяти лет после аттестации. В этом случае результаты проведенной аттестации могут использоваться в целях, установленных в новом Федеральном законе, при условии, что она была выполнена в соответствии с ранее действовавшими нормами.

Результаты аттестации могут применяться для ряда задач:

- немедленные меры для предотвращения ситуаций травматизма и угроз аварий;
- планомерная организация и внедрение мер по обеспечению охраны труда, отвечающих нормативно-правовым требованиям;
- организация работ по сертификации в области охраны труда на предприятии;
- разбирательство инцидентов на рабочем месте, включая судебные споры и разногласия;
- прекращение или приостановление работы цехов, участков или оборудования, трансформация производственных технологий в случае угрозы жизни и здоровью работников;
- внесение положений о компенсациях и льготах за работу во вредных условиях в трудовые контракты (например, дополнительные выходные дни, доплаты);
- информирование сотрудников о состоянии условий труда на рабочем месте;
- регулирование рабочего режима и отдыха сотрудников;
- применение административно-экономических воздействий за нарушения в сфере охраны труда.

Чтобы довести классификацию условий труда до приемлемого уровня (2 класс), требуется осуществление определенных организационных и технических изменений для улучшения рабочего окружения и нейтрализации воздействия опасных и вредных производственных факторов.

1.3 Система неразрушающего контроля и основные направления ее развития, методы и средства неразрушающего контроля

Неразрушающий контроль (НК) – это технический контроль, при котором пригодность детали не нарушается. В противном случае контроль называется разрушающим.

В процессе деструктивного контроля изделия подвергаются различным видам испытаний, в числе которых — на растяжение, твердость, ударную вязкость, возможность сохранения формы, а также пневматические и гидравлические тестирования, цель которых — определить способность материала или конструкции выдерживать заданные условия эксплуатации до момента разрушения.

Во время испытаний на растяжение вычисляют значение тестовой нагрузки на основе расчетов. Это делается для того, чтобы обеспечить, что самое узкое, и соответственно наиболее слабое, сечение детали выдерживало бы нагрузку, создающую напряжение в 157 МПа, что эквивалентно 16 КГс/мм². Такие расчеты необходимы для гарантии того, что материал или изделие будут достаточно прочными для своих функциональных задач в тех условиях, в которых они будут эксплуатироваться.

Основные методы неразрушающего контроля узлов и деталей турбокомпрессоров можно разделить на следующие:

- вихретоковый контроль;
- магнитопорошковый контроль;
- ультразвуковой.

В области обслуживания деталей и узлов компрессоров широко используются методы неразрушающего контроля (НК), которые позволяют оценить состояние объекта без его повреждения. Основные методы НК включают:

- магнитный контроль, применяемый для определения наличия поверхностных и подповерхностных дефектов в ферромагнитных материалах;
- электрический контроль, включающий в себя электрическую проводимость и контактную проверку на наличие повреждений;
- радиоволновый контроль, использующий электромагнитные волны для обнаружения дефектов и их локализации внутри материала;
- тепловой контроль, который идентифицирует неравномерности распределения температуры, указывающие на потенциальные дефекты;
- оптический контроль, включающий методы освещения и визуализации для выявления поверхностных неоднородностей;
- радиационный контроль, основанный на проникновении ионизирующего излучения и фиксации изменений его интенсивности при прохождении через материал.

Методы неразрушающего контроля группируются по общим физическим принципам. Классификация методов НК производится по следующим характеристикам.

По характеру взаимодействия поля или вещества с объектом контроля. Важно, чтобы взаимодействие индуцировало изменения, свидетельствующие о состоянии контролируемого объекта. Так, дефект в материале может вызвать изменение в распространении проникающего излучения или внесении пробного вещества.

По первичному информативному параметру, относящемуся к конкретному характеру изменения физического поля или вещества, таким как амплитуда, время распространения, количество вещества. Эти параметры обеспечивают количественную характеристику контролируемого объекта, например, отражают присутствие или отсутствие дефектов.

Методы магнитного неразрушающего контроля используются для диагностики недостатков и уязвимостей в ферромагнитных материалах, таких как сталь. Эти методы опираются на принципы взаимодействия

магнитных полей с контролируемым объектом, и включают процесс намагничивания исследуемой детали, чтобы затем оценить изменения магнитных свойств, вызванные дефектами.

При магнитном неразрушающем контроле используется набор параметров, полученных в результате намагничивания объекта. Ключевой характеристикой этого метода являются гистерезисные явления, которые происходят при вводе ферромагнитного материала в состояние намагниченности и его последующего перемагничивания. Анализ этих явлений позволяет выявить такие свойства материала как коэрцитивная сила и магнитная проницаемость.

Материалы, обладающие магнитной жесткостью, например, закалённая сталь, имеют более высокие значения коэрцитивной силы (H_c), что говорит о больших затратах энергии для размагничивания. Они также характеризуются меньшей магнитной проницаемостью (μ_a) в сравнении с магнитомягкими материалами, такими как незакалённая сталь, которые легче намагничиваются и размагничиваются. Количественные оценки этих параметров не только помогают идентифицировать дефекты в структуре, но и выявлять изменения в микроструктуре, которые могут влиять на эксплуатационные характеристики компонентов и систем.

$$\mu_a = B / H \quad (4)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, материала детали Гн/м;

B – магнитная индукция, Тл;

H – напряжённость магнитного поля, А/м.

Намагниченность материала определяется из соотношения

$$I = (B / \mu_0) - H \quad (5)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м.

В параметрическом анализе ферромагнитных материалов типично измерять магнитную проницаемость начального участка кривой намагничивания (μ_a) и интенсивность намагничивания (I) в условиях слабых магнитных полей (H). В случаях, когда требуется более детализированная информация, фиксируется и остаточная намагниченность (B_r) материала. Эти ключевые параметры служат индикаторами степени закалки, прочностных качеств и других важных характеристик материала.

Для определения содержания ферритной фазы в немагнитных материалах проводится измерение намагниченности насыщения (I_c) при воздействии сильных магнитных полей. Высокие значения I_c указывают на значительное присутствие феррита в составе материала.

Когда речь идет о немагнитных покрытиях, нанесенных на ферромагнитные основы, применение магнитных методов позволяет измерить толщину такого слоя. В этом контексте основной информативный параметр – это магнитный поток. Используя устройство с П-образным магнитом, эксперты располагают его на поверхности исследуемого объекта; они замеряют магнитный поток, проходящий через ферромагнитную основу, и учитывают рассеянный поток над поверхностью объекта. Зависимость здесь прямая: более тонкое покрытие обеспечивает больший магнитный поток через основание и меньший – над объектом. Напряженность магнитного поля измеряется непосредственно под изделием для точной диагностики.

Другим методом, позволяющим оценить магнитные потоки, является определение усилия, необходимого для отделения магнита от контролируемого объекта. Это испытание направлено на понимание силы связи между магнитом и объектом, что также может служить индикатором магнитных характеристик объекта, включая толщину покрытия.

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля позволяет детектировать поверхностные и подповерхностные дефекты, такие как трещины, на уровне размеров с длиной до 0,5 мм и шириной от 2,5 мкм. При

использовании постоянного магнитного поля, дефекты можно обнаружить на глубине до 2-3 мм от поверхности материала. Однако при применении переменного магнитного поля максимальная глубина выявления дефектов снижается из-за изменений в проникновении поля.

В дополнение к магнитному порошку, для выявления дефектов может применяться широкая магнитная пленка, аналогичная той, что используется в магнитофонах, но с увеличенной шириной (магнитографический метод). Прослеживание и интерпретация рассеянного магнитного поля осуществляется с помощью специализированного устройства с магнитофонной головкой в качестве датчика. Этот метод позволяет идентифицировать дефекты, которые находятся в более глубоких слоях, но при этом не обеспечивает такую же визуализационную наглядность, как магнитопорошковый метод.

Кроме того, для определения распределения поля рассеяния, вызванного наличием дефектов, и измерения магнитных свойств материалов могут использоваться разноплановые датчики: феррозонды (основанные на использовании ферромагнитного резонатора), преобразователи Холла (фиксирующие изменение напряженности магнитного поля) и магниторезисторы (чувствительные к изменению магнитного поля с изменением своего электрического сопротивления) [40].

Электропотенциальный метод является надежным подходом для анализа проводников, позволяя оценивать по падению потенциала как толщину проводящего слоя, так и обнаруживать поверхностные несплошности. Особый интерес представляет возможность измерения изменения потенциала, обусловленного обходом электрическим током дефектных участков, что способствует выявлению глубины дефектов с относительно низкой погрешностью.

Для определения химического состава различных материалов часто применяется термоэлектрический метод. Это осуществляется посредством прикладывания нагретого электрода к исследуемой поверхности и

последующего измерения термоэлектрической разности потенциалов, что приводит к получению данных о составе материалов, таких как различные марки стали, титан, алюминий и др.

Кроме этого, изучаются и разрабатываются такие электрические методы как экзоэлектронная эмиссия, способная выявлять ионы, исходящие от поверхностного слоя под воздействием внутренних напряжений, электроискровой для исследования параметров пробоя в среде и метод электростатического порошка. Несмотря на то, что эти технологии ещё не нашли широкого применения, они активно исследуются для возможного внедрения в практику.

Вихрековый метод представляет собой анализ взаимодействий между электромагнитным полем индукционной катушки преобразователя и вихревыми токами, индуцируемыми в электропроводящих объектах. Предоставляет возможность осуществлять контроль без прямого контакта, что важно для скоростной проверки. Развитие этого метода направлено на повышение эффективности проверки сложных и многослойных конструкций, минимизацию помех, и создание многочастотных и многоканальных систем для более глубокого анализа характеристик объектов.

Радиоволновой метод неразрушающего контроля использует электромагнитные волны в диапазоне радиочастот, в особенности применяются СВЧ-волны с длиной от 1 до 100 мм. Этот подход идеален для анализа продукции из материалов с низким уровнем демпфирования радиоволн, таких как различные диэлектрики (включая пластмассы, керамику и стекловолокно), магнитодиэлектрики вроде ферритов, а также полупроводники и металлические изделия с малой толщиной стенок. В зависимости от способа взаимодействия с исследуемым объектом различают методы на основе анализа прошедшего, отраженного и рассеянного излучения, а также метод резонанса.

Тепловидное неразрушающее исследование осуществляется путем фиксации изменений в температурных и тепловых полях контролируемых

объектов, причем такие методы применимы к материалам всех типов. В зависимости от типа взаимодействия теплового поля с объектом, методы делятся на пассивные — когда объект не подвергается воздействию внешних энергетических источников, и активные — с применением внешнего источника тепла или холода.

В качестве основного информационного параметра выступают температура и тепловой поток.

Пассивный метод контроля включает измерение тепловых потоков или температуры и позволяет выявлять нарушения в работе оборудования, характеризующиеся избыточным тепловыделением. Среди применений — обнаружение истончения футеровки печей, поиск мест утраты тепла в зданиях, нахождение перегретых участков в электрических сетях и радиоаппаратуре, выявление трещин в механизмах и т.д.

Активный метод представляет собой нагревание объекта с одной стороны и измерение температурных или тепловых параметров с другой его стороны. Такой подход позволяет обнаруживать разного рода несплошности, такие как трещины, пористость и включения, а также изучать изменения в структуре и физико-химических свойствах материалов на основании вариаций теплопроводности, теплоемкости и коэффициента теплоотдачи.

Сканирующий тепловизор выделяется как предпочтительный инструмент для бесконтактного мониторинга температурных полей и изучения тепловых потоков. Он обеспечивает детальное визуализирование тепловых профилей объектов, позволяя быстро и точно идентифицировать тепловые аномалии, которые могут указывать на наличие скрытых дефектов.

Оптический метод неразрушающего контроля основывается на исследовании параметров света, проходящего через объект контроля, отражённого от него, рассеянного им или испускаемого в результате внешнего воздействия, такого как индуцированное люминесценционное излучение.

Информативными параметрами выступают амплитуда, фаза, степень поляризации света, его частота или спектр, время прохождения через материал, а также изменения в геометрии преломления или отражения лучей. Эти оптические методы находят широкое применение в контроле прозрачных материалов, позволяя выявлять как макроскопические, так и микроскопические дефекты, структурные неоднородности и внутренние напряжения, проявляющиеся изменениями в поляризации света. Современные технологии, включая использование волоконной оптики, лазерного оборудования, оптической голографии и телевизионных систем, значительно расширили область применения и повысили точность оптических методов неразрушающего контроля.

В области радиационного неразрушающего контроля задачей является фиксация проникающего ионизирующего излучения и анализ данных после прохождения через объект контроля. Эти методы позволяют обнаруживать внутренние дефекты и неоднородности в материалах, и они особенно ценны для анализа объектов, где другие методы неприменимы из-за высокой плотности или сложности материалов.

Типы радиационного неразрушающего контроля дифференцируются в соответствии с характеристиками ионизирующего излучения. К ним относятся рентгеновский контроль, гамма-контроль, бета-контроль (использующий поток электронов), а также нейтронный контроль. В последнее время инновационный подход связан с использованием позитронов, потоки которых, поглощаясь материалом, дают информацию о наличии областей с различным содержанием электронов.

Среди различных подвидов наиболее распространены методы, которые используют рентгеновское и гамма-излучение ввиду их универсальности и способности проникновения.

Оптимизация контроля достигается за счет подбора подходящего частотного диапазона излучения для разнообразных материалов. Основной техникой при данных методах является регистрация прошедшего сквозь

материал потока излучения, так как различные материалы и дефекты имеют разные свойства поглощения. Повышенное поглощение толщиной объекта контроля предполагает использование более высокочастотных типов излучения, например рентгеновского или гамма-излучения от радиоактивных источников, а также более жесткого тормозного излучения с ускорителями электронов. Толщина стальных объектов, которые могут быть эффективно исследованы с помощью последних, достигает приблизительно 600 мм.

Для детектирования излучения применяются различные приемники, включая радиографические пленки, сканирующие сцинтилляционные счетчики частиц и фотонов, а также флуоресцентные экраны, связанные с системами визуализации изображений.

Перспективным направлением в этом сегменте является разработка и применение вычислительной томографии для глубокого анализа внутреннего строения материалов.

Акустический метод неразрушающего контроля ориентирован на фиксацию параметров упругих волн, в частности, ультразвуковых волн с частотой свыше 20 кГц. В отличие от ранее упомянутых методов, которые используют электромагнитные волны, ультразвуковая техника задействует упругие волны, взаимодействующие с материалами.

Эти волны позволяют оценить физические характеристики, такие как модули упругости, плотность и анизотропию, обеспечивая широкий спектр приложений в проверке различных материалов, от металлов до керамики и бетона.

Акустические методы неразрушающего контроля классифицируются на пассивные и активные подходы в зависимости от их взаимодействия с объектом контроля (ОК).

Пассивный метод фиксирует упругие волны, которые возникают в результате работы самого механизма. Данный подход, известный как шумовибрационный анализ, позволяет по звуковым характеристикам механизма, например, по его амплитудно-частотной характеристике и

местоположению возникновения шума, определить его рабочее состояние и выявить возможные неисправности.

Активные методы, в частности ультразвуковые, находят более широкое применение. Они используют возникновение стоячих волн в объекте или его частях и распространение бегущих волн по различным схемам, включая прохождение и отражение. Эти методы применяются для одностороннего измерения толщины и анализа свойств материалов, таких как модуль упругости и коэффициент затухания, где информационным параметром служат частоты и амплитуды свободных или вынужденных колебаний объекта.

С точки зрения стоимости, наиболее дорогостоящими являются радиографические методы и методы течеискания, что объясняется затратами времени на проведение контроля и необходимостью вложений в специализированное оборудование и помещения.

Капиллярный контроль также отличается низкой производительностью. При сравнении расходов на радиационный контроль и ультразвуковое исследование сварных соединений толщиной 10-20 мм, расходы на ультразвуковой контроль будут в 3-5 раз меньше, с увеличением толщины сварных соединений разница в стоимости станет еще более заметной.

Текущие системы неразрушающего контроля (НК) способны обнаруживать множество опасных дефектов, предотвращая использование неисправных деталей.

Однако разнообразие приборов с ручным сканированием и трудоемкость процесса снижают общую эффективность. Решением может стать внедрение модульных систем механизированного и автоматизированного контроля, которые способствуют комплексному выявлению внутренних дефектов деталей, обслуживаемых без разборки. Такие системы должны гарантировать обнаружение критических неисправностей и оценивать накопленные утомительные повреждения.

Во ВНИИЖТе, НИИмостов (г. Санкт–Петербург), в фирме «Зонд», ЗАО «Алтек» (г. Санкт–Петербург), ООО «Микроакустика» (г. Екатеринбург), других организациях и вузах ведутся работы по созданию автоматизированных систем технического диагностирования сборочных единиц и деталей.

Исследования и разработки в области неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) направлены на четыре основные области, каждая из которых имеет важное значение для прогресса в этом секторе.

Разработка методов и средств НК и ТД включает создание новых или улучшение существующих техник и инструментов, используемых для обнаружения дефектов и оценки состояния материалов, продукции и оборудования. Этот аспект охватывает инновационные подходы, новые типы датчиков, усовершенствованные алгоритмы обработки данных и разработку более точного измерительного оборудования.

Разработка единой системы контроля объектов направлена на интеграцию различных методов НК и ТД в единую синергетическую систему, обеспечивающую комплексный подход к контролю качества и безопасности. В эту систему входят программное обеспечение для управления и анализа данных, интегрированные платформы для сбора данных и стандартизированные процедуры для различных отраслей и типов оборудования.

Совершенствование диагностических технологий заключается в улучшении технологического процесса самой диагностики, что обеспечит более эффективное и точное определение технического состояния объектов. Важными аспектами являются автоматизация контрольных процессов, сокращение времени диагностики и усиление информативности результатов.

Организационное обеспечение НК и ТД включает в себя разработку политики и стратегии, а также формирование правовой и нормативной базы для регулирования процессов неразрушающего контроля и технической диагностики. Кроме того, данное направление подразумевает обучение

кадров, адаптацию технических стандартов к международным требованиям и обеспечение качественного уровня исполнения операций контроля и диагностирования.

Вывод по первому разделу.

В данном разделе рассмотрены аварии и проведен их анализ на предприятиях нефтепереработки. Выявлены причины аварии, особенности и их виды. Самая опасная авария это разгерметизация аппаратуры и выброс опасных веществ.

Изучена нормативно-правовая база обеспечения безопасности эксплуатации опасных производственных объектов. Кроме федеральных законов, были рассмотрены постановления, правила и регламенты.

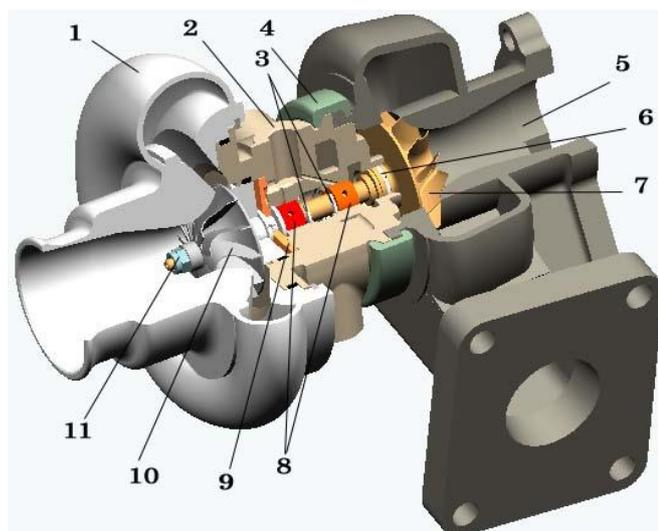
Описаны основные методы неразрушающего контроля, которые применяются на предприятиях. Основные методы являются: вихретоковый контроль, магнитопорошковый контроль, ультразвуковой контроль. С помощью этих методов можно оценить состояние и повреждение объекта исследования. Разработка методов и средств контроля включает создание новых или улучшение существующих техник и инструментов, используемых для обнаружения дефектов и оценки состояния материалов, продукции и оборудования.

В рамках данной работы предлагается проведение анализа и оценки эффективности организации и проведения диагностики и контроля оборудования с применением автоматизированных систем технического диагностирования.

2 Технические элементы, обеспечивающие безопасную эксплуатацию технологического оборудования

2.1 Герметизация технологического оборудования

Турбокомпрессор представляет собой сложное устройство, основным компонентом которого является ротор. Ротор состоит из колеса турбины и колеса компрессора, соединенных общим валом. Колесо турбины приводится в движение за счет энергии отработанных газов, в то время как противоположный конец вала заканчивается колесом компрессора, который нагнетает воздух в двигатель. Для обеспечения бесперебойной работы и минимизации износа ротор укреплен в подшипниках скольжения. Эти подшипники обеспечивают необходимую подвижность и стабилизацию ротора при его вращении. Осевое положение ротора фиксируется с помощью гидродинамического подпятника, который удерживает его от смещения под действием рабочих нагрузок. Главным элементом системы смазки является упорная стальная втулка, имеющая канавку для бронзовой или чугуновой фигурной пластины. Эта пластина оснащена отверстиями для подачи масла, что позволяет поддерживать надежное смазывание и отвод тепла от основных компонентов ротора. Система подачи масла от маслосистемы двигателя создает необходимое давление, благодаря чему подшипники и гидродинамический подпятник остаются надежно смазанными. Корпус турбокомпрессора оборудован каналами, которые выполняют функцию подвода смазывающего масла к необходимым компонентам и его слива обратно в маслосистему. Некоторые модели турбокомпрессоров также оснащены каналами для жидкостного охлаждения, что еще более повышает их эффективность и продлевает срок службы за счет поддержания оптимального температурного режима (рисунок 1) [12].



1 - улитка компрессора; 2 - корпус; 3 - стопорные кольца; 4 - стяжной хомут; 5 - улитка турбины; 6 - уплотнительное кольцо со стороны турбины (аналогичное есть со стороны компрессора, на рисунке его не видно); 7 - колесо турбины; 8 - промежуточные втулки подшипников скольжения; 9 - упорный подшипник скольжения; 10 - колесо компрессора; 11 – гайка

Рисунок 1 – Турбокомпрессор в разрезе

Для предотвращения проникновения масел из масляной камеры в газоздушный тракт применяются специализированные сальники. На стороне турбины часто используются уплотнения, усиленные пружинным разжимным кольцом. Это уплотнительное кольцо, изготовленное из высококачественного чугуна или стали, фиксируется в корпусе статично и обеспечивает минимальный зазор в канавке на валу. Напротив, уплотнение со стороны компрессора зачастую представляет собой сходную схему, однако в некоторых моделях турбокомпрессоров дополнительно применяются графитовые или карбоновые торцевые уплотнения [31].

Сложные операционные условия турбокомпрессоров, такие как значительные температурные перепады между турбиной и компрессором, интенсивное скольжение деталей, вибрации, а также другие нагрузки, могут приводить к их преждевременному износу и поломкам. Подобные отказы не только наносят экономический ущерб, но и вредят окружающей среде из-за выходящих загрязняющих веществ.

Система смазки предназначена для снижения трения между подвижными частями, отведения избыточного тепла и удаления продуктов износа путем подачи масла под определенным давлением. Давление в системе должно поддерживаться не менее чем на уровне 0,2 МПа, чтобы гарантировать адекватное давление смазки при различной степени зазора между сопрягаемыми поверхностями.

Влияние на эффективность работы турбокомпрессора оказывают такие факторы, как состояние уплотнительных элементов, износ подшипников скольжения и величина дисбаланса вала. Анализ износа элементов уплотнения, таких как уплотнительное кольцо и малозапорная шайба, извлеченных в процессе ремонта, указывает на гидроабразивный износ в качестве преобладающей причины отказа этих компонентов [34].

Большинство специализированных предприятий по ремонту турбокомпрессоров склонны считать, что основные причины неисправностей связаны с повреждениями уплотнительных колец и дефектами посадочных поверхностей, предназначенных для них [34].

Однако обширные исследования в области турбокомпрессорного оборудования, проведенные лабораторными экспертами [35], указывают на то, что долговечность уплотнений оказывает значительное влияние на общий ресурс турбокомпрессоров. В то же время, поломка уплотнений часто является результатом других, менее заметных дефектов, которые могут оставаться невидимыми при поверхностном осмотре.

Так, проведенный в лабораторных условиях многолетний анализ выявил основные факторы, влияющие на сокращение надёжности турбокомпрессоров. К ним относятся технологические нарушения, такие как несоосность отверстий под подшипники и под уплотнительные кольца, а также нарушения перпендикулярности между поверхностями для подшипника и посадочными поверхностями для уплотнений. Это ведёт к смещению вала и, как следствие, к неправильной работе уплотнительных колец.

Статистика анализа турбокомпрессоров, занимающихся ремонтными работами, показывает, что приблизительно 80% отказов приходится на износ подшипников скольжения, валов и уплотнений. Примечательно, что около 5% неполадок обусловлены проникновением посторонних предметов в лопатки компрессора и турбины. Ещё около 5% отказов можно обосновать нарушениями в работе системы смазки и другими причинами, о которых не упоминается в отчётах [20].

Чтобы минимизировать риски повреждения компрессорного колеса турбокомпрессора, крайне важно контролировать отсутствие инородных предметов, таких как детали воздушного фильтра, фрагменты резины, проволоки, а также крепёжные элементы, например болты, гайки и шайбы. Эти объекты, даже небольших размеров, способны при попадании во впускной патрубков вызвать серьёзные повреждения лопаток компрессора.

Среди причин повреждений турбокомпрессорных роторов (ТКР) значительное место занимают неисправности системы смазки. Это включает в себя загрязнения в трубопроводах, через которые циркулирует масло, предназначенное для смазывания подшипниковых узлов в ТКР. Важно обеспечивать, чтобы в условиях интенсивных нагрузок в систему поступало достаточное количество масла нужного качества и соответствующей марки.

Температурные режимы также оказывают существенное влияние на функционирование ТКР. Например, неправильно сконфигурированная топливная аппаратура может приводить к излишне высокой температуре отработанных газов, что повышает вероятность поломок.

Заблаговременная замена воздушных фильтров исключает риск накопления загрязнений внутри турбокомпрессора, предотвращая уменьшение объёма воздушного потока и перегрев, а также возникновение вакуума во всасывающем тракте, что может вызвать просачивание масла через уплотнения.

Гарантией надёжной эксплуатации ТКР является строгое соблюдение регламентированных условий эксплуатации: исключение попадания

инородных тел в роторные узлы, поддержание оптимальных температурных параметров и использование высококачественного смазочного материала в нужном объёме.

Торцевые уплотнения с металлическими элементами относятся к наиболее распространенным механизмам уплотнения, имеющим широкий спектр применения. Основной конструкцией такого уплотнения являются три ключевых компонента: два уплотнительных кольца, одно из которых вращается, а другое неподвижно, образуя тем самым пару трения с плоской контактной поверхностью, и упругий элемент, который гарантирует надежный контакт между кольцами.

Вращающееся кольцо сцеплено с валом и обеспечивает его плотное прилегание благодаря упругому элементу. Это обеспечивает сохранение герметичности и компенсацию вибраций, смещений или износа в системе трения. В значения зазора в паре трения закладывается мера утечки среды - будь то жидкость или газ - из давальной зоны устройства [38].

Конструктивные параметры торцевого уплотнения определяются на основании нескольких факторов: диаметра вращения вала, его скорости, точности исполнения, амплитуды колебаний, возможности смещения, а также размерных и монтажных требований, предъявляемых к уплотнению. Важно и то, при каких условиях будет производиться монтаж или демонтаж уплотнения, например, при его замене. Также при проектировании уплотнения принимается во внимание среда, в которой оно будет использоваться: её физико-химические характеристики, агрегатное состояние, давление, температура, вязкость, наличие твердых частиц или солей, химическая активность и защита от огня, а также степень опасности для человека и окружающей среды.

Торцевые уплотнения могут быть классифицированы в зависимости от их конструкционных особенностей на две основные категории: первая категория включает уплотнения с использованием пружин, вторая категория

представляет динамические уплотнения, действующие на основе различия давлений.

В рамках применения торцевых уплотнений они классифицируются на основе условий их работы на четыре основные категории.

- уплотнения для неагрессивных и слабоагрессивных сред, подобных маслам, нефтепродуктам, воде и тому подобное – предназначенные для защиты от веществ, которые не оказывают высокой химической коррозии;
- уплотнения для сильно коррозионных или химически агрессивных сред, включая кислоты, щелочи, газы и прочие - эти уплотнения спроектированы для выдерживания более жестких химических воздействий;
- уплотнения, рассчитанные на контакт со средами, содержащими существенное количество твердых частиц и примесей - эти устройства адаптированы для работы в условиях, где могут присутствовать крупные элементы загрязнения.

Специальные уплотнения рассматриваются отдельно, так как их производство часто ограничено мелкими партиями или даже индивидуальными заказами, обусловленными уникальными требованиями, такими как экстремальные давления, температуры (включая криогенные условия), чрезвычайно высокие скорости вращения вала или значительные диаметры вала. К специальным уплотнениям относятся также разъемные торцевые уплотнения, которые могут быть заменены без полного демонтажа машины, а также конструкции с повышенной надежностью, используемые в местах с ограниченным доступом для технического обслуживания.

Для торцевых уплотнений характерно использование трёх типов пар трения:

- обыкновенные, представляющие собой контакт между двумя кольцами с плоскими поверхностями для обеспечения трения;

- гидродинамические, имеющие прорисованные на поверхности контактного кольца специальные элементы, например наклонные или ступенчатые участки, которые создают гидродинамические силы во время вращения;
- гидростатические, где одно из колец оснащено камерами и канавками, в которые подается смазывающая жидкость под давлением для создания плотного и непрерывного гидростатического контакта между поверхностями.

Торцевые уплотнения характеризуются различными зазорами в зависимости от конкретного вида пары трения. Так, стандартные пары трения имеют зазоры в диапазоне от 0,5 до 2 микрон. Гидродинамические пары обладают зазорами свыше 2 микрон. А для гидростатических пар характерны ещё более значительные зазоры, превышающие 5 микрон. Разнообразие величин зазоров обуславливает различие в механизмах герметизации для каждой из пар трения.

В узлах с обычными парами трения наблюдается контакт между микронеровностями трёх поверхностей, что способствует изнашиванию. Гидродинамические пары проявляют меньшую степень контакта микронеровностей за счет разделительного слоя жидкости, что ведет к более случайному характеру взаимодействия. В гидростатических парах трения отсутствуют контакты микронеровностей, и трение происходит в условиях идеальной гидродинамической смазки.

Имеется оптимально рекомендуемый размер для высоты уплотнительных колец, составляющий от 1,8 до 2,2 миллиметров. Снижение высоты кольца может привести к увеличению его коробления, возрастанию удельного давления на внешний диаметр и уменьшению прочности кольца. Напротив, увеличение высоты кольца усиливает его жесткость, что может отрицательно сказаться на прирабатываемости из-за возрастания сопротивления перемещения кольца в корпусе уплотнения.

Динамическое воздействие со стороны шероховатостей и давление смазывающей жидкости в зазоре формируют силу, прижимающую две поверхности друг к другу. При повышении этой силы увеличивается площадь контакта шероховатостей, что приводит к уменьшению среднего зазора в паре трения и увеличению герметичности. Однако с ростом контактного давления увеличивается температура в уплотнительном зазоре, что влияет на износ материала.

Макрогеометрия кольца также играет существенную роль, оказывая значительное воздействие на герметичность уплотнения [31].

На правильное функционирование технических устройств влияет качество их ремонта и обслуживания. Эффективность и надежность техники зависит от качества запасных частей, включая те, что были восстановлены, что определяет продолжительность их эксплуатационного ресурса [13].

Анализ ремонтного потенциала деталей турбокомпрессоров позволяет утверждать, что значительное число компонентов имеет потенциал для дополнительного использования или возможностей восстановления. Конкретные данные указывают на то, что в среднем до 20% деталей приходится отбраковывать, между тем 25–40% остается пригодными для непосредственного повторного использования. Оставшаяся часть деталей поддается восстановлению, тем самым позволяя поддерживать оперативную готовность турбокомпрессоров.

Срок службы большинства турбокомпрессоров зависит от состояния ограниченного числа ключевых компонентов. Это обстоятельство позволяет спланировать необходимый объем работ по восстановлению деталей с учетом их износостойкости и критичности для работы механизма.

При этом одной из наиболее уязвимых подсистем турбокомпрессора выступает торцевое уплотнение, отказы которого часто становятся причинами сбоев в работе оборудования. Для его изготовления используются высокопрочные материалы, такие как сталь 45X и допустимая альтернатива,

сталь 40X, а уплотнительное кольцо производится из чугуна особой твердости, HRC 94...104 [15].

В процессе эксплуатации поверхности трения уплотнений подвергаются интенсивному гидроабразивному износу, что приводит к деградации их геометрических параметров и, как следствие, ухудшению общей функциональности агрегата. Анализ износа показывает, что убыль материала уплотнительного кольца может достигать значений порядка 8...10 микрометров. Причем, износ носит неравномерный характер; существенная его доля приходится на торцевую поверхность кольца со стороны компрессора, считаемую активной, в отличие от пассивной поверхности кольца, расположенной со стороны турбины.

Учитывая высокую стоимость комплектующих и вместе с тем их не всегда удовлетворительное качество, целесообразным является выбор стратегии производства и последующего восстановления тех деталей, которые могут быть адаптированы и успешно функционировать в заданных условиях эксплуатации турбокомпрессора.

Изнашивание контактных поверхностей, задействованных в парах трения, усиливается ввиду оказываемого воздействия механического трения. Возрастание износа происходит из-за присутствия в смазочном масле, подаваемом через центральное отверстие, твердых абразивных частиц. В процессе вращения эти частицы, под влиянием центробежной силы, перемещаются на поверхность трения, что приводит к их дополнительному гидроабразивному износу [39].

Деструкция материалов в паре трения, вызванная присутствием микроскопических абразивных частиц, проявляется через механизмы срезания, выкрашивания, выбивания и многократного пластического деформирования на микроуровне. Факторы, определяющие интенсивность процесса изнашивания, включают скорость движения абразивных частиц, их свойства, форму, температуру и степень загрязнения потока смазочного

материала, а также физико-механические характеристики материала, подвергающегося износу [15].

Высокие температуры в зоне трения также существенно влияют на износ, важность условий теплоотвода в данном контексте нельзя недооценивать, так как они напрямую зависят от теплопроводности используемых материалов и смазочных сред. С низкой теплопроводностью материала следует более высокий нагрев в зоне контакта пары трения что сопряжено с усилением воздействия выхлопных газов. Это может привести к тому, что условия трения становятся ближе к сухому трению, поскольку смазочная жидкость способна переходить в газообразное состояние. Эта ситуация может усугубиться терморастрескиванием при дальнейшем повышении температуры в зоне трения. Тем не менее, механизмы износа пар трения еще не полностью поняты. Современные концепции объясняют износ, как правило, через процессы усталости материалов и выражаются в ряде фундаментальных принципов [31].

Взаимодействие твердых тел в контакте проявляется через дискретные точки соединения, вызванные гетерогенностью их физико-химических свойств, присутствием шероховатостей и вкраплений незначительных твердых частиц. Общая контактная площадь формируется за счет суммирования этих микроскопических точек физического соприкосновения.

При определенных условиях нагрузки, а также учитывая физическую природу материалов и особенности микротопографии смежных поверхностей, можно наблюдать разнообразные механические состояния материалов в контактной зоне. Они включают в себя как механическое взаимодействие, представленное упругим и пластическим контактом, а также микрорезанием, так и молекулярное взаимодействие как адгезия поверхностных слоев.

Процесс скольжения сопровождается постоянной миграцией области непосредственного контакта вдоль поверхностей трения. Материалы, примыкающие к зоне фактического контакта, подвергаются повторяющимся

механическим воздействиям, что приводит к накоплению дефектов, инициирующих микротрещины и последующее отслоение частиц материала, формирующих износ. Этот процесс характеризуют как фракционную усталость. Стоит отметить, что в период предразрушения на поверхностном слое материала могут происходить разнообразные химические и физико-химические реакции, влияющие на процесс изнашивания.

В условиях работы кольца и шайбы уплотнения, скорости скольжения и давления диктуют двухфакторный подход к износу, где механическое и термическое воздействия являются совместно действующими агентами [31]. При возрастании контактного давления отмечается усиление износа за счет смещения смазывающей пленки и расширения области реального контакта. Этот процесс усугубляется при увеличении удельного давления и скорости скольжения, что вызывает коэффициент трения к подъему и недостаточному отводу тепла, ведущему к повышению температуры, активизации химических реакций, возникновению термогальванической коррозии, а также к коксованию и образованию смол при использовании определенных видов масел, влияющих на общий износ. В реальных рабочих ситуациях износ пропорционален скорости скольжения и уровню приложенного давления.

Из-за сложности условий, в которых функционирует уплотнительное устройство, многочисленные факторы определяют жесткие требования к выбору материалов. Они должны обеспечивать быструю прирабатываемость, низкие антифрикционные качества и высокую теплопроводимость. Износостойкость трений пар несет ключевую эксплуатационную роль, обуславливая требования к материалам для производства и реставрации компонентов. Выбранный материал должен отличаться механической прочностью и технологичностью, а трение пары должно минимизировать коэффициент трения и исключать заедания. Конструкция и методы производства должны поддерживать стабильный зазор между торцами кольца и его посадочным местом. Для повышения стойкости к износу рабочие поверхности колец покрываются твердым хромом или шпионятся

оловом [19]. В качестве основного материала для изготовления уплотнительных колец применяют специальный чугун, придавая ему необходимые эксплуатационные свойства с помощью выбора режимов термообработки, что влияет на механические характеристики и устойчивость к износу [31].

Использование газовых турбин на практике выявило множество сложностей, актуальность решения которых не теряется и в наши дни [31]. Маневрирование газотурбинных установок на частичных нагрузках, а также их запуск и остановка порой создают условия для потока воздуха около лопаток, способствующие формированию зон трансзвукового течения на крайних сечениях рабочих лопаток и отрывам пограничного слоя от поверхности лопаток [30]. Такие зоны могут сильно влиять на напряженное состояние лопаток, что, в свою очередь, важно для надежности турбины.

«Применение сотовых уплотнений в радиальных зазорах газовых турбин может заметно улучшить производительность за счет благоприятной геометрии ячеек, уменьшая утечки рабочего тела и повышая тем самым эффективность отдельных ступеней. Экспериментальные результаты, полученные в процессе испытаний таких уплотнений, используются для настоящего исследования, чтобы коррелировать качественные и надежные параметры уплотнений с их гидродинамическими характеристиками, включая в анализ характеристики эксплуатации уплотнений» [31].

Кроме того, между лопатками ротора и турбинным корпусом необходим радиальный зазор, чтобы избежать контакта ротора со статором. В «холодном» состоянии этот зазор рассчитывается таким образом, чтобы исключить возможность контакта лопаток с корпусом во время работы, а также в моменты пуска и остановки двигателя. Следует отметить, что в условиях реального функционирования турбины этот зазор обычно оказывается меньше монтажного из-за теплового расширения ротора, которое превышает тепловую дилатацию статора. В периферийных частях

турбинной ступени протекают сложные трехмерные течения рабочего вещества, осложняющие процессы обтекания [34].

Задачей проведенного комплекса экспериментальных работ было оценить сравнительную эффективность применения гладких и сотовых уплотнений с учетом разнообразных размеров радиальных зазоров. Дополнительно рассматривалось сравнение двух принципиально разных типов сотовых уплотнений, в контексте их применения как в конструкции компрессоров, так и в контуре турбинной ступени. Результаты данных исследований были выполнены с использованием масштабной модели одноступенчатого газового агрегата.

Подробное изображение проточной части турбинного оборудования и распределения точек измерений в рамках ступени потока представлено на рисунке 2. Основные геометрические параметры анализируемой ступени представлены в таблице 3.

Эксперименты, направленные на анализ производительности турбинной ступени, осуществлялись при интеграции в ее дизайн сотовых и традиционных гладких уплотнений, которые были установлены в качестве периферийных элементов для рабочего колеса без бандажа. За основу геометрии ячеек уплотнения был взят профиль регулярного шестиугольника, выполненных из стальной фольги с толщиной в 0,25 мм. Глубина ячеек уплотнений достигала значения в 5 мм ($h_{\text{я}} = 5 \text{ мм}$).

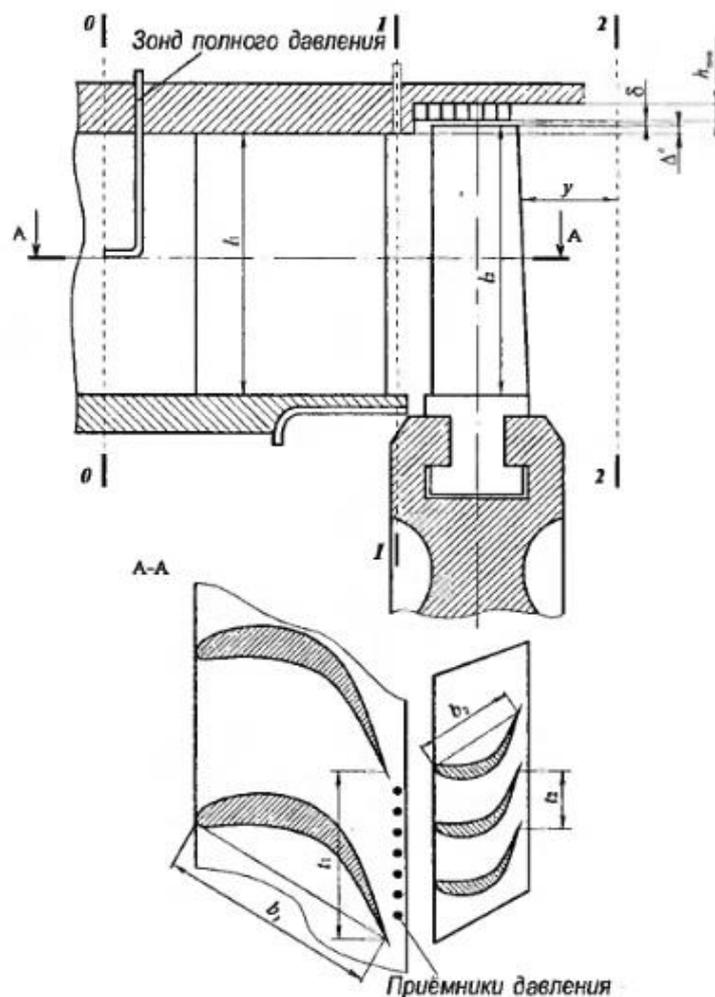


Рисунок 2 – Схема проточной части

«Испытывались сотовые уплотнения с диаметрами ячеек $d_{я} = 4$ мм и $d_{я} = 2,5$ мм (соотношения $h_{я}/d_{я}$, при этом соответственно $h_{я}/d_{я} \approx 1$ и $h_{я}/d_{я} = 2$). Для изменения радиальных зазоров в ходе экспериментов применялась методика расточки обечайки, расположенной над рабочим колесом турбинной ступени. Этот подход гарантировал неизменность величины положительной перекрыши для всех испытаний, которая поддерживалась на уровне $\Delta//=1,2$ мм. Диапазон изменения величины радиального зазора составил $\delta = 0,5...3$ мм (относительный зазор $\bar{\delta} = \delta / l = 0,6...4\%$)» [31].

Таблица 3 – Геометрические параметры экспериментальной ступени

Параметр	Обозначение единицы	Направляющий аппарат	Рабочее колесо
Диаметр средней окружности, D_{cp}	мм	383,3	382,5
Высота лопатки, l	мм	70,3	71,5
D_{cp}/l	-	5,45	5,35
Хорда лопатки, b	мм	60	23,2
l/b	-	1,17	3,08
Число лопаток, z	шт	36	70
Шаг лопаток, t	мм	33,44	17,16
$(t/b)_{cp}$	мм	0,56	0,74
Толщина выходной кромки, $U_{вых}$	мм	0,25	0,3
$U_{вых}/b$	-	0,004	0,013

На рисунке 3 демонстрируются функциональные связи, отображающие вариации относительного внутреннего коэффициента полезного действия (КПД) турбинной ступени в зависимости от соотношения скоростей u/C_0 . Эти связи показываются для разных величин радиального зазора, характерных для турбинной установки, оснащенной гладкими уплотнениями.

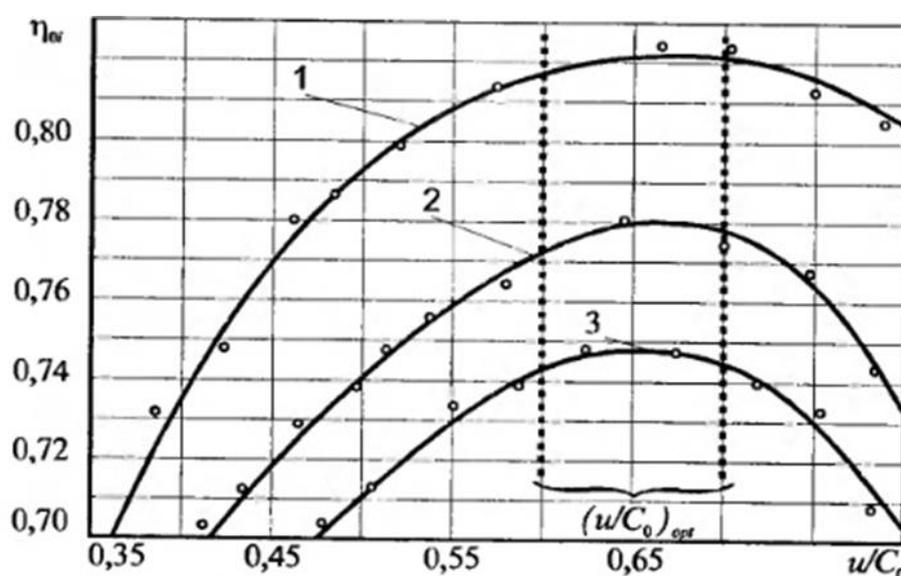


Рисунок 3 – Зависимость относительного внутреннего КПД ступени с гладким уплотнением от u/C_0 при различных радиальных зазорах δ : 1-0,5 мм; 2-1,4мм; 3-3 мм

Аналогичные зависимости для ступени с сотовыми уплотнениями различной геометрии показаны на рисунке 4.

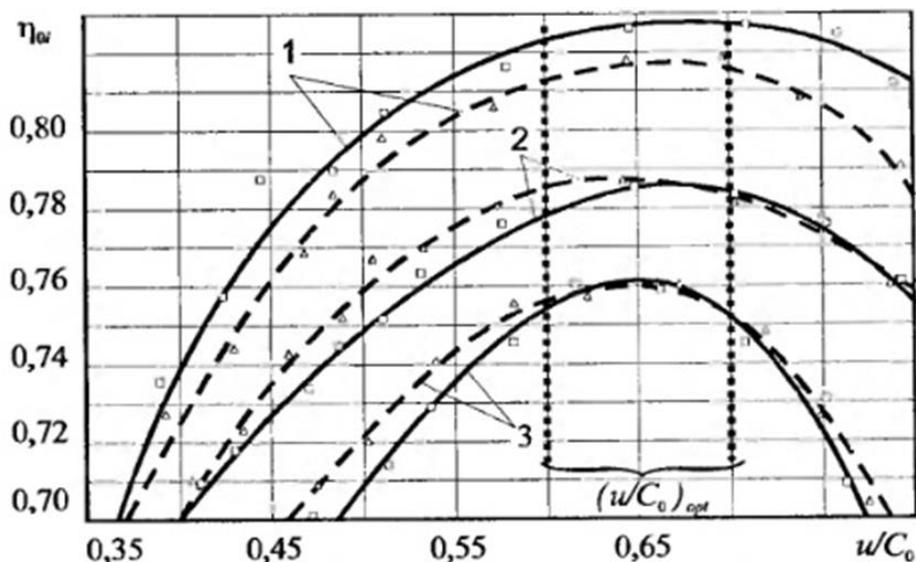


Рисунок 4 – Зависимость относительного внутреннего КПД ступени с сотовым от u/C_0 при различных радиальных зазорах δ : $d_{я} = 4,0$ мм; $d_{я} = 2,5$ мм. 1-0,5 мм; 2-1,4 мм; 3- 3 мм

Анализ данных, представленных на графиках рисунков 3 и 4, позволяет сделать вывод о том, что коэффициент полезного действия (КПД) турбинной ступени с использованием сотовых уплотнений превосходит показатели ступени с гладкими уплотнениями в диапазоне оптимальных значений отношений скоростей u/C_0 , составляющих от 0,6 до 0,7. Тем не менее, при крайне низких значениях радиального зазора ($\delta = 0,5$ мм), наблюдается повышенный КПД у ступеней с гладким уплотнением по сравнению с теми, что имеют сотовое уплотнение с шириной ячейки $d_{я} = 2,5$ мм. В то же время, сотовые уплотнения с большей шириной ячейки $d_{я} = 4$ мм показывают лучшие результаты. Это различие между конструкциями уплотнений связано с особенностями процесса течения воздушного потока через радиальные зазоры, которые зависят от конкретных параметров сотовых уплотнений.

«Дополнительное подтверждение более высокому КПД ступеней с сотовыми уплотнениями получено в процессе траверсирования потока в

области за рабочим колесом, результаты которого представлены на рисунке 5. В ходе исследования обнаружена заметная специфика работы сотовых уплотнений, выражающаяся в эффекте «запирания» утечки рабочего тела через радиальные зазоры. В случае применения гладких уплотнений, в периферийной части лопасти и районе радиального зазора фиксируется значительное отклонение параметров потока и высокие осевые скорости, что способствует увеличению потерь рабочего тела из-за утечек через радиальный зазор» [31].

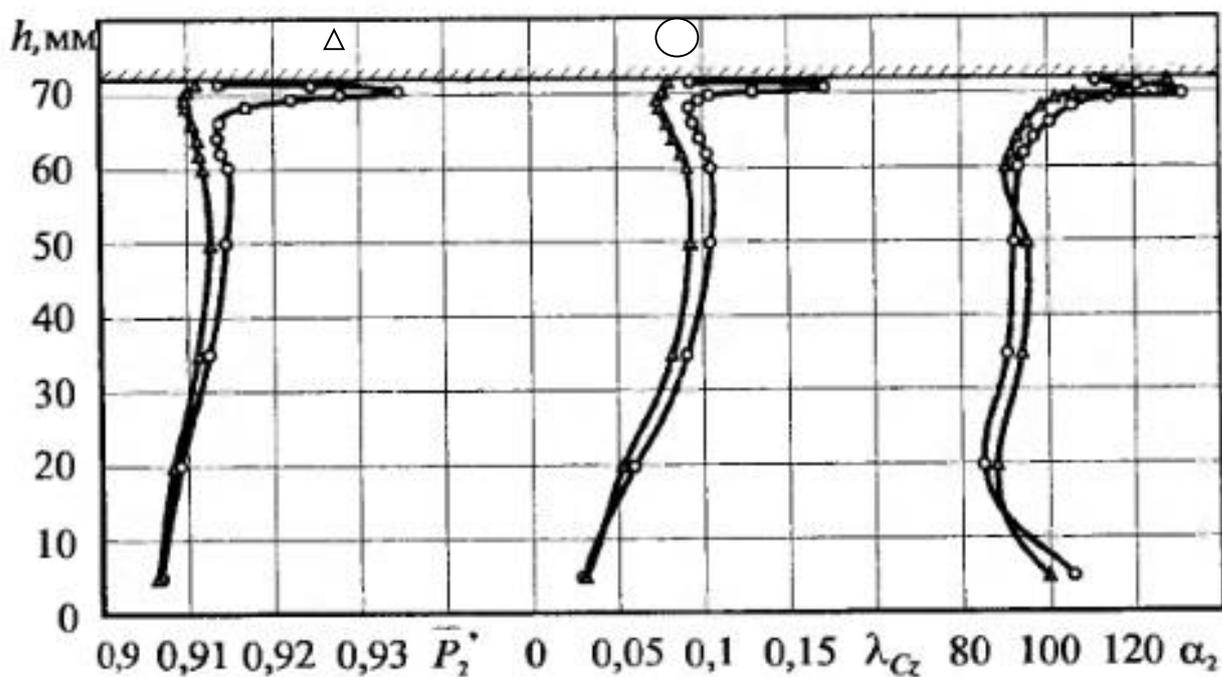


Рисунок 5 – Распределение основных параметров за рабочим колесом

В контрасте с этим, ступени, оснащенные сотовыми уплотнениями, не подвержены таким же внезапным изменениям в потоковых параметрах. Именно отсутствие таких флуктуаций, как мы полагаем, служит причиной повышения коэффициента полезного действия (КПД) у ступеней с сотовыми уплотнениями.

На рисунке 6 наглядно представлена корреляция между относительными изменениями КПД ступени (η), что выражается как отношение показателя внутреннего КПД при данной величине радиального

зазора к внутреннему КПД при его отсутствии ($\eta_{0i}/\eta_{0i}\delta=0$), и величиной относительного радиального зазора ($\delta^- = \delta/l$). Данная зависимость проиллюстрирована для оптимальных значений скоростного параметра u/C_0 и включает сравнение между разными видами уплотнения радиального зазора. Этот график позволяет оценить влияние конструкции уплотнения радиального зазора на эффективность ступени и подчеркивает преимущества отдельных типов уплотнений с точки зрения улучшения КПД.

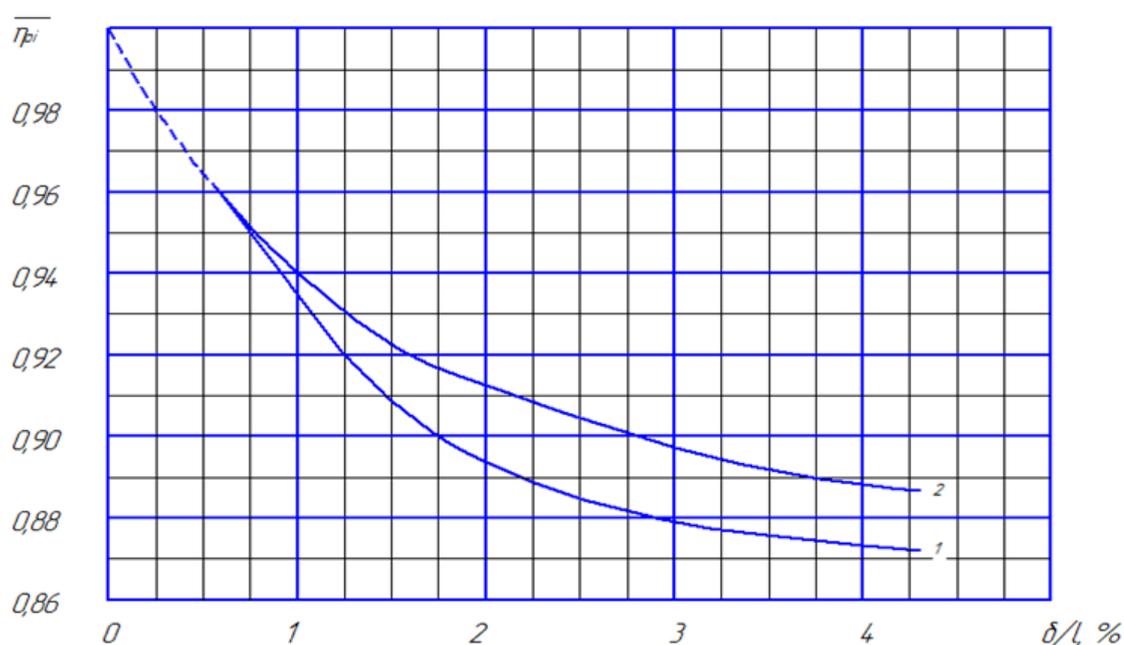


Рисунок 6 – Зависимость относительного КПД от величины радиального зазора при $u/C_0 = 0,65$: 1 – гладкое уплотнение, 2 – сотовое уплотнение ($d_{я} = 4$ мм)

Следует подчеркнуть, что наблюдается более стремительное ухудшение коэффициента полезного действия (КПД) при расширении радиального зазора для турбинных ступеней с применением гладкого уплотнения. Эта характеристика работы с гладкими уплотнениями требует особого внимания при анализе последствий увеличивающихся радиальных зазоров, которые могут формироваться в течение продолжительного использования двигателя.

2.2 Защитные устройства и защитная арматура

Одним из основных критериев надежности нагнетательного оборудования является его безотказная работа в течение установленного периода времени во всем диапазоне режимов работы (зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации представлена на рисунке 7).

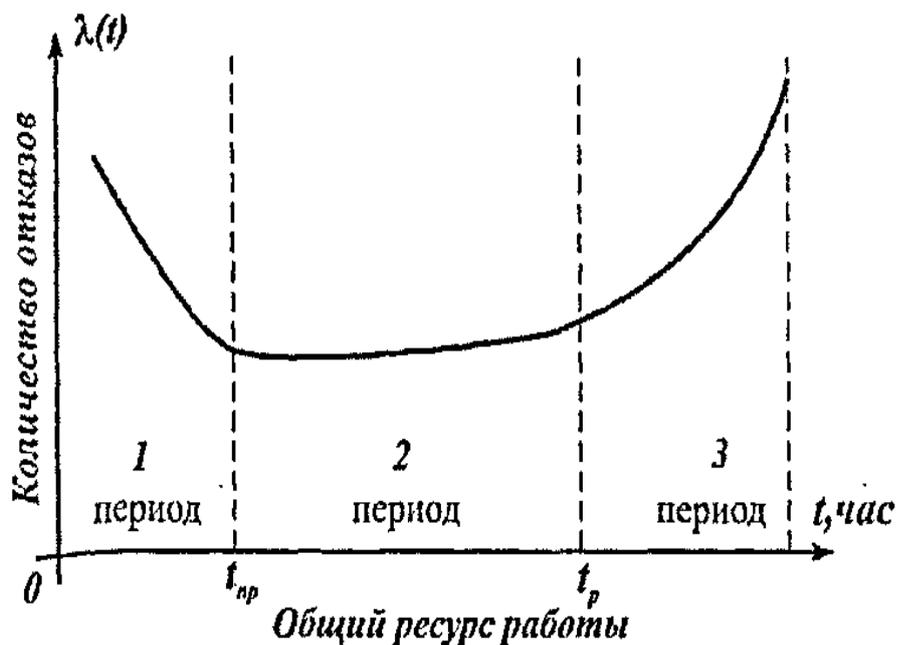


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации турбокомпрессора

Работоспособность деталей и узлов агрегата характеризуется их исправностью, т. е. состоянием, удовлетворяющим требованиям нормативно-технической документации. В процессе исследования работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА), особое внимание уделяется изучению механизмов возникновения отказов оборудования. Основным понятием при анализе функционирования ГПА является термин «отказ», который описывает любое отклонение от установленных технических условий [9].

Систематическая эксплуатация газоперекачивающих агрегатов влечёт за собой процессы ухудшения их состояния. Это проявляется в виде изменений свойств используемых материалов, ослаблении соединений

компонентов, усилении напряжений в структурных элементах из-за статических, динамических и термических нагрузок. В результате возникают феномены старения, износа, коррозии и трещинообразования. Эти явления приводят к постепенному ухудшению работоспособности отдельных элементов, что, несмотря на остающуюся функциональность агрегата в целом, классифицируется как постепенный отказ. Процесс постепенного отказа прямо связан с продолжительностью эксплуатации ГПА и отражается на характеристиках его работы [24].

Особую тревогу вызывают ситуации, приводящие к резкому снижению мощности и эффективности ГПА, а также к повышению расходов на восстановление функциональности оборудования. Такие состояния представляют собой неминуемый риск возникновения аварий, которые могут нарушить безопасность работы персонала и требуют незамедлительных мер.

В случае внезапных отказов, последствия могут быть ещё более разрушительными. Критические неисправности механических частей агрегатов при внезапных отказах приводят к полной потере их функциональности. Для локализации ущерба от таких разрушений и для обеспечения безопасности персонала компрессорных станций (КС) требуется срочная остановка ГПА и выполнение ряда аварийных процедур.

Обычно внезапные отказы могут быть предотвращены путем создания рациональной системы контроля работоспособности. Чаще всего внезапность появления отказов объясняется следующими причинами: недостаточной оснащённостью агрегатов средствами контроля, неисправностью имеющихся средств контроля, низким уровнем знаний, отсутствием опыта у эксплуатационного персонала, нарушением правил технической эксплуатации.

Факторы, влияющие на надёжность, наглядно представлены в блок-схеме на рисунке 8 [10].



Рисунок 8 – Факторы, влияющие на надёжность турбокомпрессора

Анализ работы газоперекачивающих агрегатов выявляет, что особо высокими нагрузками характеризуются несколько ключевых компонентов. К элементам, подверженным наибольшему напряжению, относятся осевой компрессор, турбина, камера сгорания, а также нагнетатель. Эти критические узлы испытывают интенсивное воздействие как статических и динамических, так и тепловых нагрузок в ходе эксплуатации.

Перечень возможных неисправностей на примере осевых компрессоров в процентном состоянии представлен в таблице 4 [9].

Таблица 4 – Перечень эксплуатационных неисправностей турбокомпрессоров

Наименование неисправности	Число неисправностей от общего количества, %
Вкладыши подшипников	32,3
Колодки подшипников	15,7
Торцевые уплотнения ЦБН	12,3
Направляющие и рабочие лопатки ТВД	9,4
Ротор ЦБН	8,3

Продолжение таблицы 4

Наименование неисправности	Число неисправностей от общего количества, %
Рабочие и направляющие лопатки ОК	7,1
Ротор ТНД	4,8
Элементы камеры сгорания	4,8
Рабочие и направляющие лопатки ТНД	2,2
Ротор турбокомпрессора	1,8
Рабочее колесо ЦБН	1,3

Как видно из таблицы 4, наибольшая доля отказов приходится на подшипники, соответственно, их разработке, модернизации и контролю при эксплуатации должно уделяться наибольшее внимание.

В исследовании неисправностей газоперекачивающих агрегатов замечено, что частота возникновения неполадок различается среди составляющих агрегата. Данные элементы и узлы можно систематизировать по уровню подверженности к возникновению неисправностей, начиная с наиболее уязвимых [10]:

- лопатки рабочего колеса, роторы и направляющие аппараты, испытывающие непосредственное воздействие рабочих процессов агрегата;
- подшипниковые узлы, важные для обеспечения правильного вращения валов и роторов;
- камеры сгорания и газоходы для горячих газов, где температурные и химические условия особенно интенсивны;
- теплообменники и выходные газоходы, связанные с отводом и использованием тепловой энергии;
- корпусные элементы и уплотнения, обеспечивающие герметичность и структурную целостность агрегата;
- вспомогательные устройства и системы, которые поддерживают основную функциональность агрегата;
- фундаментные конструкции и прочие составляющие, которые напрямую связаны с интеграцией ГПА в общую инфраструктуру.

Надежность, ресурсы деталей и узлов, располагаемая мощность и экономичность зависят также от условий эксплуатации, металла проточной части, количества, частоты и скорости пусков, вида и качества нагнетаемой среды (воздух, газ, газоздушная смесь и т.д.), окружающей среды, а также методов и организации эксплуатации и обслуживания.

Исследования надежности осевых компрессоров (ОК) показывают, что важную роль играет устойчивость их лопаточных аппаратов. Основные факторы, определяющие нагрузку на лопаточный аппарат, включают динамические усилия, генерируемые потоком циркулирующего воздуха, а также центробежные силы, возникающие из-за массы самих лопаток. Эти силы присутствуют постоянно и оказывают воздействие на лопатки при различных режимах функционирования ОК.

Наибольшему риску динамическим усилиям подвергаются первые ступени рабочих лопаток, поскольку они характеризуются относительно низким уровнем вибрационной устойчивости. Рабочие лопатки этих ступеней находятся в условиях, близких к резонансным, когда компрессор функционирует на частоте вращения в диапазоне от 2800 до 4200 оборотов в минуту. В таких условиях резко возрастает вероятность возникновения вибрационного резонанса, что делает режим опасным для работы ОК. Следовательно, превышение продолжительности эксплуатации ОК в этом диапазоне частот вращения за две минуты не рекомендуется, так как это может привести к преждевременным отказам и снижению общей надежности компрессора [9].

При нормально функционирующей системе регулирования, установленное заводом время прохождения опасных резонансных оборотов достаточно для вывода агрегата на режим холостого хода без накопления усталостных повреждений в лопатках осевого компрессора.

Превышение динамических напряжений над расчетными может быть обусловлено конструктивными особенностями организации подвода воздуха к осевому компрессору. Поворот потока на 90° перед направляющим

аппаратом первой ступени приводит к неравномерности потока перед рабочими лопатками и способствует появлению возмущающих сил.

Если подвод воздуха к осевому компрессору турбоагрегата выполнен осесимметрично, то снижается вероятность появления возмущений со стороны потока и увеличивается ресурс работы лопаточного аппарата, на надежность которого большое влияние оказывает устойчивость работы компрессора. Неустойчивая работа компрессора при постоянной частоте вращения может возникнуть в случае уменьшения расхода и увеличения степени повышения давления, а так же создается под влиянием следующих эксплуатационных факторов:

- при повышении сопротивления всасывающего тракта вследствие загрязнения фильтров, обледенения направляющих лопаток и закрытия жалюзи;
- при пусках агрегатов из горячего состояния;
- при недостаточном расходе топливного газа из-за пульсаций давления, закоксованности горелок и загрязнения фильтров;
- при неудовлетворительной работе системы регулирования и автоматики, несвоевременном зажигании камеры сгорания и т.д.
- при резком сбросе и возрастании нагрузки.

Возникновению неустойчивой работы компрессора способствует также неудовлетворительное состояние проточной части, а именно: увеличенные радиальные зазоры и загрязнение лопаточного аппарата. Сбой в стабильности функционирования осевого компрессора может инициировать явление, известное как помпаж. Это состояние характеризуется интенсивными колебаниями давления и расхода воздушного потока, циклическим характером и сопровождается уменьшением эффективности сжатия воздуха в компрессоре.

Основные симптомы помпажа включают повышение температуры в области перед турбиной, что является индикатором снижения эффективности компрессора, уменьшение частоты вращения лопастей компрессора,

усиление вибрации как самого ротора, так и всего механизма в целом. При помпаже вследствие пульсации потока воздуха происходят вибрация лопаток и накопление в них усталостных повреждений. Запас устойчивой работы осевого компрессора, т. е. его способность к беспомпажной работе, зависит от совместного действия эксплуатационных факторов. При всех прочих равных условиях вероятность помпажа вследствие обледенения возрастает при температуре атмосферного воздуха от 0 до -10°C . Накоплению усталостных повреждений в лопатках ОК способствуют задевания о статор, которые отмечаются главным образом при пусках агрегатов после проведения капитальных ремонтов. Вероятность усталостных разрушений значительно повышается при ухудшении состояния поверхности лопаток из-за содержания в потоке воздуха твердых частиц. Кроме того, изменение геометрии лопаток вследствие износа приводит к срыву потока с лопаток и уменьшению запаса устойчивости.

С увеличением эксплуатационного срока осевых компрессоров (ОК) фиксируются определенные проявления износа, включая формирование трещин в местах крепления рабочих лопаток, деформацию роторов компрессоров с их выпуклостью, а также высвобождение рабочих лопаток из своих пазов. Основной причиной этих негативных изменений является совокупное долгосрочное воздействие статических и динамических напряжений. Эти напряжения особенно выражены в тех местах, где есть концентрация нагрузок, так называемые концентраторы напряжений.

Частый источник местного возрастания напряжений – процедура замены лопаточного аппарата. По своей природе, часто эти местные повышения напряжений наблюдаются в области замковых лопаток. Во время установки рабочих лопаток в ступени компрессора необходимо строго соблюдать спецификации предварительного натяга. Любые отклонения от установленных производителем допусков могут вызвать усиление напряжений в роторе агрегата и изменить вибрационные характеристики

лопаток, смещая их частотные параметры в направлении резонансного режима, что в итоге может привести к преждевременной поломке.

2.3 Обеспечение защиты от производственных вибраций

Состояние опорных систем является решающим для обеспечения оперативности турбокомпрессоров и определяется, в частности, уровнем вибраций. При этом важно понимать, что показатели вибрации подшипников не всегда коррелируют с воздействующими на систему силами из-за значительной массы и жесткости корпуса по сравнению с ротором. Иными словами, колебания в состоянии ротора редко приводят к изменению вибрационной активности подшипников.

Конструкция опорных систем осевых компрессоров и турбин обладает определенной чувствительностью и менее стабильна по сравнению с другими элементами. В ее состав входят элементы, такие как подшипник, корпус, стойка и фундамент, которые образуют упругую связь.

Главный аспект динамики таких систем – это взаимодействие звеньев, движущихся с переменной скоростью, что приводит к возникновению сил инерции и моментов, вызывающих нагрузки динамической природы. Эти нагрузки могут проявляться в виде вибраций и шума. Для их минимизации при разработке механизмов вводится процесс балансировки, которая обеспечивается за счет выверенного подбора масс и распределения моментов инерции [5].

Неуравновешенность элементов, возникающая в процессе производства или в результате монтажа из-за неправильных габаритов, проблем сборки или неоднородности материала, корректируется путем балансировки. Этот процесс направлен на нивелирование любых малейших расхождений, чтобы обеспечить оптимальное вращение [11].

Ротором называют деталь, осуществляющую вращение в опорах. Вращающаяся масса m подвергается воздействию сил инерции, которые

можно разложить на две компоненты: нормальную P_i^n и тангенциальную P_i^τ (рисунок 9).

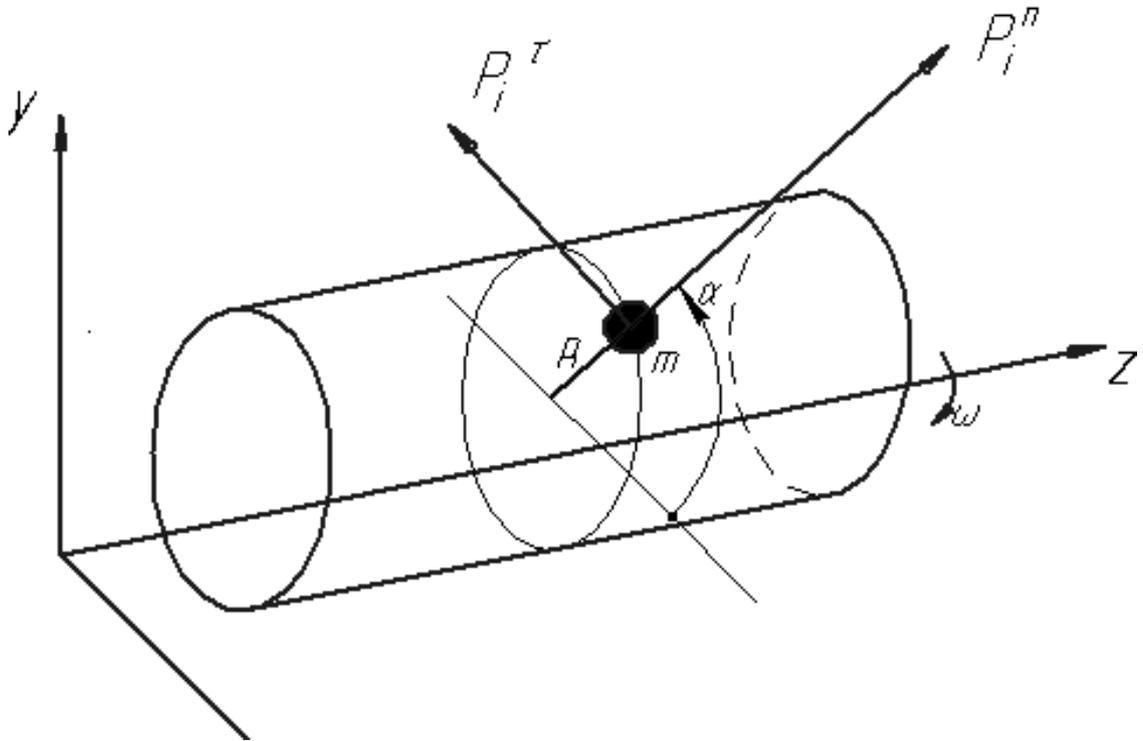


Рисунок 9 – Схема ротора

Величины этих сил можно вычислить по формулам

$$\left. \begin{aligned} P_i^n &= m_i \rho_i \omega^2 \\ P_i^\tau &= m_i \rho_u \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

«где ω – угловая скорость;

m – масса;

ρ_i, ρ_u – плотность;

ε – угловое ускорение.»

Спроектируем эти силы на оси x, y, z и определим моменты этих сил относительно осей

$$\left. \begin{aligned} P_{i_x} &= P_i^n \cdot \cos\alpha - P_i^\tau \cdot \sin\alpha \\ P_{i_y} &= P_i^n \cdot \sin\alpha + P_i^\tau \cdot \cos\alpha \\ P_{i_z} &= 0 \\ M_{i_x} &= P_{i_y} \cdot Z_i \\ M_{i_y} &= P_{i_x} \cdot Z_i \\ M_{i_z} &= P_i^\tau \cdot \rho_i = m_i \cdot \varepsilon \cdot \rho_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

«где P_i^n , P_i^τ – сила инерции нормальная и тангенциальная;

α – угол;

Z_i – расстояние;

M_{i_x} , M_{i_y} , M_{i_z} – моменты относительно осей».

«Подставив (6) в (7) и просуммировав, получим (учитывая, что $\rho_i \cos\alpha = x_i$, $\rho_i \sin\alpha = y_i$):» [11]

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \sum_{i=1}^n P_{i_x} = \omega^2 \sum m_i x_i - \sum \sum m_i y_i \\ P_y &= \sum_{i=1}^n P_{i_y} = \omega^2 \sum m_i y_i + \sum \sum m_i x_i \\ M_x &= \sum_{i=1}^n M_{i_x} = \omega^2 \sum m_i y_i z_i + \sum \sum m_i x_i z_i \\ M_y &= \sum_{i=1}^n M_{i_y} = \omega^2 \sum m_i x_i z_i - \sum \sum m_i y_i z_i \\ M_z &= \sum_{i=1}^n M_{i_z} = \sum \sum m_i \rho_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \omega^2 m x_S - \varepsilon m y_S \\ P_y &= \omega^2 m y_S + \varepsilon m x_S \\ M_x &= \omega^2 \mathfrak{J}_{yz} + \varepsilon \cdot \mathfrak{J}_{xz} \\ M_y &= \omega^2 \mathfrak{J}_{xz} - \varepsilon \cdot \mathfrak{J}_{yz} \\ M_z &= \varepsilon \cdot \mathfrak{J}_z \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

«где \mathfrak{J}_{yz} , \mathfrak{J}_{xz} , \mathfrak{J}_z – моменты инерции;

x_S , y_S – координаты».

«Последнее уравнение в (9) можно исключить, так как момент M_z не создает дополнительной реакции в опорах ротора.» [11]

«Силы P_x и P_y , моменты M_x и M_y равны нулю в том случае, если координаты x и y массы m расположены на оси вращения z (то есть центр масс ротора неподвижен)» [11]

$$\left. \begin{array}{l} x_s = 0 \\ y_s = 0 \end{array} \right\} \quad (10)$$

«Это есть условие статической уравновешенности ротора. Моменты M_x и M_y равны нулю, если центробежные моменты инерции ротора равны нулю» [11]

$$\left. \begin{array}{l} \mathfrak{J}_{yz} = 0 \\ \mathfrak{J}_{xz} = 0 \end{array} \right\} \quad (11)$$

Это есть условие динамической уравновешенности ротора.

На основе изложенной информации можно сформулировать следующие основные принципы балансировки роторов:

- ротор считается статически уравновешенным, когда центр масс совпадает с геометрической осью его вращения, что исключает возникновение односторонних радиальных сил при вращении;
- динамическое уравновешивание ротора достигается, когда его ось вращения совпадает с одной из главных осей инерции, что препятствует возникновению гироскопических моментов и парных сил.

«Уравновешенность ротора можно охарактеризовать и силовыми параметрами. Он статически уравновешен, если главный вектор сил индукции $\bar{P}_u = 0$. Ротор динамически уравновешен, если главный вектор моментов сил инерции $\bar{M}_u = 0$.» [11]

«При проектировании роторов используют условия (10) и (11). При проверке уравновешенности изготовленных роторов используют условия $\bar{P}_u = 0$ и $\bar{M}_u = 0$. Устранение остаточной неуравновешенности уже изготовленного ротора, возникшей по причинам неточности изготовления, монтажа, из-за неоднородности материала, из которого изготовлен ротор, осуществляется балансировкой.» [11]

«Положения отдельных неуравновешенных масс m_i , расположенных на роторе, можно охарактеризовать величинами радиус-векторов \bar{r}_i относительно оси его вращения. Система вращающихся масс будет уравновешена, если главный вектор сил инерции, действующих на эти массы при их совместном вращении, равен нулю» [11]

$$\bar{P}_u = \sum \bar{P}_i + \bar{P}_{ур.} = 0, \quad (12)$$

«где \bar{P}_i - сила инерции, действующая на i -тую массу;

$\bar{P}_{ур.}$ - сила инерции уравновешивающей массы $m_{ур.}$, расположенной на расстоянии $r_{ур.}$ от оси вращения ротора.» [11]

«Сила инерции, действующая на i -тую массу, вращающуюся с постоянной скоростью ω , равна $P_i = m_i r_i \omega^2$.» [11]

«Рассмотрим систему, состоящую из трех неуравновешенных вращающихся масс m_1 , m_2 и m_3 (рисунок 10).» [11]

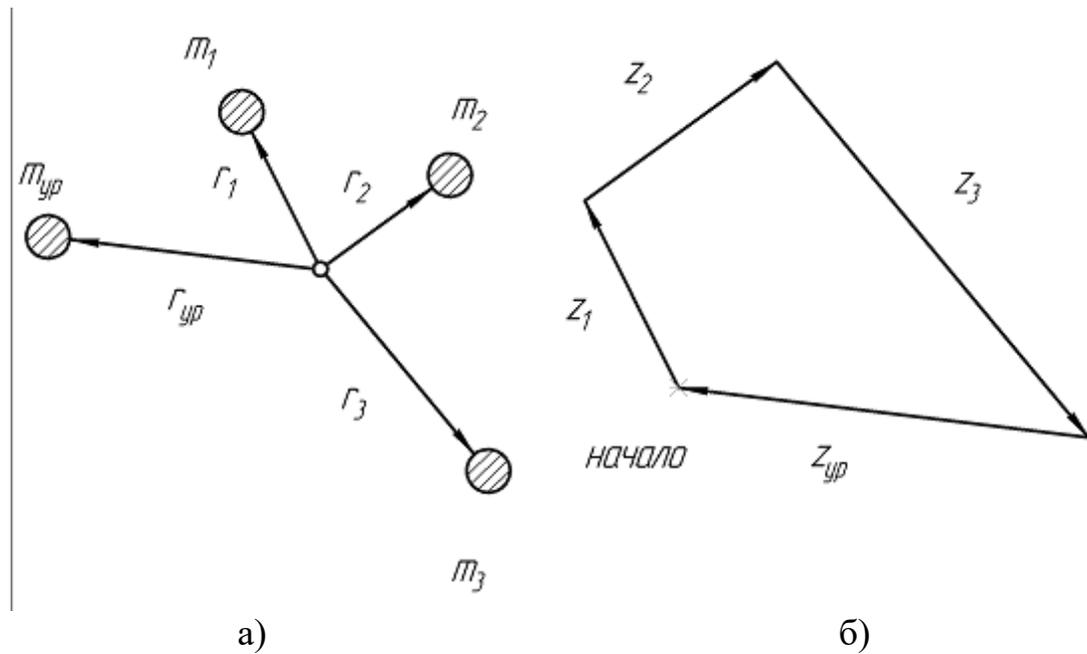


Рисунок 10 – Система неуравновешенных масс (а) и план сил инерции (б)

«Условием уравновешенности данной системы масс является следующее уравнение» [11]

$$\bar{P}_u = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 + \bar{P}_{yp} = 0. \quad (13)$$

«где $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$ - сила инерции, действующая на 1, 2, 3, массу» [11].

Так как $P_i = m_i r_i \omega^2$, то это уравнение можно записать в следующем виде

$$m_1 \bar{r}_1 \omega^2 + m_2 \bar{r}_2 \omega^2 + m_3 \bar{r}_3 \omega^2 + m_{yp} \bar{r}_{yp} \omega^2 = 0 \quad (14)$$

«где $\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{r}_3, \bar{r}_{yp}$ - радиусы».

«Так как $\omega^2 \neq 0$ (мы рассматриваем *вращающуюся* систему масс), то» [11]

$$\overline{m_1 r_1} + \overline{m_2 r_2} + \overline{m_3 r_3} + \overline{m_{yp} r_{yp}} = 0 \quad (15)$$

«Для решения уравнения (15) существуют различные подходы, в том числе аналитический и графический методы. В рамках аналитического метода в процессе решения уравнения проводится составление системы проекций действующих сил на координатные оси. Для получения искомого результата необходимо определить последнее неизвестное слагаемое в этой системе.» [11]

Для решения уравнения графическим методом применяется построение векторного многоугольника, который служит наглядной графической интерпретацией векторного уравнения (15). Этот многоугольник формируется из суммы векторов, представленных в уравнении, и каждый вектор откладывается согласно выбранному масштабу сил, что позволяет визуально отобразить баланс сил и определить неизвестные величины в уравнении. Это визуальное представление даёт возможность решить уравнение, не прибегая к сложным алгебраическим вычислениям.

$$\mu_{mr} = \frac{m_1 r_1}{z_1} \quad (16)$$

«где z_1 – длина вектора, изображающего силу $P_1 = m_1 r_1 \omega^2$, берется в мм.

Размерность масштаба $\frac{кг \cdot м}{мм}$ (если масса задана в кг, радиус – в м)» [11].

«Переведем масштабом μ_{mr} другие известные слагаемые уравнения (15) в векторные отрезки» [11]

$$z_2 = \frac{m_2 r_2}{\mu_{mr}}, \quad z_3 = \frac{m_3 r_3}{\mu_{mr}}, \quad мм. \quad (17)$$

«Тогда векторное уравнение запишется в следующем виде» [11]

$$\vec{z}_1 + \vec{z}_2 + \vec{z}_3 + \vec{z}_{yp} = 0 \quad (18)$$

«Построив векторный силовой многоугольник в масштабе μ_{mr} , из него определим длину вектора $z_{од}$. Выбрав из конструктивных соображений величину r_{yp} , вычисляем уравновешивающую массу» [11]

$$m_{yp} = \frac{z_{yp} \cdot \mu_{mr}}{r_{yp}}. \quad (19)$$

Поместив ее на роторе в направлении вектора r_{yp} на расстоянии от оси вращения, равном длине этого вектора, уравновесим ротор.

Последовательность уравновешивания масс, расположенных произвольно, рассмотрим на примере ротора с системой четырех неуравновешенных масс (рисунок 11).

«Пусть известны величины неуравновешенных масс m_i и их положения относительно оси вращения ротора, обусловленные радиусами – векторами r_i и расстояниями λ_i относительно одной из произвольно выбранных плоскостей I, перпендикулярной оси вращения рассматриваемого ротора.

При вращении ротора и неуравновешенных масс с постоянной угловой скоростью на каждую из масс действует сила инерции, равная» [11]

$$P_i^n = m_i \rho_i \omega^2. \quad (20)$$

Постоянная угловая скорость означает отсутствие углового ускорения ($\varepsilon = 0$), что приводит к нулевой тангенциальной компоненте силы инерции.

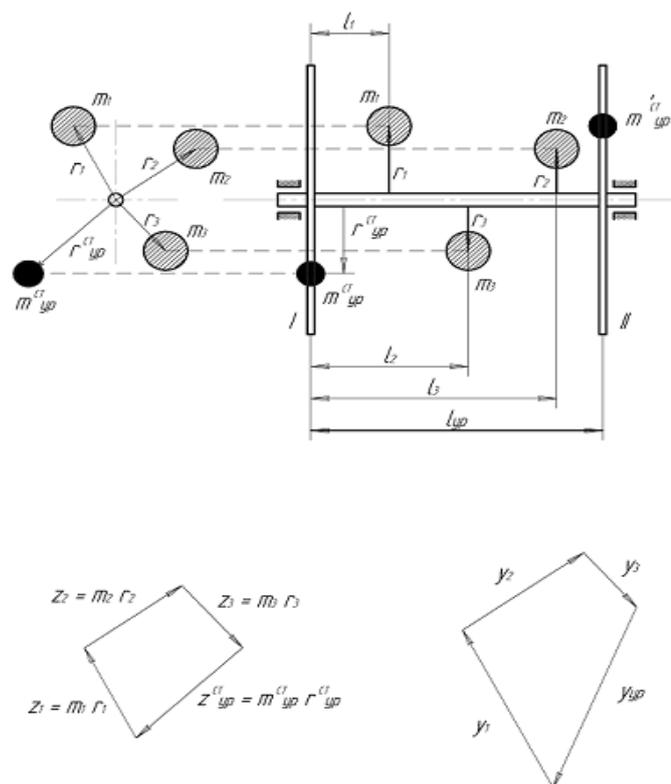


Рисунок 11 – Уравновешивание масс, расположенных произвольно

Определяем приведенные плоскости I и II, которые показаны на рисунке 11, которые служат точками, где будут расположены массы для динамического балансирования. Основной задачей является достижение динамического равновесия масс.

Процесс начинается со статического балансирования в плоскости I.

$$\bar{P}_u = 0; m_1 \bar{r}_1 + m_2 \bar{r}_2 + m_3 \bar{r}_3 + m_{yp} \bar{r}_{yp} = 0 \quad (21)$$

$$\bar{z}_1 + \bar{z}_2 + \bar{z}_3 + \bar{z}_{yp} = 0 \quad (22)$$

Построив векторный многоугольник, графически найдем $m_{yp} \bar{r}_{yp} = \mu_{mr} \bar{z}_{yp}$.

Уравновесим действие инерционных моментов, т.е. выполним условие $\bar{M}_u = 0$. Для этого запишем уравнение

$$\overline{M}_u = 0; m_1 \bar{r}_1 l_1 \omega^2 + m_2 \bar{r}_2 l_2 \omega^2 + m_3 \bar{r}_3 l_3 \omega^2 + m_{yp} \bar{r}_{yp} l \omega^2 = 0 \quad (23)$$

где l_1, l_2, l_3, l – расстояние.

т.к. $\omega^2 \neq 0$, то из уравнения следует, что

$$m_1 \bar{r}_1 l_1 + m_2 \bar{r}_2 l_2 + m_3 \bar{r}_3 l_3 + m_{yp} \bar{r}_{yp} l = 0 \quad (24)$$

Уравнение запишем в виде

$$\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_{yp} = 0 \quad (25)$$

При этом принимаем, что векторы моментов \overline{M}_u повернуты на 90° и совпадают с направлением \bar{r} .

$$y_{yp} \cdot \mu_{mrl} = m_{yp} \cdot r_{yp} \cdot l_{yp} \quad (26)$$

«Находим из (26) величину m_{yp} , задавшись r_{yp} , или наоборот. Здесь l_{yp} равна расстоянию между плоскостями приведения I и II.» [11]

Проводя от оси вращения ротора линию, параллельную \bar{y}_{yp} , откладываем на ней с противоположных сторон r_{yp} и на концах этих векторов устанавливаем две уравновешивающие массы m_{yp} . Причем одна из них будет расположена в плоскости I, другая в плоскости II. Массы m_{yp} и m_{yp} в плоскости I можно объединить в одну массу.

«Проектирование механизмов часто требует учитывать такой процесс, как балансировка роторов. В процессе эксплуатации изготовленные роторы могут содержать неоднородности материала, а также иметь изготовительные

и сборочные неточности, вследствие чего возникает их неуравновешенность. Балансировка необходима для коррекции таких отклонений.» [11]

Балансировка подразделяется на следующие типы:

Статическая балансировка выполняется для роторов с относительно небольшой толщиной, таких как диски, колёса, маховики или шкивы. Для достижения баланса ротор размещают на опорах с низким трением, например, на призмах, и регулируют его положение путём добавления или убираания массы до достижения состояния индифферентного равновесия.

Динамическая балансировка требуется для роторов с более значительной длиной, включая широкие колёса и валы. Этот процесс осуществляется на специализированных станках.

Если сбалансировать отдельные элементы или весь механизм не удаётся, вступают в действие методы виброзащиты, снижающие воздействие переменных динамических нагрузок во время работы механизма. Основные методы виброзащиты включают:

- использование демпферов – устройств, целью которых является усиление сопротивления механизма колебательным процессам, зависящим от амплитуды и скорости колебаний. Несмотря на потенциальную эффективность, данный метод не всегда даёт ожидаемый результат;
- применение виброзащитных систем, которые работают за счёт гашения динамических воздействий с помощью создания противодействующих динамических нагрузок.

«Два основных подхода в области виброзащиты – это виброгашение и виброизоляция. Виброгашение заключается в присоединении дополнительных колебательных систем к механизму, называемых динамическими виброгасителями, как показано на рисунке 12. Такие системы состоят из массы, подлежащей защите (m_1), и вспомогательной колеблющейся массы (m_2), соединённых упругими элементами: внешней

пружиной с жёсткостью C_2 и пружиной, связывающей виброзащищаемый объект с рамой или фундаментом, с жёсткостью C_1 .» [11]

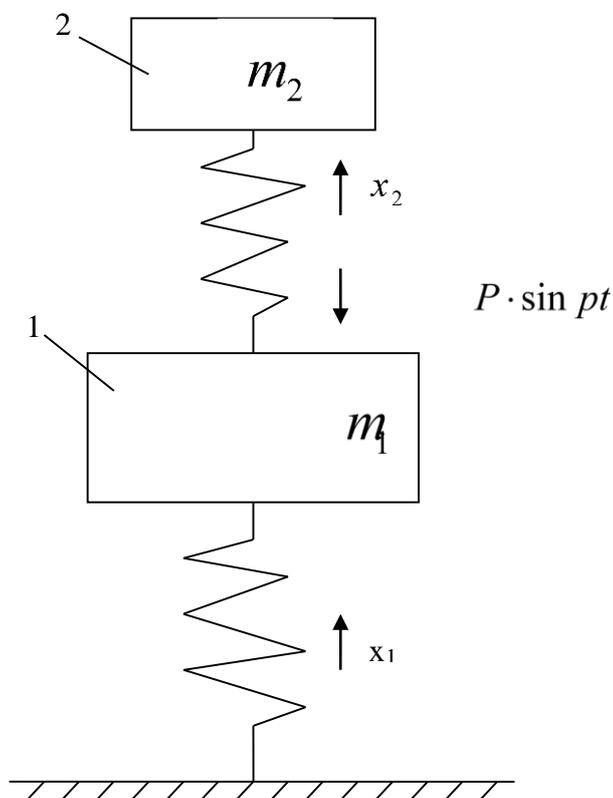


Рисунок 12 – Принципиальная схема динамического виброгасителя

Как правило $m_2 < m_1$. Соотношения m_1 и m_2 , C_1 и C_2 подбираются такими, чтобы собственная частота колебаний виброгасителя была равна частоте вынуждающей внешней силы $P \cdot \sin pt$, где p – частота. При этом виброгаситель должен быть настроен на частоту вынуждающей внешней силы.

Закон гармонических колебаний имеет вид $x = A \cdot \sin(\omega t + \varphi)$. При этом период колебания $T = \frac{2\pi}{\omega}$, частота колебаний $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$, где начальная фаза φ , круговая частота ω .

«На тело массой m , колеблющееся по гармоническому закону, пусть действуют две силы:» [11]

— восстанавливающая со стороны пружины

$$P_n = cx = c \cdot A \sin(\omega t + \varphi), \quad (27)$$

где x – уравнение гармонических колебаний;

A – амплитуда;

c – коэффициент жесткости пружины;

ω – частота;

φ – начальная фаза.

— возмущающая сила (сила инерции, например)

$$P_B = m \frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{d^2}{dt^2} (A \sin(\omega t + \varphi)) \quad (28)$$

$$\text{или } P_B = -mA \omega^2 \sin(\omega t + \varphi).$$

Так как система находится в равновесии, то $P_n = P_B$, или

$$-mA \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = c \cdot A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (29)$$

Здесь круговая (угловая) частота свободных гармонических колебаний системы

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{m}} = \omega_0. \quad (30)$$

При действии на массу внешней возникающей силы, описываемой законом $P \cdot \sin pt$, уравнение (2.20) будет иметь вид

$$-mA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) + cA \sin(\omega t + \varphi) - P \cdot \sin pt = 0. \quad (31)$$

Уравнение движения двухмассовой системы (при возмущающей силе, действующей на массу m_1 , и равной $P \cdot \sin pt$) имеет вид

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = P \cdot \sin pt - c_1 x_1 + c_2 (x_2 - x_1), \quad (32)$$

где x_1 и x_2 – координаты, отсчитываемые от положения статического равновесия;

c_1 и c_2 – коэффициенты жесткости пружины.

Для виброгашения массы m_1 используют явление *антирезонанса*, заставляя колебаться m_2 в противофазе к защищаемой массе. Для этого определяют величины c_2 и m_2 из условия $p = \sqrt{\frac{c_2}{m_2}}$.

Основная проблема использования динамического виброгасителя заключается в его эффективности только при условии стабильности частоты колебаний защищаемого объекта. Любое изменение частоты может привести к значительному увеличению уровня вибраций, что потребует перенастройки прибора для восстановления его балансировочной функции.

Тем не менее, чувствительность виброгасителя к колебаниям частоты объекта можно снизить, включив в состав виброизоляционной системы элементы с высокой степенью демпфирования. Добавление демпферов, или амортизаторов, обеспечивает дополнительное трение, что смягчает эффект изменений частоты и повышает общую надёжность виброзащиты.

Конструкция типичного виброизолятора включает в себя упругое устройство, чаще всего в виде пружины, и амортизатор, который может быть выполнен в виде вязкоупругого элемента.

Эти компоненты вместе формируют систему, которая не только изолирует объект от внешних вибраций, но и снижает амплитуду собственных колебаний объекта – это показано на рисунке 13.

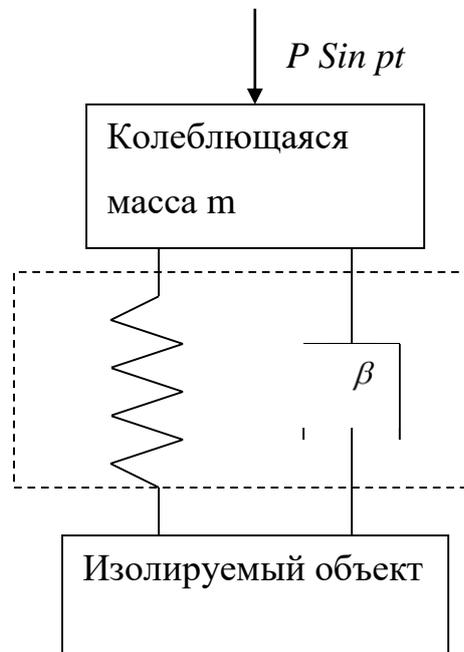


Рисунок 13 – Принципиальная схема виброизолятора

Виброизолятор имеет коэффициент демпфирования $\beta = \frac{1}{1 - \frac{p^2}{\omega_0^2}}$.

Уравнение движения колеблющейся системы имеет вид

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = P \sin pt + Q, \quad (33)$$

где Q – обобщенная реакция амортизатора.

Из решения уравнения движения (33), можно определить параметр Q , который является ключевым в выборе подходящего амортизатора с соответствующими расчетными характеристиками.

Для обеспечения стабильного динамического состояния опорных систем важно контролировать их резонансное состояние. Главными факторами, от которых это состояние зависит, являются целостность и изготовление корпусов механизмов, а также точность сборки опорных подшипников. Коробление корпуса влияет на распределение нагрузок по опорам и изменяет жесткость конструкции.

Основные причины коробления корпусов часто связаны с влиянием внешних нагрузок от сопряженных патрубков.

Такие нагрузки могут оказывать преимущественное давление, если они не были учтены и скомпенсированы на этапе предварительной установки и натяжения конструкций.

Из-за локальных температурных аномалий, возникающих в корпусе турбины вследствие дефектов теплоизоляции или асимметричного охлаждения [26].

Вывод по второму разделу.

В разделе рассмотрели герметизацию технологического оборудования на примере турбокомпрессора. Статистика анализа турбокомпрессоров, занимающихся ремонтными работами, показывает, что приблизительно 80% отказов приходится на износ подшипников скольжения, валов и уплотнений. Примечательно, что около 5% неполадок обусловлены проникновением посторонних предметов в лопатки компрессора и турбины. Ещё около 5% отказов можно обосновать нарушениями в работе системы смазки и другими причинами, о которых не упоминается в отчётах.

Исследование влияния сотового уплотнения на турбинную ступень с периферийным расположением данного элемента позволило получить важные данные, которые могут быть сформулированы в виде следующих положений:

Эффективность (КПД) турбинной ступени при применении сотовых уплотнений с соотношением $h_{\text{я}}$ (высота ячейки) к $d_{\text{я}}$ (диаметр ячейки) приблизительно равным 1 варьируется в более высоких пределах по сравнению со ступенями, оснащенными уплотнением «гладкая стенка».

Это обстоятельство наблюдалось на всем протяжении исследуемого ряда радиальных зазоров.

Анализ потоковых характеристик в области за рабочим колесом турбин показывает уменьшение уровня потерь, связанных с утечками рабочей среды через периферийные радиальные зазоры, что является результатом использования сотовых уплотнений.

Разработка и оптимизация конструкторских параметров сетчатой структуры уплотнений открывают перспективы для усиления влияния на потоки утечек и для достижения существенного понижения их величин через радиальные зазоры.

Технологическое применение сотовых уплотнений делает возможным уменьшать размеры радиального зазора по сравнению с обычными значениями, и в то же время уменьшать риск повреждения рабочих лопаток в случае их контакта с сотовой структурой в процессе функционирования компрессора.

3 Диагностика – основа безопасной эксплуатации оборудования

3.1 Виды контроля (визуально-оптический, радиационный методы неразрушающего контроля контроль, акустические методы неразрушающего контроля). Их достоинства и недостатки

Виды контроля можно рассматривать как условные группы методов неразрушающего контроля, которые объединены общими физическими принципами. Разные методы классифицируются по конкретным признакам:

- характеру взаимодействия физических полей с объектом;
- ключевым информативным характеристикам;
- способам получения исходной информации.

Выбор конкретного метода или их комбинации для обнаружения дефектов сварных швов при проверке конструкций, которые проходят изготовление, ремонт или реконструкцию, основывается на требованиях, указанных в технической документации для данных конструкций. Все этапы контроля сварных швов, независимо от используемого метода, должны документироваться в нормативных и технических материалах, относящихся к процессу контроля.

«Визуально-оптический контроль

Визуально-оптический контроль основывается на принципах геометрической оптики, таких как распространение, преломление и отражение света в оптических системах, что делает его доступным для изучения. Визуально-оптический контроль (ВОК) чаще всего используется для:

- выявления трещин, повреждений конструктивных элементов, загрязнений, утечек и посторонних предметов в закрытых конструкциях;

- глубокого анализа поверхностных дефектов, обнаруженных на исследуемых объектах с применением методов неразрушающего контроля;
- фрактографического анализа мест разрушений.» [2]

Этот метод контроля характеризуется сравнительно высокой трудоемкостью на этапе осуществления проверок.

Визуально-оптический контроль близкорасположенных объектов. В полной реализации данного контроля используются увеличительные стекла и микроскопы. Эти устройства помогают выявлять различные трещины, вмятины, разрывы на взаимодействующих поверхностях, а также повреждения, вызванные эрозией и коррозией, потемнение материала и другие дефекты. Более того, они позволяют обнаружить недостатки в покрытиях, как лакокрасочных, так и гальванических. Чтобы получить увеличенное изображение, лупу необходимо разместить близко к исследуемой поверхности (рисунок 14). При этом расстояние между объектом и лупой должно быть немного меньше фокусного расстояния этого инструмента [2, с. 68].

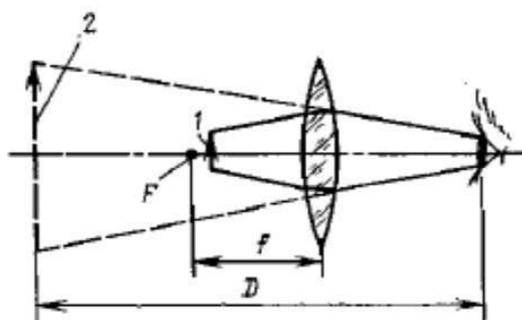


Рисунок 14 – Схема осмотра с лупой

Уровень увеличения, достигаемый с помощью лупы, можно приблизительно рассчитать при помощи формулы:

$$\Gamma_L = \frac{l}{f} = \frac{250}{f} \quad (34)$$

где l – расстояние наилучшего зрения;

f – расстояние от линзы до фокуса.

При увеличении лупы её разрешающая способность улучшается, что позволяет более четко различать близкие точки и формы. Для детального рассмотрения мелких деталей обычно используют лупы с увеличением от 2 до 10, поскольку более высокие увеличения значительно сужают поле зрения и уменьшают глубину резкости, что может повлиять на восприятие. Для выявления более крупных недостатков и общего осмотра применяют обзорные лупы, которые дают более широкий угол обзора, но имеют низкое увеличение. Оптическая схема микроскопа, представленная на рисунке 15, демонстрирует совпадение оптических осей объектива и окуляра.

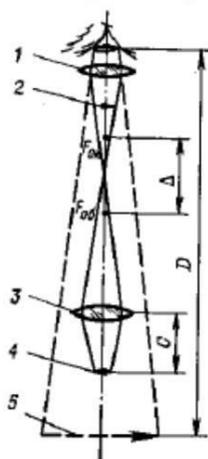


Рисунок 15 – Схема монокулярного микроскопа

Изменение в увеличении микроскопа определяется с помощью формулы:

$$\Gamma_M = \Gamma_{об} \cdot \Gamma_{ок} \quad (35)$$

«где $\Gamma_{об}$ – увеличение в объективе ($\Gamma_{об} = \text{треугольник} / f_{об}$);

Треугольник – периметр от задней до передней фокусировки окуляра, мм;

$f_{ок}$ – расстояние;

$\Gamma_{ок}$ – увеличение в окуляре ($\Gamma_{ок} = 1/ f_{ок}$).» [2]

В проведении контроля применяется микроскоп в увеличенном состоянии от 8 до 40-50.

Увеличение, которое способны предоставить микроскопы при исследовании мелких объектов, значительно превосходит возможности луп.

Визуально-оптический контроль удаленных объектов

Телескопы, состоящие из объектива и окуляра для наблюдения далеких объектов, имеют схожую телескопическую конструкцию с оптическими системами микроскопов (рисунок 16). Главное отличие заключается в том, что задний фокус объектива в телескопе совпадает с передним фокусом окуляра, в то время как передний фокус объектива и задний фокус окуляра находятся на бесконечности.



Рисунок 16 – Схема оптической системы эндоскопа

Объектив выполняет функцию формирования реального изображения исследуемого объекта. Формула для вычисления увеличения в простой телескопической системе выглядит следующим образом: Для получения непосредственного изображения объекта в телескопах применяются системы преобразования. Если такая система обеспечивает линейное увеличение ω , общее увеличение устройства можно определить с помощью следующей формулы:

$$\Gamma_{т.с} = \omega \frac{f_{об}}{f_{ок}} \quad (36)$$

Увеличение телескопической лупы создается благодаря сочетанию бинокля или одной оптической трубы с дополнительной насадкой, и его можно вычислить по формуле:

$$\Gamma_{\omega,д} = \frac{250}{f_H} \Gamma_{т.с}^3 \quad (37)$$

«где f_H – это фокусное расстояние насадки;

$\Gamma_{т.с}$ – увеличение системы бинокля.» [35]

Бинокли делятся на два основных типа: призмённые и галилеевские. В галилеевских биноклях окуляр представлен рассеивающей линзой, которая также создает прямое изображение. Бинокли и телескопические лупы применяются для уточненного осмотра объектов, которые доступны для визуального контроля, но находятся на расстоянии более 0,6–0,8 метра от глаз человека, выполняющего проверку [35, с. 34].

Визуально-оптический контроль скрытых объектов.

Объекты, которые не могут быть просмотрены напрямую, исследуются с помощью специализированных приборов, называемых эндоскопами. Эти устройства работают на основе оптической системы, которая позволяет передавать изображение на значительные расстояния (до нескольких метров). Во время работы эндоскопа световые лучи меняют свое направление по сравнению с исходным положением.

«Следует отметить, что плоские зеркала и призмы не влияют на увеличение в телескопических системах. Эндоскопы делятся на:

- линзовые;
- волоконно-оптические;
- комбинированные.» [35]

«Линзовый эндоскоп представляет собой жесткую конструкцию или может обладать «коленом» с одной или двумя степенями свободы. В его конструкцию входят источник света (для освещения исследуемого объекта), сменные призмные или зеркальные насадки (для коррекции направления и размера поля зрения), объектив, главная оптическая система и окуляр. Схема работы линзового эндоскопа изображена на рисунке 17.» [35]

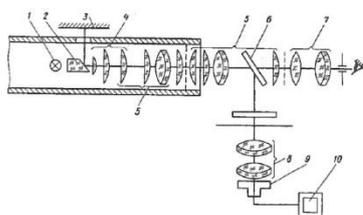


Рисунок 17 – Схема действия линзового эндоскопа

Сменная оптическая система необходима для увеличения рабочей длины инструмента или для его интеграции с видеонаблюдением. Линзовые эндоскопы имеют цилиндрический корпус, внутри которого располагаются основные элементы устройства. Улучшение изображения достигается за счет уменьшения диаметра волокон и увеличения их количества, что уменьшает эффект «мозаичности». На рисунке 18 показана схема функционирования волоконно-оптического гибкого эндоскопа.

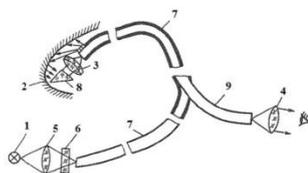


Рисунок 18 – Схема функционирования волоконно-оптического гибкого эндоскопа

Угол обзора определяется как угол между осью телесного угла и осью эндоскопа (на рисунке 19 стрелка указывает на ось телесного угла, а цифрами обозначен угол направления наблюдения).

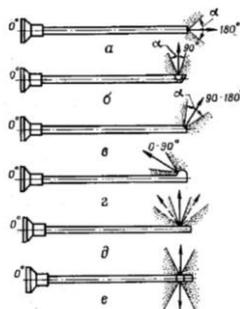


Рисунок 19 – Типы эндоскопов

«Эндоскопы могут быть прямыми, предназначенными для переднего, заднего и бокового наблюдения, а также иметь круговой и регулируемый угол обзора. Угол направления для эндоскопа прямого типа соответствует направлению взгляда и составляет 180° . Для бокового эндоскопа угол равен 90° , для переднего - варьируется от 90 до 180° , а для заднего - находится в диапазоне от 0 до 90° . Эндоскопы с круговым обзором могут осматривать области вокруг продольной оси на 360° , при фиксированном положении устройства» [10, с. 351].

В источнике света на рисунке 20 гибкий эндоскоп имеет галогенную лампу с мощностью вот 100 до 300 Вт.

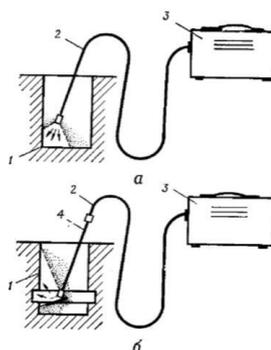


Рисунок 20 – Гибкие осветительные жгуты волокон

Источник света размещён вне эндоскопа, что значительно снижает вероятность его перегрева. На рисунке 21 показаны схемы визуальных и осветительных систем гибкого эндоскопа.

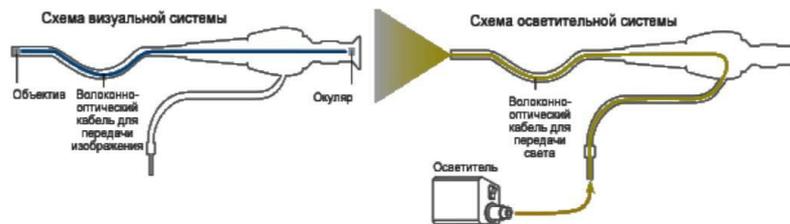


Рисунок 21 – Схема визуальной и осветительной системы гибкого эндоскопа

«Строение эндоскопа включает блок освещения с светодиодом длиной от 1,5 до 2,5 м и окуляр. Также имеется механизм для дистанционной фокусировки объектива и система изгиба передней части эндоскопа, длина которой обычно не превышает 100 мм, с возможностью изгиба под углом до $+100^\circ$ (радиус изгиба составляет 25 мм при диаметре эндоскопа в диапазоне 5-10 мм). На рисунке 22 представлена волоконно-оптическая гибкость эндоскопа» [10, с. 352].



Рисунок 22 – Волокно-оптическая гибкость эндоскопа

«Эндоскопы применяются для проверки баллонов систем гидрогазового обеспечения легких авиационных и аэродинамических устройств, лопаток компрессорных и турбинных роторов, внутренних пространств гидравлических цилиндров, а также различных секций крыльев и прочих компонентов.» [10]

Визуально-оптический контроль
Достоинства:

Оптико-визуальная методика базируется на различиях в том, как свет отражается от различных участков исследуемой поверхности. Повреждения на поверхности можно обнаружить не только визуально, но и с помощью оптических инструментов. Основные достоинства этого метода заключаются в легкости контроля и использовании относительно простых средств, что способствует снижению трудозатрат.

Недостатки:

К недостаткам данного подхода относят такие моменты, как острота зрения инспектора, возможная утомляемость, а также недостаточная квалификация специалиста, выполняющего проверку. Однако, несмотря на указанные ограничения, невысокие трудозатраты и высокая информативность делают данный метод важным этапом, после которого проводятся более тщательные проверки. Первоначальный этап контроля всегда включает внешний осмотр изделия, при этом используются специальные инструменты.

«Радиационный контроль

Радиационный контроль (РК) базируется на взаимодействии исследуемого объекта с проникающим ионизирующим излучением (ИИ). Методы радиационного контроля (МНК) классифицируются по типам используемого ионизирующего излучения и включают в себя:

- рентгеновский контроль;
- контроль с γ -излучением;
- контроль тормозным излучением от электронных ускорителей;
- контроль немонноэнергетическим β -излучением;
- контроль моноэнергетическим β -излучением;
- контроль протонными потоками;
- контроль тепловыми нейтронами;
- контроль позитронными потоками.» [35]

Для анализа сварных и паяных соединений оптимально подходят методы 1-7, тогда как для проверки слитков и отливок, а также для

обнаружения трещин и пор, применимы методы 1-3. Рентгеновский метод является основным вариантом радиационного контроля и предоставляет результаты в виде графических изображений на пленке. «Его эффективность зависит от толщины исследуемого материала. Рентгеновский контроль является эффективным инструментом для оценки состояния неразъемных соединений, которые расположены под смежными компонентами. Тем не менее, его результативность снижается при анализе многослойных конструкций, состоящих из различных материалов с изменяющейся по глубине плотностью» [35, с. 172].

Излучение делится на фотонное (ионизирующее электромагнитное) и корпускулярное (поток заряженных частиц или нейтронов). Рентгеновские лучи и γ -излучение представляют собой высокочастотные электромагнитные волны, обладающие высокой энергией, что позволяет им проходить через разные толщины материалов. Существенным свойством рентгеновских лучей является их воздействие на эмульсию рентгеновской пленки, что приводит к изменению ее цвета после обработки.

«Для рентгеновского контроля обрабатываемых объектов применяются радиоактивные изотопы (источники гамма-излучения) или рентгеновские трубки. В рентгеновском аппарате трубка генерирует тормозное и характеристическое излучение с широким диапазоном энергии, достигающим 1000 кэВ, что позволяет просвечивать металлические элементы.» [35]

«Ионизирующее излучение оказывает биологическое воздействие, ионизируя элементы, из которых состоят клетки живых организмов (это связано с поглощённой дозой излучения). При получении серьёзной дозы облучения у человека может развиваться лучевая болезнь. Существуют различные методы защиты от ионизирующего излучения, которые позволяют безопасно работать с такими источниками.» [35]

«Энергетический спектр характеристического излучения имеет дискретный характер и включает линии, которые называются K, L и другими,

что связано с переходами электронов с внешних оболочек на уровни К, L и подобные (рисунок 23). Каждому химическому элементу свойственно уникальное характеристическое излучение, энергия которого возрастает с увеличением атомного номера Z .» [35]

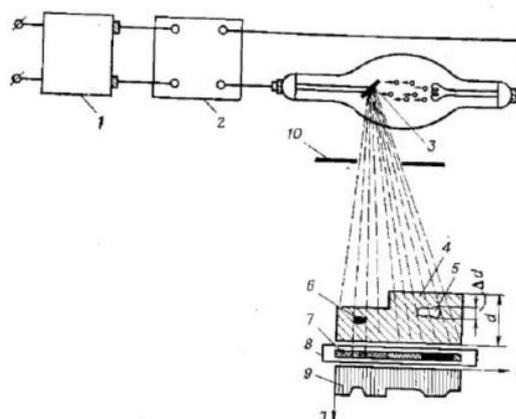


Рисунок 23 – Схема просвечивания детали рентгеновским излучением

«Тормозное излучение возникает, когда электрон проходит сквозь электрическое поле атома или его ядра, в результате чего он теряет энергию. Эти потери энергии называются радиационными потерями, вызванными формированием тормозного излучения. Некоторые искусственные радиоактивные изотопы демонстрируют феномен позитронного распада, когда один протон превращается в нейтрон с эмиссией позитрона и нейтрино. Позитрон взаимодействует с электроном в окружающей среде, приводя к появлению двух энергии (аннигиляция).» [35]

Энергетический спектр позитронов является непрерывным.

Радиационный контроль

Достоинства:

Преимущества радиационного метода неразрушающего контроля заключаются в удобстве восприятия полученных результатов и способности обнаруживать мелкие округлые дефекты, такие как поры, которые сложно выявить с помощью ультразвукового контроля. Этот метод способен

фиксировать минимальные недостатки, включая отдельные поры размером от 0,2 до 0,3 мм.

Недостатки:

Недостатки данного метода включают опасность излучения и его потенциальный вред для здоровья. Также существует ограничение по толщине металлических изделий, подлежащих контролю. Проблематично обнаруживать «тонкие» дефекты, если они расположены невыгодно относительно направления излучения, например, трещины, которые располагаются перпендикулярно лучам. Кроме того, радиационный контроль отличается низкой производительностью и сравнительно высокими затратами на контрольные материалы [34, с. 128].

Недостатки:

Акустические методы неразрушающего контроля.

«Акустические методы неразрушающего контроля основаны на акустических колебаниях, которые представляют собой механические вибрации частиц упругой среды. В этой области наиболее распространенными методами являются:

- эхометод, используемый для обнаружения внутренних дефектов в сварных соединениях конструкций, а также для выявления усталостных трещин в труднодоступных местах и в других объектах;
- импедансный метод, который применяется для контроля качества клеевых соединений в конструкциях с сотовыми наполнителями.»

[34]

«Для успешного применения эхометода необходимо, чтобы проверяемый материал обладал упругими свойствами, был однородным и имел низкий коэффициент затухания. Также важно обеспечить хороший доступ для введения ультразвуковых волн в зону проверки объекта, а поверхность детали должна быть очищена не ниже 5 класса, независимо от наличия лакокрасочных покрытий, которые при выполнении контроля не удаляются.» [34]

«Акустические волны представляют собой механические колебания частиц в упругих средах. Длина волны (λ) определяется как расстояние между двумя соседними частицами, которые находятся в одной и той же фазе колебания. Для её вычисления используется следующая формула:» [34]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (38)$$

«где c – скорость, с которой волна распространяется в материале;

T – период колебаний;

f – частота этих колебаний [27, с. 140].»

«В зависимости от направления колебаний частиц относительно направления распространения волны, выделяют четыре основных типа волн (рисунок 24):

- продольные;
- поперечные;
- поверхностные;
- нормальные.

В продольных волнах частицы движутся в том же направлении, что и сама волна, совершая колебания. Эти волны состоят из чередующихся участков сжатия и растяжения (рисунок 24) и способны проходить через твердые, жидкие и газообразные материалы. В отличие от них, поперечные (сдвиговые) волны заставляют частицы колебаться перпендикулярно направлению своего распространения. Такие волны могут возникать исключительно в твердых веществах.» [27]

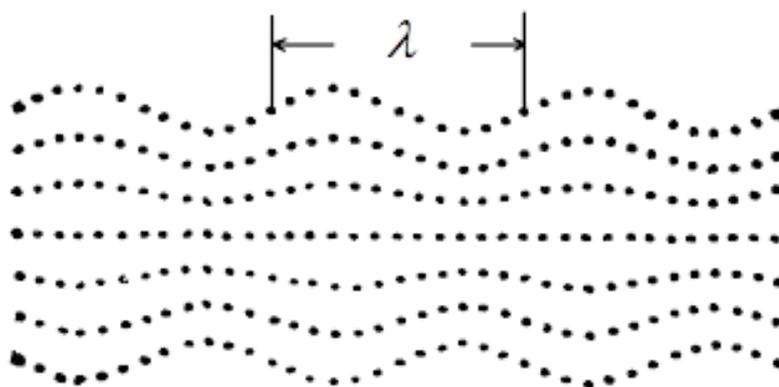


Рисунок 24 – Упругая волна

«Поверхностные волны отличаются тем, что частицы одновременно колеблются вдоль и поперек направления распространения, крутятся по эллиптическим или более сложным траекториям. Они находятся на поверхности объекта, следуя его форме, и быстро теряют силу с углублением (рисунок 24). Нормальные волны могут возбуждаться только в тонкостенных трубах и листах с постоянной толщиной (от 0,3 до 10 мм).» [24]

«Существуют две нормальные волны, которые возникают и распространяются независимо друг от друга (рисунок 24):

- симметричная (растягивающая волна);
- асимметричная (изгибная волна).» [24]

Удельное волновое сопротивление < отражает акустические свойства одной среды в сравнении с другой.

Акустические методы неразрушающего контроля

Достоинства включают в себя:

- высокую чувствительность, что позволяет обнаруживать малозаметные дефекты.
- значительную проникающую способность, дающую возможность выявлять внутренние недостатки в крупных изделиях.
- способность точно определять расположение и размеры дефектов.
- почти мгновенное обнаружение недостатков, что позволяет автоматизировать процесс контроля.

- возможность проведения контроля при одностороннем доступе к объекту.
- легкость и высокая эффективность контроля.
- полную безопасность для оператора и окружающих работников.

Однако акустические методы имеют и недостатки:

- необходимость разработки специализированных методик контроля для различных типов деталей.
- требование к достаточно высокой чистоте обработки поверхности контролируемых объектов.
- наличие мертвых зон, что может уменьшать эффективность контроля.

3.2 Технология организации и проведения контроля. Выбор метода диагностики оборудования

Организация контроля включает в себя развертывание сложных программных и аппаратных систем, предназначенных для наблюдения за различными операционными аспектами. К ним относятся системы сбора данных, которые в режиме реального времени собирают информацию с различных датчиков и устройств по всему операционному полю. Затем эти данные обрабатываются и анализируются для мониторинга производительности, выявления аномалий и оптимизации процессов. Интеграция этих систем в централизованный диспетчерский пункт позволяет операторам иметь полный обзор всей работы, что облегчает управление несколькими процессами одновременно. С другой стороны, управление сосредоточено на выполнении задач мониторинга и настройки. Автоматизированные системы управления часто используются для поддержания рабочих параметров в заданных пределах. Эти системы могут автоматически регулировать такие переменные, как давление, температура и скорость потока, чтобы обеспечить оптимальную производительность. Кроме

того, используются инструменты прогнозной аналитики, позволяющие предвидеть потенциальные проблемы до того, как они перерастут в критические, что сокращает время простоя и повышает безопасность [27].

Помимо этих технологий, для обеспечения надежной и быстрой передачи данных с удаленных объектов в центральные системы управления необходимы современные коммуникационные сети. Это особенно важно в условиях, когда производственные операции осуществляются на обширных географических территориях.

«В настоящее время существует множество способов оценки технического состояния, основанных в разнообразном физическом, химическом и математическом подходе, а также методах сбора и обработки первичной информации. В научной литературе выделяются несколько ключевых методов для сбора и анализа диагностических данных: трибодиагностика, диагностика на основе анализа продуктов износа в газах, возникающих при сгорании; оценка температурного состояния компонентов; метод акустической эмиссии; радиографический анализ;

- магнитно-порошковая дефектоскопия;
- вихретоковая диагностика;
- ультразвуковая проверка; капиллярная проверка;
- вибрационная диагностика;
- акустическая диагностика;
- методы параметрической диагностики и другие [9, с. 157].
- трибодиагностика»

«Существующие подходы к оценке прочности компонентов агрегатов в процессе проектирования почти всегда позволяют своевременно обнаруживать начало разрушений, возникающих под статическими нагрузками. Тем не менее, динамические напряжения, возникающие на поверхности материала, порой сложно адекватно оценить, что может привести к разрушениям в ходе эксплуатации. Обычно разрушения предваряются такими явлениями, как образование каверн, питтинга на

контактных поверхностях и отслаиванием верхнего слоя. Сбой происходит по истечении времени, необходимого для развития недостатка до критического уровня. В процессе образования дефектов частицы, отделяющиеся от зон разрушения, переносятся потоком масла в системе смазки. В данном случае масло выполняет функцию индикатора потенциальных проблем. Для успешной диагностики необходимо уметь отличать продукты нормального износа от частиц, возникающих в результате разрушений или проникающих в систему смазки во время осмотров и ремонтов. Методы диагностики, основанные на анализе частиц износа в масле, называют трибодиагностикой, и они опираются на принцип выявления и фиксации металлических частиц износа» [3, с. 241].

Диагностика с анализом продуктов износа в продуктах сгорания

«Данный метод диагностики предназначен для мониторинга состояния газотурбинных установок (ГТУ) насосных агрегатов. Установлено, что разрушение элементов проточной части газоперекачивающего агрегата, которое происходит из-за перегрева, газовой коррозии и абразивного износа, приводит к выносу из агрегата мельчайших металлических частиц вместе с газом. Поэтому можно определить начало и характер разрушений, фиксируя присутствие продуктов износа и их состав. Этот подход схож с диагностикой, основанной на анализе изношенных частиц в масле. Решение данной задачи реализуется с использованием импульсного метода с лазерным источником для измерения концентрации в турбулентном газовом потоке. Экспериментально доказано, что такой метод позволяет проводить мгновенные (в пределах 10-14 секунд) и синхронные измерения.» [3]

Тепловой контроль

Температурные напряжения и их колебания во время эксплуатации являются одним из факторов, приводящих к повреждению конструктивных элементов горячей части газотурбинной установки (например, камеры сгорания и турбины). Для предотвращения разрушений, вызванных термическими воздействиями, важно контролировать фактическое

температурное состояние деталей. Пирометры, использующие оптический метод, наиболее широко применяются для непосредственного измерения температуры нагретых компонентов (рисунок 25). Кроме того, растет популярность тепловизоров для картирования температурных полей на корпусных деталях (рисунок 26).



Рисунок 25 – Пирометр



Рисунок 26 –Тепловизор

Визуально-оптическая контроль

Методика позволяет выявлять такие недостатки, как вмятины, разрывы, трещины, повреждения от эрозии, прогары, усталостные раковины, а также деформации, искажения, разрушение покрытий и загрязнение динамической зоны. Для осуществления контроля используется специализированное оборудование.

Метод акустической эмиссии

Акустическая эмиссия – это процесс генерации колебательных волн в материалах, возникающий вследствие необратимых разрушений в кристаллической решетке, что приводит к образованию микрообъемных трещин. Эти колебания могут быть зафиксированы пьезоэлектрическим датчиком, который устанавливают непосредственно на контролируемом объекте. Также для определения местоположения дефектов могут использоваться несколько датчиков, расположенных вне детали, которые фиксируют акустические сигналы, созданные в процессе разрушения (рисунок 27).

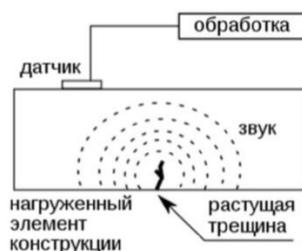


Рисунок 27 – Принцип диагностики методом акустической эмиссии

Радиографический контроль

Радиография является довольно продолжительной и сложной процедурой, поэтому она используется только для периодических оценок состояния оборудования или в случаях подозрения на серьезные, но трудно обнаружимые неисправности. В этом процессе применяются установки, работающие на основе рентгеновских лучей и радиоактивных изотопов (рисунок 28).

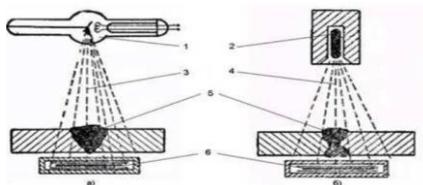


Рисунок 28 – Схема радиографического контроля

Вибрационный контроль

Вибрационная диагностика основывается на анализе механических колебаний, возникающих во время работы газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Большинство проблем в ГПА напрямую сказываются на их вибрации, что позволяет отслеживать изменения состояния агрегатов в процессе эксплуатации с помощью виброметров (рисунок 29).



Рисунок 29 – Виброметры

Акустический контроль

Нормальный шум газотурбинной установки (ГТУ) и центральной блочной насосной (ЦБН) характеризуется сплошным спектром по всем частотам, с наличием некоторых дискретных компонент (рисунок 30).

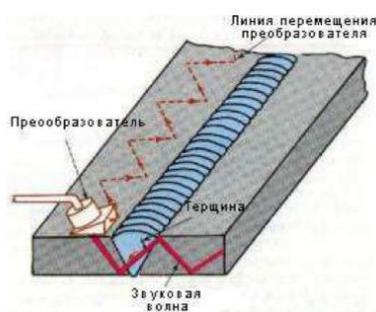


Рисунок 30 – Акустический контроль

Широкополосный шум возникает из-за случайных колебаний газового потока и связан с турбулентностью на границе слоя, а также с нарушением

концевых вихрей при прохождении потока мимо лопаток, взаимодействием вращающегося потока с ротором и статором, а также процессами горения.

3.3 Анализ и оценка эффективности организации и проведения диагностики и контроля оборудования

«С увеличением масштабов производства и усложнением технических систем, а также функций, которые они выполняют, возникает проблема надёжности работы оборудования. Недостаточный уровень надёжности и неэффективное техническое обслуживание могут привести к аварийным ситуациям, нарушениям технологических процессов, повышению расходов на восстановление и ремонт, ухудшению качества продукции и другим нежелательным последствиям.» [27]

«Анализ указывает на то, что задача оценки остаточного ресурса в стареющем оборудовании представляет собой многогранную проблему, охватывающую технические, технологические, управленческие, экономические и организационные аспекты. Сложность в её решении заключается в том, что в реальных условиях предприятий нефтегазового сектора количество параметров оборудования, значимых для возникновения и развития аварий, весьма велико. Организация оперативного контроля всех необходимых параметров зачастую оказывается невыполнимой.» [27]

«На практике часто возникает ситуация, когда невозможно диагностировать весь парк контролируемого оборудования одновременно. Более того, определенные диагностические методы требуют выводить оборудование из эксплуатации. Поэтому возникает необходимость в автоматизированном мониторинге текущего технического состояния оборудования в рамках сложной технической системы в реальном времени. Это позволит выявлять отдельные агрегаты, которые требуют более тщательного обследования и, при необходимости, осуществления ремонтно-профилактических мероприятий» [27, с. 37].

«Основной целью оперативной (функциональной) диагностики является сбор информации о техническом состоянии исследуемого объекта, его технологических характеристиках и нагрузочных показателях, а также условиях взаимодействия с окружающей средой. Данная диагностика может проводиться на объекте как в непрерывном, так и в дискретном режиме, согласно заранее разработанному и согласованному с ответственными службами плану. Она осуществляется с использованием комплекта штатных измерительных приборов и включает в себя регистрацию показателей технологического процесса. Эти показатели могут выступать в качестве параметров технического состояния объекта, таких как температура, давление, мощность, уровень вибрации, расход топлива и объем перекачиваемого продукта и другие. Полученные данные подлежат дальнейшей статистической обработке» [32, с. 83].

«Экспертная оценка имеет задачу в сборе сведений о фактическом техническом состоянии объекта, выявление повреждений, а также анализ причин и механизмов их возникновения и прогрессирования. Эта оценка осуществляется в соответствии с программным обеспечением, созданным на основе изучения технической документации и данных оперативной диагностики, касающихся конкретного объекта. В общем плане программа включает следующие этапы:

- визуальный осмотр (внутренний и внешний);
- измерение геометрических параметров, включая толщину стенок конструкции;
- анализ химического состава, оценка твердости, структуры металла, определение механических свойств; дефектоскопический контроль, который осуществляется с учетом требований к полноте и достаточности выявления дефектов и повреждений объекта;
- изучение напряженно-деформированного состояния объекта» [32, с. 127].

«Для выполнения экспертного обследования необходимо использовать методики и измерительные приборы, указанные в действующей нормативно-технической документации, а также соблюдать требования проектной, монтажной и эксплуатационной документации данного объекта. Применение специализированных методов и оборудования допускается только после получения согласования от профильных организаций. Результаты экспертного обследования оформляются в виде протоколов измерений, а также карт, демонстрирующих дефекты и повреждения объекта. Кроме того, в заключение включаются таблицы данных, а вся информация обобщается в отчете или техническом заключении.» [27]

Цель экспертиз по анализу повреждений и условиях технического состояния объекта, осуществляемых на основе изучения технической документации, оперативной диагностики и экспертного обследования, заключается в определении актуального состояния объекта, степени и механизма повреждений, а также фактических нагрузок. Это необходимо для выяснения возможности дальнейшей эксплуатации объекта или необходимости проведения более глубокого анализа его технического состояния. Процесс анализа включает в себя:

- определение фактических нагрузок на ключевые элементы конструкции, рассчитанное по действующим нормативным документам с учетом всех режимов нагружения и влияющих факторов (включая температурные воздействия), реальной геометрии конструкции, толщины несущих элементов, а также имеющихся и обнаруженных концентраторов напряжений; анализ результатов экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния, полученных в ходе оперативной диагностики и экспертных обследований.
- разработка механизмов формирования и увеличения выявленных дефектов и повреждений, а также потенциальных отказов, происходящих из их развития;

- оценка технического состояния объекта, проверка его соответствия требованиям нормативной и проектной документации, установление ключевых параметров технического состояния;
- установление уточненной системы предельных состояний и их критериев, отличной от представленной в нормативной документации (например, уровень утечек, степень деформации и т. д.);
- вывод о необходимости дальнейшего анализа напряженно-деформированного состояния конструкции и характеристик материалов (например, свойств сварных соединений и подобных элементов);
- заключение о целесообразности продолжения эксплуатации объекта с определением его назначенного ресурса.

Результаты проведенного анализа оформляются в форме технического отчета.

Цель уточненных расчетов и экспериментальных исследований, связанных с напряженно-деформированным состоянием и характеристиками материалов, а также с предельными состояниями и их критериями, заключается в сборе дополнительной информации о значениях номинальных и локальных напряжений и деформаций с учетом реальных свойств материалов. Это необходимо для понимания механизмов повреждения и оценивания остаточного ресурса конструкции.

«Уточненные расчеты выполняются с учетом действительных условий эксплуатации объектов и свойств материалов на момент проведения диагностики. При этом могут быть использованы методы, не предусмотренные нормативной документацией. Применение таких методов должно быть обосновано результатами экспериментальных исследований. Кроме того, возможно использование методов моделирования и ускоренных испытаний для достижения более точных результатов» [35, с. 54].

Уточнение характеристик материалов должно осуществляться на образцах, полученных из конструктивных элементов или с использованием контрольных образцов. Список характеристик должен быть дополнен, учитывая специфические условия эксплуатации, такими параметрами, как усталостная прочность при низкочастотных и высокочастотных циклах, трещиностойкость, долговечность, а также устойчивость к коррозии, коррозионному растрескиванию и износу. Испытания образцов и оценка свойств материалов проводятся согласно стандартным методам или согласованным с Госгортехнадзором подходам. На основании уточненных расчетов и анализа напряженно-деформированного состояния выявляются механизмы повреждений, которые помогают определить техническое состояние объекта и критерии его предельных состояний. Схема общего подхода к технической диагностике и оценке остаточного ресурса опасных объектов представлена на рисунке 31.

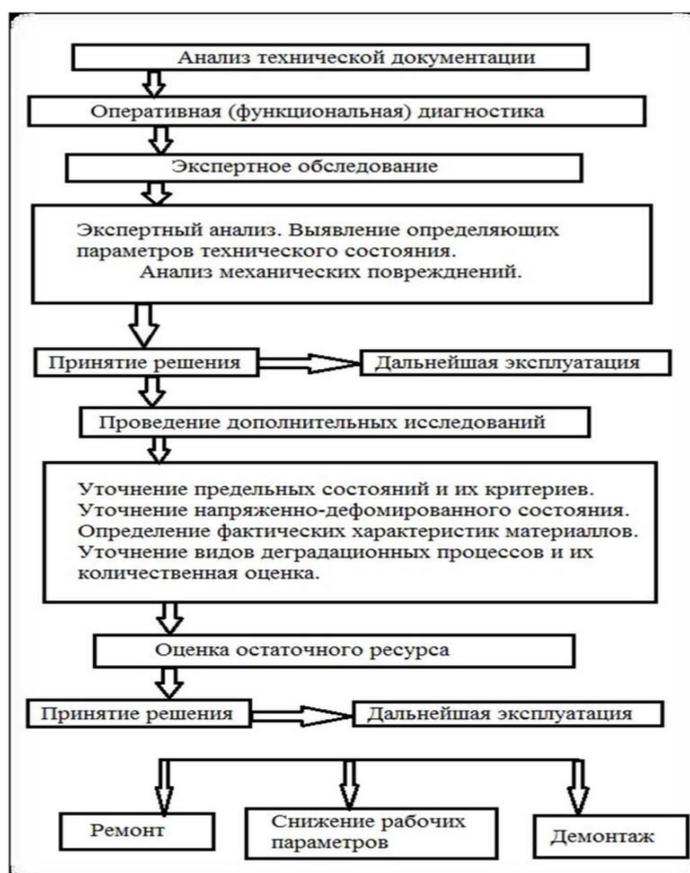


Рисунок 31 – Алгоритм определения остаточного ресурса

На основе собранных данных в ходе технического диагностирования объекта, определяется остаточный ресурс, прогнозируя изменение ключевых параметров до того, как они достигнут критических значений. В методе определения остаточного ресурса необходимо обосновать выбор подхода к прогнозированию, установить требования к его точности, а также провести оценку рисков, связанных с дальнейшей эксплуатацией объекта. Остаточный ресурс представляет собой общую наработку объекта с момента проверки его технического состояния до момента, когда он достигнет предельного состояния.

Оценка эффективности предлагаемых мероприятий отображена в таблице 5.

Таблица 5 – План финансового обеспечения мероприятия

«Наименование мероприятия»	«Основание»	«Стоимость, руб.»	«Срок реализации»	«Ответственный»
«Проведение диагностики»	«План мероприятий по улучшению безопасности на 2025 г.»	2 650 300	3 кв. 2025 г.	«Главный инженер»

Смета расходов представлена в таблице 6.

Таблица 6 - Смета расходов

«Наименование рабочей зоны»	«Внедрение технологии»
«Стоимость оборудования, руб.»	2 526 300
«Стоимость монтажных работ, руб.»	124 000
«Итого, руб.»	2 650 300

«Полученный экономический эффект: [1]

$$\mathcal{E}_r = \Pi - \mathcal{Z} \quad (39)$$

где \mathcal{E}_r – годовой экономический эффект, руб.;

Π – величина полученного дохода (прибыли) от реализации мероприятия, руб.;

Z – затраты на реализацию мероприятия, руб.» [1].

«Полученный доход (прибыли) от применения технологии гидродинамической очистки нефтепромысловых объектов:» [1]

$$\Pi = \mathcal{E}_{\Pi} + \Pi_{\text{ст.орг.}} \quad (40)$$

«где \mathcal{E}_{Π} – прибыль, полученная при экономии собственного производства;

$\Pi_{\text{ст.орг.}}$ – прибыль, полученная от сторонних организаций при применении технологии гидродинамической очистки нефтепромысловых объектов» [1].

$$\Pi = 2350500 + 1690500 = 4041000$$

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = 4041000 - 2650300 = 1390700 \text{ руб.}$$

«Итак, согласно предварительным расчетам, экономический эффект положителен. Таким образом, получим экономическую эффективность мероприятия:

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = \frac{\Pi}{Z} \quad (41)$$

где \mathcal{E}_{Γ} – годовой экономический эффект, руб.;

Π – величина полученного дохода (прибыли) от реализации мероприятия, руб.;

Z – затраты на реализацию мероприятия, руб.» [1].

$$\mathcal{E}_{\Gamma} = \frac{4041000}{2650300} = 1,52$$

«В таблице 7 приведены исходные данные для расчета показателей эффективности мероприятий по охране труда.» [1]

Таблица 7 – Исходные данные для расчета показателей эффективности мероприятий по охране труда

Наименование показателя	усл. обозн.	ед. измер.	Данные	
			Базовый вариант	Проектный вариант
«Годовая среднесписочная численность работников» [1]	ССЧ	чел.	540	540
«Число пострадавших от несчастных случаев на производстве» [1]	Чнс	чел.	8	0
«Количество дней нетрудоспособности в связи с несчастными случаями» [1]	Днс	дн	150	0
«Плановый фонд рабочего времени в днях» [1]	Ф _{план}	дни	254	254
«Ставка рабочего» [1]	Т _{чс}	руб/час	350	350
«Коэффициент доплат» [1]	k _{допл.}	%	0,4	2
«Продолжительность рабочей смены» [1]	T	час	12	12
«Количество рабочих смен» [1]	S	шт	11	11
«Коэффициент материальных затрат в связи с несчастным случаем» [1]	μ		1,4	1,4
«Единовременные затраты» [1]	Зед	руб.	0	2 650 300

«Чистый экономический:

$$\text{ЧЭЭ} = \sum \text{Э}_t - \text{З}_t, \quad (42)$$

где Э_t – результаты (эффекты, предотвращенный ущерб), достигнутые на t-ом шаге расчета;

З_t – затраты, осуществляемые на этом шаге, включая капитальные вложения» [1].

$$\text{ЧЭЭ}_1 = 0 - 2650300 = -2650300,$$

$$\text{ЧЭЭ}_1 = 4041000 - 150000 = 254100.$$

«Чистый дисконтированный доход:» [1]

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (\text{Э}_t - \text{З}_t + \text{А}_t) \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (43)$$

«где Э_t – результаты (эффекты, предотвращенный ущерб), достигнутые на t -ом шаге расчета;

З_t – затраты, осуществляемые на этом шаге, включая капитальные вложения;

А_t – амортизационные отчисления, осуществляемые на этом шаге;

T – горизонт расчета;

E – норма дисконта.» [1]

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (4041000 - 2650300 + 124000) \frac{1}{(1 + 1,12)^t} = 714481$$

«Срок окупаемости:» [1]

$$T_{\text{ок}} = T - \frac{\text{ЧДД}_T}{\text{ЧДД}_{T+1} - \text{ЧДД}_T}, \quad (44)$$

«где T – год, в котором значение чистого дисконтированного дохода последний раз отрицательное;

ЧДД_T – последнее отрицательное значение чистого дисконтированного дохода в период времени T ;

ЧДД_{T+1} – первое положительное значение чистого дисконтированного дохода» [1].

$$T_{\text{ок}} = 1 - \frac{714481}{2985881 - 714481} = 0,69$$

«Расчет ЧЭЭ, ЧДД, срок окупаемости представлены в таблице 8» [1].

Таблица 8 – «Интегральные показатели эффективности мероприятия» [1]

Наименование показателей	Значение показателей по годам, тыс. д. е.				
	1	2	3	4	5
«Капитальные вложения» [1]	2650300	–	–	–	–
«Ежегодные затраты» [1]	2650300	265030	265030	265030	265030
«Эффект» [1]	1,8	1,6	1,5	1,2	1,1
«ЧЭЭ» [1]	-2650300	254100	254100	254100	254100
«ЧДД с нарастающим итогом» [1]	714481	2985881	2985881	2985881	2985881
«Ток» [1]	0,69	0,69	–	–	–
«Дисконтированный доход» [1]	-2650300	254100	254100	254100	254100
«Индекс доходности» [1]	10,4				

«Индекс доходности ИД, или индекс рентабельности капвложений, рассчитывается как:» [1]

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=0}^T (\Delta_t + A_t)(1+E)^{t-1}}{\sum_{t=0}^T K_t(1+E)^{t-1}}, \quad (45)$$

«Если ИД < 1, то программа мероприятий в пределах горизонта планирования не окупается, и соответственно, проект отвергается.»

$$\text{ИД} = \frac{\sum_{t=0}^T (4041000 + 124000)(1 + 1,12)^{t-1}}{\sum_{t=0}^T K_t(1 + 1,12)^{t-1}} = 10,4$$

Вывод по третьему разделу.

В данном разделе рассмотрели виды контроля их достоинства и недостатки. Произвели классификацию методов по признакам.

В настоящее время существует множество способов оценки технического состояния, основанных в разнообразном физическом, химическом и математическом подходе, а также методах сбора и обработки первичной информации. Существующие подходы к оценке прочности

компонентов агрегатов в процессе проектирования почти всегда позволяют своевременно обнаруживать начало разрушений, возникающих под статическими нагрузками.

Анализ указывает на то, что задача оценки остаточного ресурса в стареющем оборудовании представляет собой многогранную проблему, охватывающую технические, технологические, управленческие, экономические и организационные аспекты. Сложность в её решении заключается в том, что в реальных условиях предприятий нефтегазового сектора количество параметров оборудования, значимых для возникновения и развития аварий, весьма велико.

Проблема состоит в том, что невозможно диагностировать весь парк контролируемого оборудования одновременно. Поэтому прибегают к автоматизированному мониторингу текущего технического состояния оборудования. Цель диагностики как можно больше узнать о техническом состоянии объекта, чтобы предотвратить аварии.

Из оценки эффективности проведение диагностики для улучшение безопасности можно сделать вывод, о том что экономический эффект положителен. Срок окупаемости 0,69 лет.

Заключение

На основе информации об аварийности проанализированы причины их возникновения в период эксплуатации турбокомпрессоров на предприятиях нефтепереработки. Выявили из этого анализа, что причины аварийности в основном в ошибках персонала, нехватки квалифицированных кадров, недостатки оборудования. Рассмотрена нормативно-правовая база обеспечения безопасности эксплуатации опасных производственных объектов. Описаны методы контроля, такие как:

- вихретоковый контроль;
- магнитопорошковый контроль;
- ультразвуковой;
- магнитный;
- электрический;
- радиоволновый;
- тепловой;
- оптический;
- радиационный.

Самый эффективный способ диагностики и контроля оборудования с применением автоматизированных систем технического диагностирования.

После анализа неисправностей турбокомпрессоров определили, что 80% отказа это результат износа подшипников скольжения, валов, уплотнений. Основная причина износа является высокая температура.

В ходе ряда экспериментальных работ была оценена функциональность гладких и сотовых уплотнений при использовании их в разнообразных размерах радиальных зазоров. Дополнительно, для более глубокого понимания было проведено сравнение эффективности двух различных по конструкции типов сотовых уплотнений в контексте их применения в компрессорных устройствах и элементах турбинных ступеней. Данные об эффективности отмечены на основе экспериментов, проведенных на

масштабной модели одноступенчатой газотурбинной установки, где роли периферийных элементов для бесбандажного рабочего колеса выполняли сотовые и гладкие уплотнения.

Из анализа результатов этих исследований по модели турбинной ступени с периферийно расположенным сотовым уплотнением можно сделать вывод о значимости настройки геометрических параметров сотовой структуры. Цель данной оптимизации – усиление влияния на объем потока утечки через радиальный зазор для его минимизации.

Описанные методы контроля такие как визуально-оптический контроль, радиационный методы неразрушающего контроля, акустические методы неразрушающего контроля показывают трудности при диагностике. Поэтому прибегают к автоматизированному мониторингу текущего технического состояния оборудования.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анализ и оценка эффективности предлагаемых мероприятий по обеспечению техносферной безопасности в организации [Электронный ресурс] : URL: <https://edu.rosdistant.ru/mod/assign/view.php?id=120311> (дата обращения: 22.12.2024).
2. Баталов С. А. Акустическая система технической диагностики параметров эксплуатируемого нефтегазового месторождения //Контроль. Диагностика. 2009. №. 11. С. 27–33.
3. Баширов М. Г., Сайфутдинов Д. М. Электромагнитная диагностика насосно-компрессорного оборудования с электрическим приводом // Межвузовск. сборник научн. трудов. «Нефть и газ - 2001». Уфа : Изд-во УГНТУ. 2001. С. 210–218.
4. Безопасность жизнедеятельности. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях : учеб. пособие для вузов [Гриф УМО] / Я. Д. Вишняков [и др.]. 2–е изд., стер. М. : Академия, 2008. 304 с.
5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения (принят в качестве межгосударственного стандарта ГОСТ 22.3.03-97). [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 22.3.03-94 : Введ. 01.01.1996. URL: https://rosogosts.ru/file/gost/13/200/gost_22.3.03-97.pdf (дата обращения: 22.12.2024).
6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Культура безопасности жизнедеятельности. Общие положения. [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 22.3.07-2014 : Введ. 01.04.2015. URL: https://fryazino.org/static/upload/admin/admin2016/GOST_kb.pdf (дата обращения: 22.12.2024).
7. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Порядок разработки перечня мероприятий по гражданской обороне, мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера при проектировании объектов капитального строительства.

[Электронный ресурс] : ГОСТ Р 55201-2012 : Введ. 01.07.2013. URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-16/c2d2af8f683ee42ff83cf8cd958a55f2.pdf> (дата обращения: 22.12.2024).

8. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения. [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 22.0.02-2016 : Введ. 01.07.2010. URL: https://kursgo.ru/doc/GOST_SNIP/ГОСТ%20Р%2022.0.02-2016.pdf (дата обращения: 22.12.2024).

9. Биргер И. А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.

10. Богданов Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. М. Высш. шк., 2006. 279 с.

11. Жильцов В. В. Моделирование интеллектуальной системы технической диагностики нефтегазовых скважин с использованием программы «StatisticaNeuralNetworks» //Всероссийская научно-техническая конференция «Роль механики в создании эффективных материалов, конструкций и машин XXI века»: труды / В. В. Жильцов, В. В. Чувилова. Омск. 2006. С. 20–23.

12. Занько Н. Г., Малаян К.Р., Русак О.Н. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие для вузов [Гриф: Центра стратегических исследований гражданской защиты МЧС России]. М. : «Лань», 2010. 672 с.

13. Калекин В. С. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: учеб. пособие //Периодические издания. Омск.: Изд-во ОмГТУ, 2012. 114 с.

14. Мазурин Е. П., Айзман Р. И. Гражданская оборона: учеб. пособие для вузов [Гриф УМО] : Новосиб. гос. пед. ун–т, Моск. пед. гос. ун–т. Новосибирск. М. : АРТА, 2011. 262 с.

15. Миронова И. С., Баширов М. Г., Касимова Э. Ф. Интегральные параметры для оценки технического состояния двигателей электропривода

машинных агрегатов нефтегазовых производств //Современные проблемы науки и образования. 2011. № 3. С. 16–25.

16. О пожарной безопасности [Электронный ресурс] : Федеральный закон Российской Федерации от 21.12.1994 (ред. от 19.10.2023) № 69-ФЗ. URL: https://41.mchs.gov.ru/uploads/resource/2024-01-17/normativnye-pravovye-akty-reguliruyushchie-osushchestvlenie-gosu-darstvennogo-kontrolya-nadzora_1705444551571576372.pdf (дата обращения: 22.12.2024).

17. О специальной оценке условий труда [Электронный ресурс] : Федеральный закон Российской Федерации от 28 декабря 2020 г. № 426–ФЗ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=455233> (дата обращения: 22.12.2024).

18. О техническом регулировании [Электронный ресурс] : Федеральный закон Российской Федерации от 27.12.2002 № 184–ФЗ (ред. от 23.12.2021). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=477256> (дата обращения: 22.12.2024).

19. Петров С. В., Гиренко Л. А., Слинькова И. П. Социальные опасности и защита от них : учеб. пособие для вузов [Гриф УМО] : Новосиб. гос. пед. ун–т, Моск. пед. гос. ун–т. Новосибирск : Издательство НГПУ. М. : Издательство МПГУ, 2011. 270 с.

20. Прахов И. В. Оценка поврежденности насосных агрегатов по значениям параметров гармоник токов и напряжений электропривода // Уфа: УГНТУ, 2011. 140 с.

21. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 24 июля 2020 г. № 328н «Об утверждении правил по охране труда при эксплуатации электроустановок».

22. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. [Электронный ресурс] : ГОСТ 12.0.003-2015 : Введ. 01.03.2017. URL: <https://marsbbz.ru/wp-content/uploads/2021/05/gost-12.0.003-2015-sistema-standartov-bezopasnosti->

truda-ssbt.-opasnye-i-vrednye-proizvodstvennyye..._tekst.pdf (дата обращения: 22.12.2024).

23. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1). [Электронный ресурс] : ГОСТ 12.1.004-91 : Введ. 01.07.1992. URL: <https://www.reglament.by/wp-content/uploads/docs/gost/GOST-12.1.004-91.pdf> (дата обращения: 22.12.2024).

24. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы фотолюминесцентные эвакуационные. Требования и методы контроля. [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 12.2.143-2009 : Введ. 01.07.2010. URL: <https://spb.gasznak.ru/upload/iblock/8b6/8b652e7377f1e30b120e3fcbaa0e88b1.pdf> (дата обращения: 22.12.2024).

25. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения. [Электронный ресурс] : ГОСТ 12.1.009-2017 : Введ. 01.01.2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161311> (дата обращения: 22.12.2024).

26. ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. [Электронный ресурс] : ГОСТ 12.1.030-81 : Введ. 01.07.1982. URL: <https://murmansk.stds.ru/document/ГОСТ%2012.1.030-81.pdf> (дата обращения: 22.12.2024).

27. Стеклов О. И. Техническая диагностика оборудования и сооружений нефтегазового и нефтегазохимического комплексов // Дефектоскопия. 2006. №. 4. С. 113–121.

28. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс] : Федеральный закон от 22.07.2008 № 123–ФЗ (ред. от 25.12.2023). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219> (дата обращения: 22.12.2024).

29. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197–ФЗ (ред. от 02.08.2020) // «Российская газета», N 256, 31.12.2001.

30. Фомочкин А. В. Производственная безопасность. М. : ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 448 с.
31. Фролов В. П., Стояков В. М., Воробьев В. В. Определение остаточного ресурса нефтегазопромыслового оборудования по статистическим эксплуатационным данным // Нефтяное хозяйство. 1999. № 8. С.34–36.
32. Хван Т. А., Хван П. А. Безопасность жизнедеятельности : практикум. 3–е изд. Ростов н/Д : Феникс, 2010. 317 с.
33. Хван Т. А., Хван П. А. Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие для вузов [Гриф Минобразования РФ]. 8–е изд. Ростов н/Д : Феникс, 2010. 415 с.
34. Юмагузин У. Ф., Баширов М. Г. Повышение безопасности эксплуатации оборудования нефтегазовой отрасли //Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. С. 45–49.
35. Юмагузин У. Ф., Баширов М. Г. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования предприятий нефтегазовой отрасли //Фундаментальные исследования. 2014. № 3–2.
36. Lofland K. Hazardous (Classified) Locations – NEC Articles 500 through 517 // IAEI Magazine, International Association of Electrical Inspectors. 2017. №7. P. 24–29.
37. Radandt , S., Rantanen, J., Renn O. Governance of Occupational Safety and Health and Environmental Risks / S. Radandt, J. Rantanen, O. Renn: [Электронный ресурс] : Risks in Modern Society. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4020-8289-4_4 (дата обращения: 22.12.2023).
38. Paturej, K. and Guanglian, P. Meeting Growing Threats of Misuse of Toxic Chemicals: Building a Global Chemical Safety and Security Architecture and Promoting International Cooperation / K. Paturej, P. Guanglian: [Электронный ресурс] : Cyber and Chemical, Biological, Radiological, Nuclear,

Explosives Challenges. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62108-1_14 (дата обращения: 22.12.2023).

39. Small businesses in Croatia equipped with risk assessment knowhow [Электронный ресурс] : URL: <https://osha.europa.eu/en/highlights/small-businesses-croatia-equipped-riskassessment-knowhow> (дата обращения: 22.12.2023).

40. Using 'risk cards' to assess and handle risks (использование «карт риска» для оценки рисков и управления ими [Электронный ресурс] : URL: <https://osha.europa.eu/en/publications/using-risk-cards-assess-and-handle-risks> (дата обращения: 22.12.2023).