

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

О. В. Агеев

**ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки
15.03.02 Технологические машины и оборудование

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2025

Рецензент

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инжиниринга
технологического оборудования Д. Б. Подашев

Агеев, О. В.

Основы надёжности и долговечности технологических машин: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по напр. подгот. 15.03.02 Технологические машины и оборудование / О. В. Агеев. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2025. – 78 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Основы надёжности и долговечности технологических машин» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекции по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля, материалы по подготовке к практическим занятиям, отражены рекомендации для выполнения контрольной работы студентами заочной формы обучения.

Табл. 3, список лит. – 10 наименований

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 26 сентября 2025 г., протокол № 2

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 сентября 2025 г., протокол № 7

УДК 621-192.001.6:658.562

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Калининградский государственный
технический университет», 2025 г.
© Агеев О. В., 2025 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	9
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	39
3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	76
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	77

ВВЕДЕНИЕ

Современное пищевое производство – это высокотехнологичный комплекс, основанный на принципах непрерывности, автоматизации и строжайшего соблюдения санитарно-гигиенических норм. Центром этого комплекса являются технологические машины и аппараты: гомогенизаторы и пастеризаторы, экструдеры и сушильные установки, фасовочно-упаковочные автоматы и роботизированные линии. Отказ любого из этих звеньев способен парализовать работу всего предприятия, привести к колоссальным экономическим потерям, порче ценного сырья и, что самое важное, создать угрозу для здоровья потребителей в случае выпуска небезопасной продукции.

В этом контексте надёжность и долговечность технологических машин перестают быть абстрактными техническими характеристиками и становятся ключевыми факторами конкурентоспособности и устойчивости пищевого бизнеса. Проектирование, изготовление и эксплуатация оборудования, способного годами работать в агрессивных средах, при циклических нагрузках и в условиях повышенных требований к чистоте, – это сложнейшая инженерная задача. Ее решение требует от специалиста глубоких знаний не только в области машиноведения и технологии пищевых производств, но знаний по научным основам надёжности и долговечности технологических машин.

Специфика пищевой промышленности накладывает особый отпечаток на проблему надёжности. Инженеру приходится учитывать не только традиционные механические факторы (нагрузки, трение, вибрацию), но и мощное влияние рабочей среды. Пищевые продукты, их компоненты, а также моющие и дезинфицирующие растворы (чаще всего щелочные и кислотные) являются агрессивными средами, вызывающими коррозию, эрозию и коррозионную усталость материалов. Абразивные включения в сырье (например, частицы почвы на овощах, минеральные добавки) интенсифицируют процессы изнашивания. Жёсткие санитарные требования диктуют необходимость применения специальных конструкционных материалов (нержавеющие стали, сплавы цветных металлов, полимеры), особых конструктивных исполнений (отсутствие застойных зон, плавные переходы, легкодоступные для мойки поверхности) и специальных покрытий. Все это делает задачи обеспечения надёжности и долговечности в машинах для пищевых производств значительно более многогранными по сравнению со многими другими отраслями машиностроения.

Важнейшим принципом проектно-конструкторской деятельности является понимание того, что закладывается на стадии проектирования. Опыт эксплуатации показывает, что потенциальный уровень надёжности и долговечности машины предопределяется решениями, принятыми на этапах концептуального и детального проектирования. Последующая эксплуатация и техническое обслуживание могут лишь реализовать (или не реализовать) этот потенциал, но кардинально повысить его крайне сложно и экономически нецелесообразно.

Таким образом, современный инженер-конструктор технологического оборудования обязан рассматривать критерии надёжности как первичные и равнозначные критериям функциональности и производительности. Это озна-

чает, что ещё до выпуска чертежей в производство необходимо:

- проводить анализ и прогнозирование потенциальных отказов;
- выбирать материалы и покрытия, устойчивые не только к механическим нагрузкам, но и к специфическим воздействиям пищевых сред, моющих и дезинфицирующих растворов;
- заранее закладывать конструктивные решения, облегчающие техническое обслуживание, диагностику и ремонт: лёгкий доступ к критичным узлам, модульность конструкции, применение унифицированных компонентов.

Таким образом, освоение данной дисциплины является не только требованием образовательного стандарта, а реальной необходимостью для подготовки высококвалифицированного инженера, способного проектировать, эксплуатировать и поддерживать высокоэффективное и безопасное оборудование, отвечающее задачам современной пищевой индустрии.

«Основы надёжности и долговечности технологических машин» – дисциплина образовательной программы бакалавриата по направлению подготовки 15.03.02 Технологические машины и оборудование.

Дисциплина «Основы надёжности и долговечности технологических машин» является дисциплиной, формирующей у обучающихся готовность к профессиональной деятельности в области технологического оборудования пищевой и рыбной промышленности.

Целью освоения дисциплины является формирование теоретических знаний по основам надёжности оборудования на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации, включающих в себя: критерии и характеристики надёжности и долговечности; методы анализа надёжности; методы повышения надёжности; методы испытания объектов на надёжность; методы эксплуатации объектов с учётом их надёжности и долговечности.

Задачами дисциплины являются следующие:

- усвоение полученных знаний в области базовых понятий, критериев и количественных характеристик надёжности как комплексного свойства технологических машин и аппаратов;
- изучение физико-механической природы отказов, видов и механизмов изнашивания, усталостного разрушения и коррозии деталей пищевого оборудования;
- освоение методов вероятностно-статистического анализа для сбора данных об отказах, оценки и прогнозирования показателей надёжности;
- приобретение навыков применения методов обеспечения надёжности на этапе проектирования, включая резервирование, оптимальный выбор материалов и конструктивных решений;
- изучение методов контроля, испытаний и диагностики оборудования для проверки и подтверждения его надёжности;
- освоение принципов построения и управления системами технической эксплуатации и ремонта, направленных на поддержание заданного уровня надёжности;
- приобретение навыков использования логических методов анализа надёжности для выявления и предотвращения потенциальных отказов;
- усвоение полученных знаний для оценки экономической эффективно-

сти решений, связанных с повышением надёжности и долговечности оборудования.

Результатами освоения дисциплины является поэтапное формирование требуемых компетенций у обучающихся.

При реализации дисциплины «Основы надёжности и долговечности технологических машин» организуется практическая подготовка путём проведения практических занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

В результате изучения дисциплины студент должен

знать:

- основные системные принципы надёжности и долговечности технических систем;

- основные причины изменения технического состояния технологического оборудования пищевых производств;

- виды и закономерности износа деталей и узлов технологических машин и аппаратов;

уметь:

- выполнять работы по наладке, настройке, регулировке, опытной проверке, регламентному техническому и эксплуатационному обслуживанию технологического оборудования пищевых производств;

- разрабатывать методики проведения эксплуатационных, стендовых и ускоренных испытаний технологического оборудования на надёжность;

- проводить расчёты надёжности деталей технологического оборудования пищевых линий;

владеть:

- навыками контроля бесперебойной и безаварийной работы технологического оборудования и средств автоматики автоматизированных технологических линий по производству продуктов питания;

- навыками разработки инструкции по эксплуатации машин, аппаратов и систем автоматизации для обеспечения надёжной и долговечной работы технологического оборудования;

- навыками обеспечения надёжности и долговечности пищевого технологического оборудования при проектировании и производстве;

- навыками организации надёжной и безаварийной эксплуатации технологических машин и аппаратов пищевых производств.

Для успешного освоения дисциплины «Основы надёжности и долговечности технологических машин», студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Для оценивания поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) предусмотрены практические задания. Решение практических задач обучающимися проводится на практических занятиях после изучения соответствующих тем.

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства поэтапного формирования результатов освоения;

– оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущий контроль) относятся:

– тестовые задания открытого и закрытого типов.

– задания по контрольным работам (для заочной формы обучения).

Промежуточная аттестация в форме зачёта в 7-м семестре проходит по результатам прохождения всех видов текущего контроля успеваемости. В отдельных случаях (при не прохождении всех видов текущего контроля) зачёт может быть проведён в виде тестирования.

Универсальная система оценивания результатов обучения приведена в таблице 1 и включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пяти-балльную систему.

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
2. Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные данные	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые курсы поставленной задачи

Система оценок Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учётом его индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Основы надёжности и долговечности технологических машин» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, перечень вопросов для подготовки к практическим занятиям и организации самостоятельной работы студентов. Материал пособия содержит рекомендации по написанию контрольной работы для студентов заочной формы обучения.

1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Осваивая курс «Основы надёжности и долговечности технологических машин», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ею конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом в области обеспечения надёжности и долговечности технологических машин, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчёркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Основными видами учебной деятельности в ходе изучения курса являются лекции, практические занятия, консультирование по решению практических заданий, выполнение контрольной работы для заочной формы обучения.

При разработке образовательной технологии организации учебного процесса основной упор сделан на соединение активной и интерактивной форм обучения. Интерактивная форма позволяет студентам проявить самостоятельность в освоении теоретического материала и овладении практическими навыками, формирует интерес и позитивную мотивацию к учёбе.

При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем, всякий лекционный курс является в определённой мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

Лекции составляют основу теоретической подготовки и посвящены наиболее важным моментам по проектированию технологических линий в рыбной промышленности. При проведении лекций необходимо использовать технические средства обучения, ЭИОС, применять методы, способствующие активизации познавательной деятельности слушателей. На лекциях целесообразно теоретический материал иллюстрировать рассмотрением различных примеров и конкретных задач. Имеет смысл привлекать студентов к обсуждению как рассматриваемого вопроса в целом, так и отдельных моментов рассуждений и доказательств. Необходимо также использовать возможности проблемного изложения, дискуссии с целью активизации деятельности студентов.

Практические занятия проводятся для закрепления основных теоретических положений курса и реализации их в практических расчётах, формирования

и развития у студентов мышления в рамках будущей профессии.

На практических занятиях следует добиваться точного и адекватного владения теоретическим материалом и его применения для решения задач.

Важным звеном во всей системе обучения является самостоятельная работа обучающихся. В широком смысле под ней следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов, как в отсутствии преподавателя, так и в контакте с ним. Она является одним из основных методов поиска и приобретения новых знаний, работы с литературой, а также выполнения предложенных заданий. Преподаватель призван оказывать в этом методическую помощь студентам и осуществлять руководство их самостоятельной работой.

Необходимо контролировать степень усвоения студентами текущего материала, а также уровень остаточных знаний по уже изученным темам.

При изучении курса предусмотрены следующие формы текущего контроля:

- опросы по теоретическому материалу;
- контроль на практических занятиях.

С целью формирования мотивации и повышения интереса к предмету особое внимание при чтении курса необходимо обратить на темы, которые можно проиллюстрировать примерами из практической сферы, связывая теоретические положения с будущей профессиональной деятельностью студентов.

Тематический план лекционных занятий представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Структура лекционных занятий

Номер темы	Содержание лекционного занятия
1	Надёжность и долговечность как комплексные свойства технологических машин. Основные понятия и показатели
2	Физико-механические основы долговечности и причины потери работоспособности оборудования
3	Вероятностно-статистические методы оценки надёжности и прогнозирования ресурса
4	Расчётные методы оценки и прогнозирования долговечности деталей и сборочных единиц
5	Обеспечение и повышение долговечности на этапах проектирования и изготовления
6	Методы испытаний на долговечность и оценка остаточного ресурса в процессе эксплуатации
7	Системы технической эксплуатации, направленные на реализацию и продление ресурса оборудования
8	Управление надёжностью и долговечностью на протяжении жизненного цикла машины. Экономический аспект

Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

Тема 1. Надёжность и долговечность как комплексные свойства технологических машин. Основные понятия и показатели

Ключевые вопросы темы

1. Актуальность проблемы надёжности и долговечности машин в современных пищевых производствах.
2. Основные понятия и определения теории надёжности.
3. Комплексные показатели надёжности и их составляющие.
4. Показатели долговечности и критерии предельного состояния оборудования.

Ключевые понятия: надёжность, долговечность, безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, отказ, дефект, ресурс, срок службы, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, гамма-процентный ресурс, предельное состояние, объект надёжности.

Литература: [1, с. 10–25].

Методические рекомендации

Первая тема курса «Основы надёжности и долговечности технологических машин» направлена на получение у обучающихся представления о базовых понятиях дисциплины, определении места дисциплины в структуре образовательной программы, планируемых результатов освоения дисциплины, возможных рисках освоения дисциплины, знакомит обучающихся с формами текущего и промежуточного контроля.

При изучении данной темы необходимо выяснить, каковы цели и задачи курса «Основы надёжности и долговечности технологических машин», из каких разделов состоит изучаемая дисциплина.

Современное пищевое производство характеризуется высокой степенью автоматизации, непрерывностью технологических циклов и жесткими требованиями к безопасности продукции. В этих условиях выход из строя любого элемента технологической цепи – насоса, гомогенизатора, пастеризатора – приводит не только к прямым экономическим потерям от простоя и порчи сырья, но и к репутационным рискам и потенциальной угрозе для потребителя. Поэтому свойства надёжности (способности выполнять требуемые функции в заданных условиях) и долговечности (способности сохранять работоспособность до предельного состояния) являются для пищевого оборудования не просто техническими параметрами, а ключевыми факторами экономической эффективности и конкурентоспособности предприятия.

Основные понятия и определения. Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации включает в себя:

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени или некоторой наработки.

Долговечность – свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения и/или транспортирования.

Объект надёжности – изделие (например, технологическая машина), техническая система (линия) или его составная часть (узел, деталь), надёжность которой подлежит изучению или оценке.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Дефект – отдельное несоответствие объекта установленным нормам или требованиям, которое может привести к отказу.

Комплексные показатели надёжности. Показатели надёжности носят вероятностный характер и количественно выражают возможность выполнения объектом своих функций.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Является одной из основных характеристик безотказности.

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник. Эта величина позволяет анализировать «кривую жизненного цикла» оборудования, которая имеет три характерных участка: период приработки, период нормальной эксплуатации и период износных отказов.

Средняя наработка на отказ (T_0) – отношение наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

4. Показатели долговечности и критерии предельного состояния. Долговечность характеризуется наработкой объекта до перехода в предельное состояние.

Предельное состояние – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Для пищевых машин это может быть состояние, при котором машина не обеспечивает заданные параметры продукта (например, степень гомогенизации) или нарушаются санитарно-гигиенические требования.

Ресурс – наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Различают доремонтный, межремонтный и полный ресурс (сумма доремонтных ресурсов).

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Гамма-процентный ресурс – наработка, в течение которой объект не до-

стигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах (например, 90%-ный ресурс).

Таким образом, долговечность определяет жизненный цикл машины, а надёжность характеризует качество ее функционирования в течение этого цикла.

Вопросы для контроля

1. Дайте определение надёжности как комплексного свойства технического объекта.
2. Перечислите и раскройте сущность составляющих свойств надёжности (безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость).
3. В чем состоит различие между понятиями «отказ» и «дефект»? Приведите примеры для оборудования пищевых производств.
4. Что такое вероятность безотказной работы и как этот показатель связан с временем эксплуатации?
5. Опишите характер изменения интенсивности отказов в течение жизненного цикла машины.
6. Дайте определение предельного состояния технологической машины. Какие критерии могут его определять?
7. В чем разница между ресурсом и сроком службы оборудования?
8. Что означает понятие гамма-процентный ресурс и для каких целей он применяется на практике?
9. Объясните, каким образом свойства ремонтпригодности и долговечности взаимосвязаны.
10. Почему проблема обеспечения надёжности и долговечности является особенно актуальной для машин и аппаратов пищевых производств?

Тема 2. Физико-механические основы долговечности и причины потери работоспособности оборудования

Ключевые вопросы темы

1. Виды и механизмы разрушения деталей машин.
2. Физическая сущность и закономерности процесса изнашивания.
3. Классификация видов изнашивания.
4. Влияние условий эксплуатации пищевого оборудования на интенсивность изнашивания.

Ключевые понятия: усталостное разрушение, предел выносливости, кривая Велера, изнашивание, износ, трение, абразивное изнашивание, гидроабразивное изнашивание, окислительное изнашивание, ударное изнашивание, коррозия, кавитация, эрозия.

Литература: [2, с. 36–56].

Методические рекомендации

Виды и механизмы разрушения деталей машин. Основными причинами потери работоспособности и истощения ресурса деталей машин являются механические и физико-химические процессы, приводящие к их разрушению или недопустимому изменению геометрии. К ним относятся:

Усталостное разрушение – процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклически изменяющихся напряжений, приводящий к образованию трещин и хрупкому разрушению при напряжениях, значительно ниже предела прочности. Механизм усталости включает три стадии: 1) инициирование трещины в концентраторе напряжений (после обработки, дефекты литья); 2) медленный рост трещины под действием циклических нагрузок; 3) быстрое разрушение, когда размер трещины достигает критического значения. Критерием усталостной прочности является предел выносливости – максимальное напряжение цикла, которое материал может выдержать без разрушения за условно бесконечное число циклов (обычно 10^6 – 10^7 циклов). Графическая зависимость между амплитудой напряжений и числом циклов до разрушения отображается кривой Велера. Для валов, шестерен, подшипников качения пищевого оборудования, работающих в условиях переменных нагрузок (пуск-остановка, изменение крутящего момента), усталость является основным фактором, ограничивающим долговечность. Особенностью является возможность возникновения коррозионной усталости при работе в агрессивных средах, что значительно снижает предел выносливости.

Пластическая деформация и хрупкое разрушение возникают при однократном или малом числе нагружений, превышающих предел текучести или прочности материала. Характерны для случаев перегрузок или аварийных ситуаций (например, попадание металлического предмета в рабочий орган измельчителя). Для пищевого оборудования хрупкое разрушение особенно опасно, так как может привести к попаданию осколков в продукт.

Физическая сущность и закономерности процесса изнашивания. Изнашивание – процесс постепенного изменения размеров, формы, массы или состояния поверхности детали в результате трения, проявляющийся в отделении материала с поверхности трения и/или его остаточной деформации. Этот процесс носит необратимый характер и приводит к постепенной потере точности, росту вибраций, снижению КПД и, в конечном счете, к отказу узла.

Износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах (линейный износ, объемный, массовый). На практике чаще всего измеряют линейный износ, так как он непосредственно влияет на рабочие зазоры в сопряжениях.

Процесс изнашивания носит, как правило, прогрессирующий характер и определяется трением – процессом сопротивления относительному перемещению соприкасающихся тел. Различают трение скольжения (в подшипниках скольжения, направляющих) и трение качения (в подшипниках качения, зубчатых передачах). Интенсивность изнашивания зависит от комплекса факторов:

1. Нагрузка: увеличение давления приводит к росту износа, но зависимость не всегда линейна.

2. Скорость скольжения: влияет на температурный режим в зоне трения и характер взаимодействия поверхностей.

3. Свойства материалов пары трения: твердость, вязкость, совместимость материалов. Оптимальным является сочетание высокой твердости одной поверхности с хорошей прирабатываемостью другой.

4. Наличие и свойства смазочного материала: смазка создает разделяю-

щий слой, снижая трение и износ. Для пищевого оборудования применяются специальные смазки, допущенные к контакту с продуктом.

5. Наличие абразивных частиц: является одним из наиболее интенсивных факторов износа в пищевой промышленности.

Классификация видов изнашивания. В машинах и аппаратах пищевых производств наиболее распространены следующие виды изнашивания:

- абразивное изнашивание – механическое изнашивание в результате режущего или царапающего действия твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Является доминирующим для оборудования, перерабатывающего сырье с минеральными примесями (овощи, зерно), например, в дробилках, измельчителях, насосах для перекачки суспензий. Различают двух- и трехкомпонентное абразивное изнашивание, когда частицы действуют между двумя поверхностями или в объеме жидкости.

- гидроабразивное изнашивание – разновидность абразивного изнашивания, при котором воздействие твердых частиц усиливается потоком жидкости. Характерно для проточных частей насосов, смесителей, гидротранспортных систем. Скорость износа пропорциональна концентрации абразива и скорости потока в степени 2.5–3;

- окислительное изнашивание – изнашивание, при котором доминирующее влияние оказывают химические реакции материала с кислородом или окислительной средой. Продукты окисления (оксидные пленки) постоянно образуются и снимаются с поверхности трения. Усиливается в условиях повышенных температур и влажности. Характерно для узлов трения, работающих при высоких температурах (печи, сушилки);

- ударное изнашивание – изнашивание в результате периодического ударного взаимодействия поверхностей. Наблюдается в молотковых дробилках, дезинтеграторах. Сопровождается микровыкрашиванием материала, образованием лунок и вмятин.

Коррозия – разрушение металлов в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. Для пищевого оборудования особенно опасна из-за постоянного контакта с водой, растворами солей, кислот и щелочей (моющие и дезинфицирующие средства). Наиболее распространены равномерная, язвенная и щелевая коррозия. Последняя особенно опасна в зазорах и под прокладками.

Кавитация – разрушение поверхности в результате схлопывания пузырьков газа или пара в жидкости, сопровождающегося микрогидравлическими ударами с высоким локальным давлением. Характерна для рабочих колес насосов, лопаток мешалок, внутренних поверхностей клапанов. Проявляется в виде пористой «губчатой» поверхности.

Влияние условий эксплуатации пищевого оборудования на интенсивность изнашивания. Специфика пищевых производств создает комплекс факторов, резко интенсифицирующих процессы изнашивания:

- наличие абразивных частиц: почва на овощах, минеральные добавки, кристаллы сахара и соли создают условия интенсивного абразивного и гидроабразивного изнашивания;

- агрессивные технологические среды: соки, кислоты, рассолы, щелочные

моющие растворы, которые провоцируют коррозионно-механическое изнашивание (совместное действие коррозии и трения). Коррозия ослабляет поверхностный слой, а трение легко удаляет продукты коррозии, обнажая свежий металл для дальнейшего разрушения;

- влажность и температура: способствуют коррозии и окислению. Циклические изменения температуры (например, при пастеризации и мойке) приводят к термическим напряжениям;

- циклические термические нагрузки: (пастеризаторы, варочные котлы) вызывают термическую усталость материалов, приводящую к образованию сетки трещин («термоудар»);

- жесткие санитарные требования: применение моющих средств с агрессивными веществами (хлорсодержащие растворы, кислоты), что ускоряет коррозию. Конструкция оборудования должна минимизировать застойные зоны, где может скапливаться агрессивная среда;

- биологическое обрастание (био пленки): может вызывать биокоррозию под пленкой из-за создания локальных электрохимических элементов.

Таким образом, в большинстве случаев изнашивание деталей пищевого оборудования имеет смешанный характер (например, абразивно-коррозионный), что необходимо учитывать при выборе материалов и методов защиты машин и аппаратов.

Вопросы для контроля

1. Опишите механизм усталостного разрушения детали. Что такое предел выносливости и кривая Велера?

2. Дайте определения понятиям «изнашивание» и «износ». В чем между ними разница?

3. Перечислите основные виды изнашивания и дайте их краткую характеристику.

4. Какой вид изнашивания является наиболее характерным для насоса, перекачивающего суспензию с частицами плодов? Обоснуйте ответ.

5. Что такое коррозионно-механическое изнашивание и в каких узлах пищевого оборудования оно наиболее вероятно?

6. Объясните природу кавитационного изнашивания. Приведите пример узла машины, подверженного кавитации.

7. Какое влияние на интенсивность изнашивания пары трения «вал-подшипник скольжения» оказывает наличие абразивных частиц в смазочном материале?

8. Почему условия эксплуатации пищевого оборудования считаются особо тяжелыми с точки зрения долговечности?

9. Как частые мойки и дезинфекция оборудования влияют на коррозионное изнашивание?

10. Какие конструктивные и технологические меры можно принять для снижения интенсивности абразивного изнашивания в зоне уплотнения вала мешалки?

Тема 3. Вероятностно-статистические методы оценки надёжности и прогнозирования ресурса

Ключевые вопросы темы

1. Статистический характер показателей надёжности. Основные задачи математической статистики в теории надёжности.
2. Законы распределения случайных величин, используемые в расчётах надёжности.
3. Статистическая обработка данных об отказах оборудования. Построение кривой жизненного цикла.
4. Методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования на основе статистических данных.

Ключевые понятия: случайная величина, закон распределения, математическое ожидание, дисперсия, выборка, статистическая оценка, доверительный интервал, экспоненциальное распределение, нормальное распределение, распределение Вейбулла, кривая жизни (ванна отказов), наработка на отказ, интенсивность отказов, остаточный ресурс.

Литература: [4, с. 10–26].

Методические рекомендации

Статистический характер показателей надёжности. Основные задачи математической статистики в теории надёжности.

Надёжность технологических машин носит принципиально вероятностный (стохастический) характер. Это обусловлено действием множества случайных факторов: технологическим разбросом механических свойств материалов, неидентичностью условий изготовления и сборки, колебаниями режимов эксплуатации, различиями в квалификации обслуживающего персонала и другими случайными воздействиями. Следовательно, такие ключевые показатели, как время безотказной работы (наработка), время восстановления или количество отказов за определенный период, являются случайными величинами. Их конкретные значения для отдельного экземпляра оборудования невозможно предсказать точно, но можно оценить вероятность тех или иных событий, используя методы теории вероятностей и математической статистики.

Этот вероятностный подход является фундаментальным для современной теории надёжности. Он позволяет перейти от единичных наблюдений к обобщенным выводам, справедливым для всей совокупности (парка) однотипных машин, и на этой основе строить обоснованные планы технического обслуживания, ремонтов и формирования запасов запасных частей.

Перечислим ниже основные задачи математической статистики, решаемые в теории надёжности.

Сбор и систематизация статистических данных: планирование и организация сбора достоверной информации о моментах возникновения отказов, их характере, наработке между отказами, времени восстановления для достаточно большой группы однотипных объектов. Качество исходных данных напрямую определяет достоверность всех последующих выводов.

Статистическое оценивание показателей надёжности: определение по экспериментальным (эксплуатационным) данным точечных и интервальных

оценок вероятности безотказной работы $P(t)$, интенсивности отказов $\lambda(t)$, средней наработки на отказ T , коэффициента готовности K_g . Точечная оценка дает single numerical value (например, средняя наработка на отказ по выборке). Интервальная оценка (доверительный интервал) определяет диапазон, в котором с заданной доверительной вероятностью (например, 0.95) находится истинное значение показателя для всей генеральной совокупности.

Проверка статистических гипотез: статистическая проверка предположений о виде закона распределения случайной величины (наработки на отказ), о равенстве показателей надёжности для разных партий оборудования или при разных режимах эксплуатации. Например, проверка гипотезы о том, что наработка до отказа подшипника подчиняется распределению Вейбулла.

Статистическое прогнозирование надёжности и остаточного ресурса: положение построенных статистических моделей (законов распределения) для предсказания поведения оборудования в будущем, оценки вероятности безотказной работы на планируемый период и определения оставшегося ресурса.

Законы распределения случайных величин, используемые в расчётах надёжности. Для аналитического описания наработки до отказа наиболее широко применяются следующие законы распределения, каждый из которых адекватен для определенных физических процессов отказа.

Экспоненциальное распределение. Это наиболее простой и широко используемый закон для сложных восстанавливаемых систем в период нормальной эксплуатации. Его фундаментальная особенность – постоянная интенсивность отказов $\lambda(t) = \text{const}$. Это свойство означает, что вероятность отказа в единицу времени не зависит от того, сколько времени объект уже проработал. Отказы в этом случае носят внезапный, случайный характер, а не связаны с износом или старением. Функция надёжности имеет вид: $P(t) = e^{(-\lambda t)}$. Преимущество модели – простота расчётов. Однако ее применение для механических элементов, долговечность которых ограничена процессами износа и усталости, часто некорректно.

Нормальное распределение (распределение Гаусса). Применяется для описания наработки до отказа объектов, у которых отказ возникает в результате некоторого износа или старения, когда разброс времени отказа относительно среднего значения симметричен. Плотность распределения имеет вид симметричной колоколообразной кривой. Этот закон часто используется для надёжности подшипников качения, электроизоляции, инструмента и других элементов, у которых доминирующей причиной отказа является постепенное накопление повреждений, приводящее к достижению некоторого критического уровня. Область его применения ограничена требованием симметричности распределения, что не всегда выполняется.

Распределение Вейбулла. Является наиболее универсальным, гибким и потому чрезвычайно важным для анализа надёжности механических систем. Его форма и характеристики определяются двумя параметрами: параметром формы β (характеризует тип процесса отказа) и параметром масштаба η (характеризует характерный срок службы). Путем варьирования параметра β можно с высокой точностью аппроксимировать все три периода «кривой жизни»:

$\beta < 1$: соответствует периоду приработки (интенсивность отказов убывает).

$\beta = 1$: соответствует периоду нормальной эксплуатации (интенсивность отказов постоянна, распределение Вейбулла превращается в экспоненциальное).

$\beta > 1$: соответствует периоду старения и износа (интенсивность отказов возрастает).

Это делает распределение Вейбулла незаменимым для анализа усталостной долговечности деталей (валов, шестерен, пружин), износа трущихся пар и других механизмов постепенного отказа.

Выбор адекватного закона распределения является критически важным этапом, определяющим достоверность всех последующих прогнозов. Выбор осуществляется на основе анализа статистических данных с использованием критериев согласия (таких как критерий Колмогорова-Смирнова или хи-квадрат).

Статистическая обработка данных об отказах оборудования. Построение «кривой жизни» машин.

«Кривая жизни» оборудования – это графическое представление зависимости интенсивности отказов $\lambda(t)$ от времени или наработки. Ее классическая форма включает три ярко выраженных периода, что и дало название «ванна отказов» (bathtub curve):

Период приработки (ранние отказы): интенсивность отказов сравнительно высока в начале эксплуатации, но быстро уменьшается. Причины: выявление и отбраковка скрытых дефектов изготовления (микротрещины, раковины), ошибок сборки, дефектов монтажа. Для сокращения этого периода проводятся приработочные испытания.

Период нормальной эксплуатации (внезапные отказы): интенсивность отказов приблизительно постоянна и минимальна. Отказы носят случайный, внезапный характер и не связаны с возрастом объекта (например, обусловлены перегрузками, ошибками оператора, скрытыми дефектами, которые не были выявлены при приработке). Это период нормальной эксплуатации, для которого часто справедлива экспоненциальная модель.

Период износа (износные отказы): интенсивность отказов резко возрастает вследствие процессов старения, износа, усталости материалов, коррозии. Наступает для большинства объектов, которые не были заменены или отремонтированы. Задача технической службы – планировать замену или капитальный ремонт до вступления оборудования в этот период.

Для построения статистической «кривой жизни» необходимо выполнить нижеследующую последовательность действий.

Сбор данных: собрать репрезентативную выборку данных о наработках до отказа (или времени между отказами) для значительного количества однотипных объектов.

Построение вариационного ряда и статистической функции распределения: упорядочить данные по возрастанию и построить статистическую функцию распределения $F^*(t) = i/n$, где i – порядковый номер отказа в ранжированном ряду; n – объем выборки.

Построение гистограммы: визуализировать распределение частот отказов по интервалам наработки.

Подбор теоретического закона распределения: на основе анализа гистограммы и статистической функции подобрать теоретический закон распределения (экспоненциальный, нормальный, Вейбулла), наилучшим образом описывающий статистические данные. Для подбора параметров распределения используются методы (наибольшего правдоподобия, наименьших квадратов), а для проверки адекватности – критерии согласия.

Построение кривой интенсивности отказов: на основе подобранной теоретической модели строится гладкая кривая $\lambda(t)$.

Анализ «кривой жизни» позволяет обоснованно определять продолжительность приработочных испытаний, оптимальные межремонтные периоды и сроки проведения профилактических работ, направленных на предотвращение износных отказов.

Методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования на основе статистических данных.

Остаточный ресурс – это наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. Статистические методы прогнозирования основаны на экстраполяции накопленных данных о надёжности парка однотипных машин. Основные подходы следующие.

Параметрический метод. Этот метод применяется, когда для данного типа объектов известен или статистически подобран закон распределения наработки до отказа $F(t)$ с параметрами θ . Если объект проработал безотказно время t , то условная вероятность его безотказной работы на интервале $(t, t+\tau)$ при условии, что он проработал время t , рассчитывается по формуле: $P(\tau | t) = R(t+\tau) / R(t)$, где $R(t) = 1 - F(t)$ – функция надёжности. Эта формула позволяет оценить вероятность его работоспособности на предстоящий интервал времени τ . Если известна зависимость параметров распределения θ от условий эксплуатации (нагрузки, скорости, температуры), прогноз можно уточнить.

Непараметрические методы. Эти методы применяются, когда вид закона распределения неизвестен, трудно поддается определению или объем выборки мал. Прогноз основывается непосредственно на статистике отказов аналогичных объектов. Например, если из N однотипных насосов $n(t)$ штук отказали к наработке t , то статистическая оценка вероятности безотказной работы к этому моменту равна $P^*(t) = (N - n(t)) / N$. Аналогично можно оценить вероятность безотказной работы на интервал $(t, t+\Delta t)$. Достоинство метода – простота и отсутствие предположений о виде закона распределения. Недостаток – меньшая точность и невозможность экстраполяции за пределы наблюдений.

Прогнозирование ресурса на основе статистических данных является основой для перехода от регламентированного планово-предупредительного ремонта (ППР) к более прогрессивной и экономически эффективной стратегии – техническому обслуживанию и ремонту по фактическому состоянию (ТОФС). Это позволяет избежать преждевременных замен еще исправных деталей и в то же время предотвратить отказы в период износа.

Вопросы для контроля

1. Почему показатели надёжности считаются случайными величинами?
2. В чем состоит основное отличие экспоненциального закона распределения от нормального и распределения Вейбулла?
3. Для описания какого периода «кривой жизни» наиболее подходит распределение Вейбулла с параметром формы $\beta > 3$?
4. Какова цель построения статистической «кривой жизни» для парка оборудования?
5. Опишите физический смысл параметров формы (β) и масштаба (η) в распределении Вейбулла.
6. Что такое доверительный интервал оценки показателя надёжности и от чего зависит его ширина?
7. Как по статистическим данным об отказах однотипных объектов оценить вероятность безотказной работы нового объекта за заданное время?
8. В чем заключается суть параметрического метода прогнозирования остаточного ресурса?
9. Каковы преимущества и ограничения статистических методов прогнозирования ресурса?

Тема 4. Расчётные методы оценки и прогнозирования долговечности деталей и сборочных единиц

Ключевые вопросы темы

1. Основные критерии работоспособности и виды расчётов на долговечность.
2. Расчёт деталей на усталостную прочность при циклических нагрузках.
3. Расчёт деталей на износостойкость. Прогнозирование износа.
4. Комплексный подход к оценке долговечности машины с учетом доминирующего механизма отказа.

Ключевые понятия: запас прочности, усталостная прочность, предел выносливости, коэффициент запаса, контактная прочность, контактные напряжения, износ, износостойкость, критерий долговечности, расчётный ресурс, доминирующий механизм отказа.

Литература: [5, с. 18–27].

Методические рекомендации

Основные критерии работоспособности и виды расчётов на долговечность. Обеспечение долговечности деталей машин является комплексной задачей, требующей учета различных физических процессов, приводящих к потере работоспособности. Долговечность характеризуется способностью детали сохранять свои эксплуатационные качества в пределах установленных норм в течение заданного срока службы при определенных условиях эксплуатации. Все расчёты на долговечность базируются на критериях работоспособности – условиях, при которых деталь может нормально функционировать в течение требуемого времени.

Основные виды расчётов на долговечность включают следующие.

Расчёт на статическую прочность: направлен на предотвращение пластических деформаций или хрупкого разрушения при действии пиковых, однократно приложенных нагрузок (например, при пуске машины, заклинивании, технологических перегрузках). Расчёт ведется по максимальным нагрузкам с использованием коэффициента запаса прочности относительно предела текучести σ_T или предела прочности σ_B . Особое значение имеет для деталей, работающих в аварийных режимах или испытывающих ударные нагрузки.

Расчёт на усталостную прочность (выносливость): является основным для большинства деталей машин, испытывающих циклически изменяющиеся во времени нагрузки. Усталостное разрушение происходит при напряжениях, значительно меньших предела прочности материала, вследствие постепенного накопления повреждений. Расчёт выполняется с учетом асимметрии цикла нагружения, концентраторов напряжений, состояния поверхности и масштабного эффекта.

Расчёт на контактную прочность: обеспечивает стойкость рабочих поверхностей деталей, контактирующих при качении или качении с трением, к контактной усталости. Проявляется в виде выкрашивания материала (питтинга) на рабочих поверхностях зубьев зубчатых колес, дорожках качения подшипников, кулачках. Расчёт основан на теории Герца и учитывает кривизну контактирующих поверхностей, механические характеристики материалов и условия смазки.

Расчёт на жесткость: направлен на ограничение деформаций детали под нагрузкой. Чрезмерные деформации могут нарушить нормальную работу механизма (например, прогиб вала приводит к деформациям подшипников, повышенному износу и вибрациям). Особенно важен для точных механизмов и деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок.

Расчёт на износостойкость: обеспечивает ограничение износа трущихся поверхностей в течение заданного срока службы. В отличие от прочностных расчётов, носящих детерминированный характер, расчёт на износ имеет вероятностную природу вследствие сложности точного описания процесса изнашивания. Используются критерии давления $[p]$ и произведения давления на скорость скольжения $[pv]$.

Расчёт на теплостойкость: особенно актуален для высокоскоростных передач, тормозных устройств, деталей, работающих в условиях высоких температур. Перегрев может привести к изменению структуры материала, потере прочности, ухудшению условий смазки.

Выбор доминирующего вида расчёта определяется условиями работы детали и механизмом ее потенциального отказа. Для одной и той же детали могут выполняться несколько видов расчётов.

Расчёт на усталостную прочность является наиболее сложным и важным для машиностроения. Он базируется на следующих основных положениях:

Предел выносливости материала σ_{-1} определяется экспериментально для симметричного цикла нагружения (коэффициент асимметрии $R = -1$). Характеризует сопротивление материала усталостному разрушению при большом числе циклов нагружения (обычно 10^6 – 10^7 циклов).

Влияние концентраторов напряжений: любые изменения формы детали (галтели, шпоночные канавки, отверстия, резьба) создают местное увеличение напряжений. Учет осуществляется с помощью эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ , который показывает, во сколько раз предел выносливости детали с концентратором меньше предела выносливости гладкого образца.

Влияние состояния поверхности: шероховатость поверхности создает микроконцентраторы напряжений. Коэффициент качества поверхности K_F учитывает это влияние ($K_F < 1$ для шероховатых поверхностей, $K_F > 1$ для упрочненных).

Масштабный фактор: с увеличением размеров детали вероятность наличия дефектов материала возрастает, что приводит к снижению предела выносливости. Учитывается коэффициентом $K_d < 1$.

Влияние асимметрии цикла: реальные циклы нагружения часто являются асимметричными (отнулевыми, пульсирующими). Влияние среднего напряжения цикла σ_m учитывается с помощью коэффициента чувствительности к асимметрии цикла ψ_σ .

Расчётный запас прочности n определяется по формуле (для нормальных напряжений):

$$n = \sigma_{-1} / (K_\sigma * \sigma_a / (K_F * K_d) + \psi_\sigma * \sigma_m),$$

где σ_a – амплитуда цикла напряжений.

Для сложного напряженного состояния (совместное действие изгиба и кручения) расчёт ведется по энергетической теории прочности, определяя эквивалентные напряжения.

Условие прочности: $n \geq [n]$, где $[n]$ – нормативный (допускаемый) запас прочности, выбираемый в зависимости от ответственности детали, точности определения нагрузок, однородности материала ($[n] = 1.3 - 3.0$).

Расчёты на износостойкость имеют особое значение для машин пищевых производств вследствие наличия абразивных частиц и агрессивных сред. Основные методы:

Расчёт по удельному давлению. Основан на ограничении контактных давлений в трущейся паре величиной, при которой не происходит интенсивного изнашивания:

$$p = F / A \leq [p],$$

где F – нормальная нагрузка в контакте; A – номинальная площадь контакта; $[p]$ – допускаемое давление, зависящее от материалов пары трения, условий смазки и характера движения.

Расчёт по критерию $p \cdot v$: учитывает тепловой режим узла трения, так как работа трения преобразуется в тепло. Превышение допустимого значения $[p \cdot v]$ приводит к перегреву, снижению вязкости смазки и резкому увеличению износа:

$$p * v \leq [p \cdot v],$$

где v – скорость скольжения. Значения $[p \cdot v]$ устанавливаются экспериментально для конкретных пар трения.

Расчёт на заданный ресурс: для ответственных узлов выполняется прогнозирование износа на заданный срок службы. Используются эмпирические зависимости, например, линейная модель изнашивания:

$$U = I_n * p * v * t,$$

где U – линейный износ; I_n – интенсивность изнашивания (характеризует износостойкость пары материалов); t – время работы.

Для точного прогнозирования износа необходимо учитывать режим трения (граничный, жидкостный), свойства смазочного материала, наличие абразивных частиц, температурный режим.

Долговечность машины определяется долговечностью ее наиболее слабых элементов. Комплексный подход включает последовательное решение перечисленных ниже задач.

Структурный анализ машины: выделение составных частей (узлов, деталей) и установление функциональных связей между ними. Составление перечня критичных элементов, отказ которых приводит к потере работоспособности всей машины или значительному снижению производительности.

Анализ условий работы и механизмов отказа: для каждого критичного элемента определяются действующие нагрузки (статические, динамические, циклические), температурные условия, характер взаимодействия с окружающей средой и продуктом. На основе этого анализа устанавливается доминирующий механизм отказа (усталость, износ, коррозия, ползучесть).

Выбор расчётной модели и критерия долговечности: в зависимости от доминирующего механизма отказа выбирается соответствующий вид расчёта (на усталость, износ и т. д.) и определяются расчётные критерии (запас прочности, допустимый износ, ресурс в часах или циклах).

Определение расчётного ресурса элементов и машины в целом: ресурс каждого критичного элемента рассчитывается по выбранной модели. Общий ресурс машины принимается равным минимальному из полученных значений. При этом учитывается возможность замены или восстановления отдельных элементов в течение жизненного цикла машины.

Вероятностная оценка долговечности: учет статистического разброса нагрузок, свойств материалов и условий эксплуатации. Использование методов надёжности для оценки вероятности безотказной работы в течение заданного срока службы.

Такой подход позволяет не только оценить долговечность проектируемой машины, но и выявить «слабые места» конструкции, наметить пути ее совершенствования, обоснованно назначить межремонтные сроки и регламенты технического обслуживания.

Вопросы для контроля

1. В чем состоит различие между расчётами на статическую прочность и на усталостную прочность?
2. Какие факторы учитываются в расчёте на усталостную прочность с помощью коэффициентов K_σ , K_F и K_d ?
3. Как определяется запас усталостной прочности при наличии концентратора напряжений?

4. Для каких деталей машин расчёт на контактную прочность является основным?
5. В чем физический смысл критерия p_v и для каких узлов трения он применяется?
6. Какими способами можно повысить усталостную прочность вала с галтелью?
7. Какой механизм отказа будет доминирующим для зубьев закрытой зубчатой передачи и почему?
8. Какой механизм отказа будет доминирующим для подшипника скольжения и почему?
9. Почему расчётный ресурс машины определяется ресурсом наиболее слабого элемента?
10. Как можно повысить износостойкость пары трения «вал-втулка» в насосе для перекачки абразивной суспензии?

Тема 5. Обеспечение и повышение долговечности на этапах проектирования и изготовления

Ключевые вопросы темы

1. Системный подход к обеспечению надёжности на стадии проектирования.
2. Конструктивные методы повышения надёжности и долговечности.
3. Влияние технологических процессов изготовления на эксплуатационные свойства деталей.
4. Методы сборки и контроля качества как факторы обеспечения надёжности.

Ключевые понятия: резервирование, конструктивная преемственность, унификация, стандартизация, технологичность конструкции, усталостная прочность, поверхностное упрочнение, термическая обработка, качество точности, приработочные испытания.

Литература: [2, с. 38–60].

Методические рекомендации

Обеспечение надёжности и долговечности технологических машин должно закладываться на самых ранних этапах создания изделия – при проектировании. Многочисленные исследования показывают, что до 80 % будущей надёжности изделия определяется решениями, принятыми на стадии проектирования. Последующие этапы изготовления и эксплуатации могут лишь реализовать (или не реализовать) заложенный потенциал, но кардинально повысить его крайне сложно и экономически нецелесообразно.

Системный подход к обеспечению надёжности на стадии проектирования включает последовательную реализацию перечисленных ниже мероприятий.

Выбор и обоснование показателей надёжности: на основе глубокого анализа условий эксплуатации и технического задания устанавливаются целевые значения вероятности безотказной работы, ресурса, срока службы для машины в целом и ее основных узлов. Для пищевого оборудования особое внимание уделяется показателям, связанным с безопасностью продукции и соблюдением

санитарно-гигиенических норм. Показатели должны быть конкретными, измеримыми и достижимыми.

Разработка структурной схемы надёжности: машина представляется как система последовательно, параллельно или комбинированно соединённых элементов. Это позволяет количественно оценить вклад надёжности каждого элемента в надёжность системы и выявить наиболее критичные компоненты. Для критичных элементов применяются методы резервирования (структурного, временного, функционального). Например, установка резервного насоса в системе циркуляции позволяет значительно повысить надёжность всей системы.

Распределение показателей надёжности по элементам конструкции: общие требования к надёжности машины распределяются между ее узлами и деталями с учетом их функциональной значимости, сложности и стоимости. Это создает основу для целевого проектирования каждого элемента. Распределение должно быть оптимальным – не следует предъявлять завышенные требования к надёжности второстепенных элементов, что приведет к неоправданному удорожанию конструкции.

Прогноз надёжности: выполняется на основе расчётных методов и данных о надёжности аналогичных элементов с учетом планируемых условий эксплуатации. Используются вероятностные методы оценки надёжности сложных систем, включая метод статистических испытаний (Монте-Карло). Прогноз позволяет оценить достижимость заданных показателей и при необходимости скорректировать конструктивные решения на ранней стадии.

Анализ видов и последствий отказов (так называемый FMEA – Failure Mode and Effects Analysis): это систематическая процедура, направленная на выявление потенциальных отказов, их причин и последствий на этапе проектирования. Для каждого потенциального отказа оценивается его критичность (путем расчёта показателя приоритета риска – RPN) и разрабатываются профилактические меры для его исключения или снижения вероятности возникновения. FMEA-анализ особенно важен для пищевого оборудования, где отказы могут привести к порче продукции или нарушению санитарных норм.

Обеспечение ремонтпригодности: конструкция должна предусматривать возможность быстрого и качественного проведения технического обслуживания и ремонтов. Это включает легкий доступ к узлам замены, применение унифицированных крепежных элементов, модульность конструкции.

Конструктивные методы повышения надёжности и долговечности направлены на создание такой формы и конфигурации деталей, которые обеспечивают минимальные напряжения, равномерное распределение нагрузки и стойкость к внешним воздействиям. Особое значение для пищевого оборудования имеют:

- Снижение концентрации напряжений: концентраторы напряжений (резкие изменения сечения, отверстия, канавки) являются основными очагами зарождения усталостных трещин. Применение плавных переходов (галтелей) с оптимальным радиусом, устранение отверстий в зонах высоких напряжений, совмещение литейной усадочной раковины с зоной низких напряжений позволяют значительно повысить усталостную прочность.

– Повышение усталостной прочности: оптимизация формы деталей для снижения амплитуд циклических напряжений, создание остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое (например, с помощью обкатки роликами или дробеструйной обработки), защита поверхностей от коррозии и механических повреждений. Для валов и осей важно обеспечить соосность посадочных мест для подшипников, чтобы избежать дополнительных изгибающих моментов.

– Оптимизация условий трения и износа: правильный выбор пар трения с учетом их совместимости и износостойкости, обеспечение благоприятного режима смазки (формирование жидкостного трения), защита трущихся поверхностей от абразивных частиц с помощью уплотнений и фильтров. Конструкция должна обеспечивать эффективное подведение смазочного материала к зоне трения и отвод тепла.

– Защита от коррозии: выбор коррозионностойких материалов (нержавеющие стали, цветные сплавы, полимеры), нанесение защитных покрытий (цинкование, хромирование, напыление), конструктивные меры по устранению застойных зон и щелей, где может скапливаться влага и агрессивные среды. Для пищевого оборудования необходимо применять материалы, разрешенные для контакта с пищевыми продуктами.

– Унификация и стандартизация: применение стандартных узлов и деталей (подшипников, уплотнений, крепежа) повышает надёжность за счет использования отработанных конструкций и упрощает техническое обслуживание и ремонт. Это также снижает стоимость изготовления и сокращает сроки проектирования.

Конструктивная преемственность – это использование проверенных временем конструктивных решений и узлов позволяет снизить риск появления непредвиденных отказов. Однако это не исключает необходимости внедрения новых, более совершенных решений.

Качество изготовления непосредственно влияет на реализацию заложенных в проекте показателей надёжности. Технологические методы позволяют целенаправленно формировать свойства материала в поверхностном слое, где чаще всего зарождаются усталостные трещины и происходит износ. Для пищевого оборудования критически важны нижеперечисленные методы обработки.

Термическая и химико-термическая обработка: закалка и отпуск для повышения твердости и прочности; цементация, азотирование, нитроцементация для получения твердого износостойкого поверхностного слоя при вязкой сердцевине. Эти методы значительно повышают сопротивление усталости и износу. Важно строго соблюдать технологические режимы обработки для получения заданной структуры и свойств материала.

Поверхностное пластическое деформирование (ППД): дробеструйная обработка, обкатка роликами, шариками или роликами создают в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, которые препятствуют зарождению и развитию усталостных трещин. Эффективна для валов, зубьев шестерен, пружин. ППД также упрочняет поверхностный слой и снижает шероховатость.

Нанесение упрочняющих и износостойких покрытий: гальванические покрытия (хром, никель), газотермическое напыление (металлы, керамика), наплавка твердыми сплавами, нанесение тонких твердых покрытий (PVD,

CVD – нитрид титана, алмазоподобные углеродные покрытия) для повышения износостойкости и противозадирных свойств. Для пищевого оборудования покрытия должны быть инертными и нетоксичными.

Обеспечение точности изготовления: высокий квалитет точности (малые допуски) и низкая шероховатость поверхности снижают динамические нагрузки, вибрацию, обеспечивают оптимальные условия для образования масляного клина в подшипниках скольжения, уменьшают концентрацию напряжений. Особенно важна точность изготовления для зубчатых передач и подшипниковых узлов.

Контроль качества на всех этапах изготовления: входной контроль материалов, операционный контроль параметров на каждой технологической операции, приемочный контроль готовых деталей. Применение современных методов неразрушающего контроля (дефектоскопия, ультразвуковой контроль) позволяет выявить внутренние дефекты.

Качественная сборка и контроль на всех этапах производства являются завершающим звеном в цепи обеспечения надёжности. Для пищевого оборудования особое значение имеют следующие мероприятия.

Соблюдение технологических процессов сборки: правильная последовательность операций, применение динамометрических ключей для обеспечения заданных усилий затяжки резьбовых соединений, точная регулировка зазоров в подшипниковых узлах и передачах. Несоблюдение момента затяжки может привести к поломке крепежа или недостаточному уплотнению.

Балансировка вращающихся деталей: динамическая и статическая балансировка роторов, валов, шкивов для устранения вибраций, которые вызывают усталостные разрушения и ускоренный износ. Дисбаланс является одной из основных причин вибрации и шума в машинах.

Обкатка и приработочные испытания: проведение контролируемой обкатки собранной машины на холостом ходу и под нагрузкой для приработки трущихся поверхностей, выявления и устранения скрытых дефектов сборки. Это позволяет «выйти» на период нормальной эксплуатации с минимальным количеством ранних отказов. Для пищевого оборудования обкатка проводится с соблюдением всех санитарных требований.

Входной контроль материалов и комплектующих: проверка сертификатов, химического состава, механических свойств поступающих материалов и готовых изделий (подшипников, уплотнений). Некачественные комплектующие могут свести на нет все усилия по обеспечению надёжности.

Операционный контроль: контроль геометрических параметров, качества поверхности на всех технологических операциях. Своевременное выявление отклонений позволяет скорректировать технологический процесс и предотвратить брак.

Приемочный контроль и испытания: проведение приемо-сдаточных испытаний готовой машины на соответствие паспортным характеристикам, включая испытания на надёжность (например, наработка на отказ). Испытания должны проводиться в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным.

Система менеджмента качества: внедрение и сертификация системы менеджмента качества (например, по ISO 9001) позволяет обеспечить стабильное качество изготовления и повысить надёжность продукции.

Таким образом, только комплексный подход, объединяющий грамотное проектирование, передовые технологии изготовления, качественную сборку и строгий контроль на всех этапах, позволяет создать технологическую машину с высокими показателями надёжности и долговечности, отвечающую требованиям современных пищевых производств.

Вопросы для контроля

1. Какие этапы включает системный подход к обеспечению надёжности на стадии проектирования?
2. В чем заключается суть метода FMEA и какие цели он преследует при проектировании машины?
3. Какие конструктивные меры позволяют снизить концентрацию напряжений в деталях машин?
4. Почему унификация и стандартизация узлов считаются эффективными методами повышения надёжности?
5. Как термическая обработка влияет на усталостную прочность деталей?
6. Какие технологические процессы позволяют создать благоприятные остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое?
7. Почему для пищевого оборудования особенно важна чистота обработки поверхности?
8. Какие последствия может иметь несоблюдение момента затяжки резьбовых соединений при сборке?
9. Почему балансировка вращающихся деталей является обязательной операцией при сборке?
10. Как система входного контроля материалов влияет на стабильность показателей надёжности?
11. Какие виды контроля качества должны проводиться на разных этапах изготовления ответственной детали?
12. Как взаимосвязаны конструктивные и технологические методы обеспечения надёжности на примере вала редуктора?

Тема 6. Методы испытаний на долговечность и оценка остаточного ресурса в процессе эксплуатации

Ключевые вопросы темы

1. Классификация и цели испытаний на надёжность.
2. Методы ускоренных испытаний и их эффективность.
3. Современные методы технической диагностики оборудования.
4. Методы прогнозирования остаточного ресурса на основе диагностических данных.

Ключевые понятия: определяющие испытания, ресурсные испытания, приемочные испытания, ускоренные испытания, техническая диагностика, неразрушающий контроль, вибродиагностика, термография, остаточный ресурс,

диагностический параметр, предельное значение параметра.

Литература: [3, с. 10–34].

Методические рекомендации

Классификация и цели испытаний на надёжность. Испытания на надёжность являются важнейшим этапом оценки качества и работоспособности оборудования. Они позволяют получить объективные данные о фактических показателях надёжности и выявить потенциальные слабые места конструкции. По целям проведения испытания разделяются на:

– Определяющие испытания – проводятся для количественной оценки показателей надёжности. Включают: испытания на безотказность (оценка вероятности безотказной работы, средней наработки на отказ); испытания на долговечность (определение ресурса и срока службы); испытания на ремонтпригодность (оценка времени восстановления); испытания на сохраняемость (для оборудования, подвергающегося длительному хранению).

– Ресурсные испытания – проводятся для установления фактического ресурса оборудования до предельного состояния. Особенно важны для ответственных узлов пищевого оборудования (например, рабочих органов измельчителей, уплотнений насосов), где выход из строя может привести к порче продукции и нарушению санитарных норм.

– Приемочные испытания – проводятся для подтверждения соответствия показателей надёжности установленным требованиям. Являются обязательным этапом при сдаче-приемке новой техники. Включают: предварительные испытания (на опытных образцах); приемо-сдаточные испытания (на серийных образцах); квалификационные испытания (при освоении нового производства); эксплуатационные испытания – проводятся в реальных условиях эксплуатации для получения наиболее достоверных данных о надёжности. Требуют длительного времени, но дают ценную информацию о поведении оборудования в рабочих условиях.

Методы ускоренных испытаний и их эффективность. Ускоренные испытания позволяют сократить время и стоимость исследований за счет интенсификации процессов старения и изнашивания. Основные методы:

1) Повышение нагрузочных режимов – увеличение рабочих нагрузок, скоростей, давлений сверх номинальных значений. Например, испытания насосов при повышенном давлении позволяют быстро выявить слабые места конструкции.

2) Температурное ускорение – использование повышенных температур для интенсификации процессов старения материалов, коррозии, деградации смазочных материалов. Основано на принципе Аррениуса.

3) Циклические воздействия – увеличение частоты циклов нагружения для ускоренного накопления усталостных повреждений.

4) Комбинированные методы – одновременное воздействие нескольких ускоряющих факторов (например, повышенная нагрузка + агрессивная среда).

Эффективность ускоренных испытаний оценивается коэффициентом ускорения – отношением времени испытаний в нормальных условиях к времени ускоренных испытаний. Важным условием является сохранение физической сущности процессов разрушения.

Современные методы технической диагностики оборудования. Техническая диагностика позволяет оценить текущее состояние оборудования без его разборки. Перечислим основные методы.

Вибродиагностика – анализ вибрационных характеристик для оценки состояния подшипников, зубчатых передач, балансировки роторов. Измеряются: смещение (для низкочастотных колебаний); скорость (основной параметр для машин общего назначения); ускорение (для высокочастотных компонентов).

Термография – контроль температурных полей для выявления перегрева узлов трения, нарушения теплообмена, дефектов электрооборудования. Особенно эффективна для контроля: подшипниковых узлов; электрических соединений; теплообменных аппаратов.

Акустическая эмиссия – регистрация упругих волн при деформационных процессах. Позволяет обнаруживать: развитие трещин; утечки в герметичных системах; кавитационные процессы.

Ультразвуковой контроль – обнаружение внутренних дефектов материала (трещин, раковин, расслоений). Применяется для контроля сварных швов; оценки толщины стенок аппаратов; выявления коррозии под изоляцией.

Методы прогнозирования остаточного ресурса на основе диагностических данных. Прогнозирование остаточного ресурса включает несколько перечисленных ниже этапов.

Выбор диагностических параметров – отбираются параметры, наиболее полно характеризующие износ и разрушение узлов оборудования. Для разных типов оборудования это могут быть: уровень вибрации; температура узлов; изменение зазоров; характеристики рабочей среды.

Определение предельных значений параметров – устанавливаются критические значения диагностических параметров, при достижении которых дальнейшая эксплуатация недопустима. Определяются на основе: нормативной документации; статистических данных; экспериментальных исследований.

Построение трендов изменения параметров – на основе периодических измерений строится график изменения диагностических параметров во времени. Используются следующие методы: линейная аппроксимация; экспоненциальное сглаживание; регрессионный анализ.

Экстраполяция трендов – продолжение установленной тенденции до пересечения с линией предельного значения. Дает оценку остаточного ресурса.

Организация и планирование испытаний. При организации испытаний на надёжность необходимо учитывать:

- требования нормативных документов (ГОСТы, отраслевые стандарты);
- особенности технологических процессов пищевых производств;
- необходимость имитации реальных условий эксплуатации;
- требования к точности измерительного оборудования;
- статистическую значимость выборки испытываемых образцов.

Обработка и анализ результатов испытаний. Для достоверной обработки результатов необходимо:

- применение методов математической статистики;
- построение доверительных интервалов для показателей надёжности;
- проверка гипотез о соответствии распределений;

- анализ кривых «жизни» оборудования;
- сравнение с аналогичными изделиями-конкурентами.

Особенности диагностики пищевого оборудования. При диагностике оборудования пищевых производств учитывают:

- требования гигиены и санитарии;
- стойкость к агрессивным средам;
- особенности работы с абразивными материалами;
- влияние частых моек и дезинфекции;
- повышенные требования к чистоте поверхностей.

Вопросы для контроля

1. В чем отличие определяющих испытаний от приемочных?
2. Какие факторы учитываются при планировании ускоренных испытаний?
3. Как выбираются диагностические параметры для оценки состояния оборудования?
4. В чем преимущества вибродиагностики перед другими методами контроля?
5. Как термография может помочь в оценке состояния подшипниковых узлов?
6. Какие параметры вибрации наиболее информативны для диагностики зубчатых передач?
7. Как определяется предельное значение диагностического параметра?
8. В чем сложность прогнозирования остаточного ресурса для сложных технических систем?
9. Как часто следует проводить диагностические измерения для построения достоверных трендов?
10. Какие меры безопасности необходимо соблюдать при проведении диагностических работ?

Тема 7. Системы технической эксплуатации, направленные на реализацию и продление ресурса оборудования

Ключевые вопросы темы

1. Эволюция и современные концепции управления техническим обслуживанием и ремонтом (ТОиР).
2. Организационно-технологические принципы построения систем ТОиР на предприятии.
3. Технологии восстановления и модернизации изношенного оборудования.
4. Информационные системы и критерии эффективности управления ТОиР.

Ключевые понятия: техническая эксплуатация, стратегия обслуживания, планово-предупредительный ремонт, техническое обслуживание по фактическому состоянию, ремонтный цикл, система управления техническим обслуживанием, коэффициент технического использования.

Литература: [6, с. 16–34].

Методические рекомендации

Эволюция стратегий технического обслуживания и ремонта представляет собой сложный процесс, отражающий общее развитие промышленного производства. Исторически первой и наиболее простой формой организации ремонтов была система, основанная на принципе «ремонтировать после отказа». Такой подход, известный как реактивное обслуживание, долгое время доминировал в промышленности вплоть до середины XX века. Его основной недостаток заключался в непредсказуемости простоев оборудования и высоких затратах на экстренные ремонты, которые часто выполнялись в условиях дефицита времени и ресурсов. Кроме того, внезапные отказы сложного технологического оборудования могли приводить к значительным потерям качества продукции и создавать опасные ситуации для персонала.

Переход к системе планово-предупредительного ремонта (ППР) стал важным этапом в развитии теории технической эксплуатации. Эта система основана на принципе предупреждения отказов путем выполнения регламентных работ через определенные промежутки времени или после достижения заданной наработки. Теоретической основой ППР стала классическая «кривая жизни оборудования» (кривая Вейбулла), которая демонстрирует зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации. Система ППР предусматривает строгую регламентацию всех видов технического обслуживания и ремонтов, формирование ремонтных циклов и их структур, а также нормирование трудозатрат и материалов. Несмотря на свою прогрессивность для своего времени, система ППР имеет существенный недостаток – она не учитывает фактическое техническое состояние оборудования, что может приводить к преждевременным заменам деталей, еще не выработавших свой ресурс, или, наоборот, к отказам до наступления планового ремонта.

Современный этап развития систем ТОиР характеризуется переходом к обслуживанию по фактическому состоянию, которое также называют предиктивным или прогнозным обслуживанием. Эта стратегия стала возможной благодаря развитию методов и средств технической диагностики, позволяющих контролировать параметры, характеризующие состояние оборудования, в режиме реального времени. Основное преимущество этого подхода заключается в возможности точного планирования ремонтных работ именно тогда, когда это действительно необходимо, что позволяет максимально эффективно использовать ресурс оборудования и минимизировать простои. Для пищевого оборудования, где внеплановые остановки могут приводить к потере значительных объемов продукции и нарушению санитарных норм, такой подход имеет особое значение.

Наиболее совершенной методологией в области управления техническим обслуживанием сегодня считается так называемое RCM (Reliability Centered Maintenance) – обслуживание, ориентированное на надёжность. Этот систематический подход предполагает глубокий анализ функций каждой единицы оборудования, идентификацию всех возможных функциональных отказов, оценку последствий каждого отказа и выбор наиболее целесообразного метода его предупреждения. RCM рассматривает техническое обслуживание не как

самоцель, а как средство обеспечения надежного выполнения оборудованием своих функций с минимальными затратами на протяжении всего жизненного цикла. В пищевой промышленности, где требования к безопасности продукции и соблюдению санитарных норм особенно высоки, RCM позволяет разрабатывать оптимальные стратегии обслуживания, учитывающие все специфические риски.

Организация системы технического обслуживания и ремонта на современном пищевом предприятии требует учета множества факторов, связанных со спецификой производства. Технологическое оборудование пищевых производств работает в условиях воздействия агрессивных сред, частых моек и дезинфекции, циклических температурных нагрузок, что предъявляет особые требования к организации его обслуживания. Все ремонтные работы должны проводиться с строгим соблюдением санитарно-гигиенических требований, а используемые материалы и покрытия должны быть разрешены для контакта с пищевой продукцией. Важным аспектом является разработка и соблюдение процедур мойки и дезинфекции оборудования после выполнения ремонтных работ.

Структура системы ТОиР чаще всего включает несколько взаимосвязанных уровней. Ежедневное техническое обслуживание (ЕТО) выполняется оперативным персоналом и включает визуальный контроль, очистку, смазку и проверку работоспособности оборудования. Периодическое техническое обслуживание (ТО1, ТО2) проводится по графику специалистами ремонтной службы и предусматривает более глубокий контроль, регулировку и замену изношенных деталей. Сезонное обслуживание приурочивается к периодам плановых остановок производства и включает комплекс работ по подготовке оборудования к работе в новых условиях (например, к летнему или зимнему периоду). Система ремонтов включает текущий, средний и капитальный ремонты, различающиеся объемом и сложностью работ. Планирование всех видов работ осуществляется на основе ремонтных циклов, продолжительность которых определяется конструктивными особенностями оборудования, условиями и интенсивностью его эксплуатации.

Технологии восстановления изношенного оборудования постоянно развиваются, предлагая все более эффективные решения для продления ресурса деталей и узлов. Выбор конкретного метода восстановления зависит от материала детали, характера и степени износа, требуемой точности восстановления и экономической целесообразности. Традиционные слесарно-механические методы, такие как шабровка, притирка или ремонт под ремонтный размер, остаются актуальными для многих типов оборудования, однако они постепенно дополняются или заменяются более современными технологиями.

Сварочно-наплавочные технологии широко применяются для восстановления геометрии деталей, подверженных износу. Современные автоматизированные комплексы позволяют выполнять наплавку с высокой точностью и минимальными термическими деформациями, что особенно важно для ответственных деталей. Для пищевого оборудования большое значение имеет правильный выбор наплавочных материалов, которые должны быть коррозионно-стойкими и нетоксичными. Газотермическое и плазменное напыление позво-

ляют наносить тонкие износостойкие покрытия с особыми свойствами, такими как низкий коэффициент трения, высокая твердость или термическая стойкость. Эти методы особенно эффективны для восстановления деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Электрохимические методы, такие как хромирование, железнение или нанесение композитных покрытий, обеспечивают высокую точность восстановления размеров и позволяют получать поверхности с заданными свойствами. Для оборудования пищевых производств особое значение имеет применение покрытий на основе никеля или хрома, которые обладают высокой коррозионной стойкостью и соответствуют требованиям пищевой безопасности. Перспективными направлениями являются лазерная наплавка, холодное напыление и использование наноструктурированных покрытий, которые позволяют существенно повысить износостойкость и коррозионную стойкость восстанавливаемых деталей.

Управление современной системой ТОиР невозможно без применения специализированных информационных систем – CMMS (Computerized Maintenance Management System). Эти системы обеспечивают комплексное решение задач учета, планирования, контроля и анализа всех аспектов технического обслуживания и ремонта. Современная CMMS включает модули для управления парком оборудования, ведения истории ремонтов, планирования работ, управления запасными частями и материалами, а также анализа показателей надёжности. Интеграция CMMS с системами АСУТП позволяет использовать данные о режимах работы оборудования для оптимизации графиков технического обслуживания.

Ключевыми показателями эффективности системы ТОиР являются коэффициент технического использования, который отражает готовность оборудования к работе, и общая эффективность оборудования, учитывающая доступность, производительность и качество выпускаемой продукции. Анализ этих показателей в динамике позволяет выявлять «узкие места» в организации технической эксплуатации и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности использования оборудования. Для пищевых производств особое значение имеют показатели, связанные с соблюдением санитарных норм и качеством продукции, которые могут существенно страдать при ненадлежащем техническом состоянии оборудования.

Важным аспектом управления ТОиР является экономическое обоснование принимаемых решений. Выбор между ремонтом и заменой оборудования, определение оптимальной периодичности обслуживания, оценка эффективности внедрения новых технологий – все эти задачи требуют проведения тщательного экономического анализа. Использование методов оценки жизненного цикла оборудования позволяет принимать обоснованные решения, учитывающие не только первоначальные затраты, но и расходы на эксплуатацию, техническое обслуживание и утилизацию.

Вопросы для контроля

1. Опишите эволюцию стратегий технического обслуживания от реактивных к проактивным.

2. В чем заключаются основные преимущества обслуживания по состоянию перед системой ППР?
3. Какие факторы определяют продолжительность ремонтного цикла для технологического оборудования?
4. Объясните особенности организации ТОиР для машин пищевых производств.
5. Сравните эффективность различных методов восстановления валов и подшипниковых узлов.
6. Как оценивается экономическая целесообразность ремонта по сравнению с заменой оборудования?
7. Опишите функции современной CMMS системы в управлении техническим обслуживанием.
8. Какие данные необходимы для анализа и оптимизации системы ТОиР на предприятии?
9. Как интегрируется система управления ТОиР с общей системой менеджмента качества предприятия?

Тема 8. Управление надёжностью и долговечностью на протяжении жизненного цикла машины. Экономический аспект

Ключевые вопросы темы

1. Концепция жизненного цикла оборудования и ее значение для управления надёжностью.
2. Экономические аспекты управления надёжностью: затраты на жизненном цикле.
3. Нормативно-техническое обеспечение требований к надёжности и долговечности.
4. Стратегическое планирование повышения надёжности на предприятии.

Ключевые понятия: жизненный цикл оборудования, стоимость жизненного цикла, технико-экономическое обоснование, нормативная документация, стратегическое планирование надёжности, система менеджмента надёжности, эффективность эксплуатации.

Литература: [1, с. 30–54].

Методические рекомендации

Концепция жизненного цикла оборудования представляет собой современный подход к управлению техническими активами, рассматривающий все этапы существования машины – от проектирования до утилизации. Такой подход позволяет оптимизировать совокупные затраты на оборудование и максимально эффективно использовать его потенциал. Жизненный цикл технологической машины включает следующие основные этапы: исследование и разработка, проектирование, изготовление, монтаж и ввод в эксплуатацию, эксплуатация (включая техническое обслуживание и ремонты), модернизация, и наконец, утилизация. На каждом из этих этапов принимаются решения, влияющие на надёжность и долговечность оборудования, причем наибольшее влияние оказывают решения, принятые на ранних стадиях жизненного цикла.

Управление надёжностью на этапе проектирования предполагает прове-

дение комплексных расчётов, выбор материалов и конструктивных решений, обеспечивающих требуемые показатели надёжности. На этапе изготовления качество выполнения технологических процессов определяет, будет ли реализован заложенный в проекте потенциал надёжности. В процессе эксплуатации грамотная организация технического обслуживания и ремонта позволяет поддерживать показатели надёжности на заданном уровне и своевременно выявлять потенциальные проблемы. На этапе модернизации принимаются решения о целесообразности и объеме работ по улучшению характеристик оборудования. Подход, основанный на анализе жизненного цикла, позволяет оценивать долгосрочные последствия решений, принимаемых на каждом этапе.

Экономические аспекты управления надёжностью находят свое отражение в концепции стоимости жизненного цикла (Life Cycle Cost – LCC). LCC представляет собой совокупность всех затрат, связанных с приобретением, эксплуатацией, техническим обслуживанием и утилизацией оборудования. Структура LCC включает первоначальные затраты (стоимость оборудования, доставки, монтажа), эксплуатационные расходы (энергия, материалы, зарплата операторов), затраты на техническое обслуживание и ремонты, а также затраты на утилизацию. Анализ LCC показывает, что первоначальная стоимость оборудования обычно составляет лишь 20–40 % от общей стоимости жизненного цикла, тогда как эксплуатационные расходы и затраты на ТОиР – 60–80 %.

Этот анализ демонстрирует экономическую целесообразность инвестиций в повышение надёжности на этапе проектирования и приобретения оборудования. Более высокая первоначальная стоимость надежного оборудования часто окупается за счет снижения эксплуатационных расходов и затрат на ремонты. Для пищевого оборудования дополнительным важным фактором являются потенциальные потери от простоев, которые могут значительно превышать стоимость самого оборудования, особенно при непрерывном цикле производства. Методы расчёта LCC позволяют количественно оценить экономический эффект от различных мероприятий по повышению надёжности и принять обоснованное решение о выборе оборудования или стратегии его обслуживания.

Нормативно-техническое обеспечение требований к надёжности и долговечности осуществляется через систему стандартов и технических регламентов. В Российской Федерации основополагающим документом является ГОСТ Р 27.001-2015 «Надёжность в технике. Система управления надёжностью. Основные положения», который устанавливает терминологию и общие принципы управления надёжностью. Для пищевого оборудования дополнительно действуют отраслевые стандарты и технические регламенты, устанавливающие специальные требования к безопасности и гигиене.

Международные стандарты серии IEC 60300 «Dependability management» предоставляют методическую основу для управления надёжностью на всех этапах жизненного цикла. Стандарт ISO 55000 «Asset management» устанавливает требования к системе управления активами, включая аспекты надёжности. Для пищевого оборудования важное значение имеют стандарты гигиенического проектирования, такие как EHEDG (European Hygienic Engineering & Design Group) и 3-A Sanitary Standards, которые непосредственно влияют на надёжность и долговечность оборудования через требования к конструкционным ма-

териалам, отделке поверхностей и конструктивным решениям.

Стратегическое планирование повышения надёжности на предприятии предполагает разработку и реализацию комплексной программы, включающей технические, организационные и экономические мероприятия. Основой для такого планирования служит анализ текущего состояния оборудования, статистика отказов и ремонтов, оценка эффективности существующей системы ТОиР. На основе этого анализа определяются приоритетные направления улучшений, устанавливаются целевые показатели надёжности и разрабатывается план мероприятий.

Ключевыми элементами стратегии повышения надёжности являются: совершенствование системы технического обслуживания и ремонта, внедрение современных методов диагностики, обучение персонала, оптимизация запасов запасных частей, внедрение информационных систем управления. Для пищевых производств особое значение имеют мероприятия по повышению коррозионной стойкости оборудования, улучшению систем очистки и дезинфекции, внедрению материалов и покрытий, соответствующих требованиям пищевой безопасности. Реализация стратегии повышения надёжности требует создания соответствующей организационной структуры, распределения ответственности и выделения необходимых ресурсов.

Нормативно-техническая база Российской Федерации в области надёжности и долговечности машин представляет собой многоуровневую систему документов, устанавливающих обязательные и рекомендательные требования. Основопологающим документом является Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», который определяет правовые основы технического регулирования и устанавливает разделение требований на обязательные (безопасность) и добровольные (надёжность, качество).

Для пищевого оборудования особое значение имеют технические регламенты Таможенного союза, устанавливающие обязательные требования безопасности:

- ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции»;
- ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств».

Система ГОСТов по надёжности включает следующие ключевые стандарты:

- ГОСТ Р 27.001-2015 «Надёжность в технике. Система управления надёжностью. Основные положения» – устанавливает терминологию и общие принципы;
- ГОСТ Р 27.002-2009 «Надёжность в технике. Термины и определения» – содержит унифицированную терминологию;
- ГОСТ Р 27.003-2010 «Надёжность в технике. Состав и общие правила задания требований по надёжности».

Отраслевые нормативные документы для пищевого машиностроения включают:

- ГОСТ Р 51898-2002 «Аппараты пищеварочные электрические. Общие технические условия»;
- ГОСТ Р 55454-2013 «Машины и оборудование для пищевой промыш-

ленности. Требования безопасности»;

- СанПиН 2.3.4.551-96 «Производство пищевых продуктов. Гигиенические требования».

Методические документы по оценке надёжности:

- РД 50-690-89 «Методические указания. Надёжность в технике. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным»;
- РД 50-664-87 «Методические указания. Расчёты и испытания на надёжность. Общие положения».

Для критически важного оборудования пищевой промышленности действуют специальные правила безопасности, утвержденные Ростехнадзором:

- Правила безопасности для объектов, использующих сжиженные углеводородные газы;
- Правила безопасности для взрывопожароопасных производственных объектов.

Вопросы для контроля

1. Проанализируйте влияние решений, принимаемых на различных этапах жизненного цикла, на надёжность оборудования.
2. Каковы преимущества подхода, основанного на анализе жизненного цикла, по сравнению с традиционными методами управления оборудованием?
3. Как концепция LCC может быть использована для обоснования инвестиций в повышение надёжности?
4. Опишите структуру затрат в модели LCC для типового оборудования пищевого производства.
5. Какие российские и международные стандарты регулируют требования к надёжности пищевого оборудования?
6. Как требования гигиенического проектирования влияют на надёжность и долговечность оборудования?
7. Какие этапы включает процесс стратегического планирования повышения надёжности на предприятии?
8. Как интегрируется управление надёжностью в общую систему менеджмента предприятия?
9. Какие показатели используются для оценки эффективности программы повышения надёжности?
10. Как особенности пищевого производства влияют на содержание стратегии повышения надёжности?

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Практические занятия проводятся с целью формирования у студентов умений и навыков расчёта показателей надёжности технологических машин, а также планирования мероприятий по повышению долговечности оборудования.

Практические занятия по дисциплине «Основы надёжности и долговечности технологических машин» являются важной составной частью учебного

процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины, закреплению знаний.

В ходе самостоятельной подготовки студентов к практическому занятию необходимо не только воспользоваться литературой, рекомендованной преподавателем, но и проявить самостоятельность в отыскании новых источников, связанных с темой практического занятия.

Тематический план практических (ПЗ) занятий представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Структура ПЗ

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия
1	Расчёт показателей надёжности технологической машины на основе статистических данных об отказах
2	Определение доминирующего механизма отказа и оценка ресурса детали по критериям усталостной прочности и износостойкости
3	Статистическая обработка данных испытаний и построение кривой жизненного цикла оборудования с аппроксимацией законом распределения Вейбулла
4	Расчёт и выбор методов повышения надёжности на этапе проектирования (резервирование, оптимизация параметров, выбор материалов)
5	Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по данным диагностического контроля и оценка экономической эффективности стратегий ТОиР
6	Расчёт суммарных затрат на жизненный цикл машины и обоснование решений по модернизации или замене оборудования

Практическая работа № 1

Расчёт показателей надёжности технологической машины на основе статистических данных об отказах

Цель: получение практических умений и навыков по применению методов расчёта количественных показателей надёжности по статистическим данным об отказах оборудования, научиться анализировать и интерпретировать полученные результаты.

Задание по практической работе: на основе предоставленных статистических данных об отказах технологического оборудования за определённый период эксплуатации рассчитать основные показатели надёжности, проанализировать их динамику и сделать выводы о надёжности системы.

Методические рекомендации

В соответствии с ГОСТ Р 27.002-2009, надёжность является комплексным свойством технического объекта, включающим безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Для количественной оценки надёжности используются вероятностно-статистические методы, основанные на обработке данных об отказах.

Основными показателями надёжности восстанавливаемого оборудования являются: вероятность безотказной работы $P(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, средняя наработка на отказ T , коэффициент готовности K_g . Расчёт этих показателей осуществляется на основе статистических данных о наработке между отказами и времени восстановления.

Для обработки статистических данных необходимо выполнить следующие действия: сгруппировать данные по интервалам наработки, построить статистический ряд, вычислить частоты отказов в каждом интервале, определить эмпирическую функцию распределения наработки до отказа. На основе полученных данных строится гистограмма распределения отказов, которая позволяет визуализировать закономерности изменения интенсивности отказов во времени.

При расчёте показателей надёжности важно учитывать тип распределения наработки до отказа. Для оборудования пищевых производств характерно распределение Вейбулла, которое хорошо описывает процессы постепенного износа. Параметры распределения определяются методом максимального правдоподобия или графическим методом с использованием вероятностной модели Вейбулла.

Задание для самостоятельного выполнения

1. Провести статистическую обработку данных об отказах оборудования, таблица с которыми выдана преподавателем.
2. Рассчитать основные показатели надёжности для заданного периода эксплуатации.
3. Построить графики изменения вероятности безотказной работы и интенсивности отказов.
4. Определить параметры закона распределения наработки до отказа.
5. Оценить доверительные интервалы для рассчитанных показателей.
6. Подготовить отчет с анализом полученных результатов.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант 1

На основе статистики отказов центробежного насоса за 12 месяцев:

- Количество отказов: 8;
- Суммарная наработка: 8600 часов;
- Время восстановления после каждого отказа (часы): 6, 4, 8, 5, 7, 3, 6, 5.

Рассчитать вероятность безотказной работы за 1000 ч, среднюю наработку на отказ, коэффициент готовности.

Вариант 2

Для конвейерной линии зарегистрировано 15 отказов за 6000 ч работы.

Время между отказами (часы): 350, 420, 290, 510, 380, 440, 320, 470, 390, 410, 360, 430, 400, 370, 450.

Определить интенсивность отказов, вероятность безотказной работы за 500 ч, среднее время восстановления (принять среднее время ремонта 4 ч).

Вариант 3

Статистика отказов смесителя сливочного масла за период эксплуатации:

- Общая наработка: 12000 ч;
- Количество отказов: 10;
- Время простоя из-за отказов: 72 ч.

Рассчитать коэффициент готовности, коэффициент простоя, среднюю наработку на отказ.

Вариант 4

Для компрессорной установки зафиксированы следующие данные:

- Период наблюдения: 2 года (17520 ч);
- Количество отказов: 12;
- Суммарное время восстановления: 96 ч.

Определить среднее время между отказами, коэффициент оперативной готовности, вероятность безотказной работы за 2000 ч.

Вариант 5

На основе данных о работе автоклава:

- Накопленная наработка: 15000 ч;
- Количество отказов: 6;
- Время восстановления (часы): 8, 12, 6, 10, 9, 7.

Рассчитать интенсивность отказов, коэффициент технического использования, среднее время восстановления.

Общий алгоритм выполнения заданий

1. Сбор и систематизация исходных данных:
 - Определить общую наработку оборудования (T);
 - Зафиксировать количество отказов (n);
 - Записать время восстановления после каждого отказа.
2. Расчет основных показателей надежности:
 - Средняя наработка на отказ: $T_0 = T/n$;
 - Интенсивность отказов: $\lambda = n/T$;
 - Вероятность безотказной работы: $P(t) = e^{(-\lambda t)}$;
 - Среднее время восстановления: $T_v = \sum t_{v_i}/n$;
 - Коэффициент готовности: $K_g = T_0/(T_0 + T_v)$.
3. Анализ полученных результатов:
 - Оценка уровня надежности оборудования;
 - Сравнение с нормативными значениями;
 - Формулировка выводов и рекомендаций.

Пример выполнения задания

Исходные данные:

- Количество отказов: 8;
- Суммарная наработка: 8600 ч;
- Время восстановления (часы): 6, 4, 8, 5, 7, 3, 6, 5.

Решение:

1. Расчет средней наработки на отказ

$$T_0 = 8600 / 8 = 1075 \text{ ч.}$$

2. Расчет интенсивности отказов

$$\lambda = 8 / 8600 = 0.00093 \text{ 1/час.}$$

3. Расчет вероятности безотказной работы за 1000 ч

$$P(1000) = e^{(-0.00093 \times 1000)} = e^{(-0.93)} = 0.395.$$

4. Расчет среднего времени восстановления

$$T_B = (6 + 4 + 8 + 5 + 7 + 3 + 6 + 5) / 8 = 44 / 8 = 5.5 \text{ ч.}$$

5. Расчет коэффициента готовности

$$K_T = 1075 / (1075 + 5.5) = 1075 / 1080.5 = 0.995.$$

Результаты расчетов:

Показатель	Значение	Единица измерения
Средняя наработка на отказ	1075	часов
Интенсивность отказов	0.00093	1/час
Вероятность безотказной работы за 1000 часов	0.395	-
Среднее время восстановления	5.5	часов
Коэффициент готовности	0.995	-

Выводы

1. Оборудование имеет высокий коэффициент готовности (0.995), что свидетельствует о хорошей ремонтпригодности.
2. Низкая вероятность безотказной работы за 1000 ч (0.395) указывает на необходимость улучшения безотказности.
3. Рекомендуются провести анализ причин частых отказов и разработать мероприятия по повышению надежности.

Изменение вероятности безотказной работы для построения графика:

Время, часов	Вероятность безотказной работы
0	1.000
200	0.830
400	0.689
600	0.572
800	0.475

Время, часов	Вероятность безотказной работы
1000	0.395
1200	0.328
1400	0.272
1600	0.226

Вопросы для контроля

1. Как влияет объем выборки на точность оценки показателей надёжности?
2. В чем отличие расчёта показателей для восстанавливаемого и невосстанавливаемого оборудования?
3. Как определить доверительные интервалы для вероятности безотказной работы?
4. Какие методы проверки гипотез о виде закона распределения вы знаете?
5. Как интерпретировать значение интенсивности отказов на разных участках «кривой жизни»?
6. Какие факторы влияют на точность прогнозирования показателей надёжности?
7. Как использовать полученные показатели для планирования технического обслуживания?
8. В чем особенности расчёта надёжности для сложных технических систем?
9. Как оценить адекватность математической модели надёжности реальному объекту?

Практическая работа № 2

Определение доминирующего механизма отказа и оценка ресурса детали по критериям усталостной прочности и износостойкости

Цель: получение практических умений и навыков по идентификации доминирующих механизмов отказа деталей машин и проведению оценки их ресурса по критериям усталостной прочности и износостойкости.

Задание по практической работе: на основе анализа условий работы и конструктивных параметров детали определить доминирующий механизм отказа, провести расчёт ресурса по соответствующим критериям и разработать рекомендации по повышению долговечности.

Методические рекомендации

Определение доминирующего механизма отказа является важной задачей при проектировании и эксплуатации машин пищевых производств. Согласно ГОСТ 27.002-2015, под механизмом отказа понимают физические, химические и другие процессы, приводящие к нарушению работоспособности объекта. Для типовых деталей пищевого оборудования (валы, подшипники, зубчатые пере-

дачи, уплотнения) характерны следующие механизмы отказа: усталостное разрушение, изнашивание, пластическая деформация, коррозия.

При идентификации доминирующего механизма отказа необходимо проанализировать: условия нагружения (статические, циклические, ударные), характер взаимодействия поверхностей (трение скольжения, качения), свойства материалов, наличие агрессивных сред, температурные условия. Для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок (например, валы мешалок, рабочие органы измельчителей), доминирующим является усталостный механизм отказа. Для трущихся пар в насосах и смесителях основным механизмом будет изнашивание.

Расчёт ресурса по усталостной прочности проводится по методу предельных состояний с учетом коэффициента запаса. Для определения предела выносливости материала используются поправочные коэффициенты, учитывающие концентрацию напряжений, масштабный фактор, качество поверхности. Расчёт на износостойкость базируется на определении допустимой величины износа за заданный срок службы с учетом условий трения и свойств материалов.

Задание для выполнения

1. Проанализировать условия работы заданной преподавателем детали и идентифицировать возможные механизмы отказа.

2. Определить доминирующий механизм отказа на основе анализа критериев работоспособности.

3. Провести расчёт ресурса по усталостной прочности с учетом действующих нагрузок.

4. Выполнить оценку износостойкости по заданным параметрам трения.

5. Сравнить полученные значения ресурса и сделать вывод о лимитирующем факторе.

6. Разработать рекомендации по повышению долговечности детали.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант 1

Для вала мешалки из стали 40Х:

- Диаметр вала: 60 мм;
- Крутящий момент: 1200 Н·м;
- Частота вращения: 150 об/мин;
- Ресурс работы: 10000 часов;
- Материал пары трения: сталь/бронза;

Определить доминирующий механизм отказа, рассчитать ресурс по усталостной прочности и износостойкости.

Вариант 2

Для шестерни редуктора:

- Модуль: 4 мм;
- Число зубьев: 32;
- Передаваемая мощность: 15 кВт;
- Частота вращения: 1000 об/мин;
- Материал: сталь 45, термообработка – улучшение.

Оценить доминирующий механизм отказа, выполнить расчет на контактную прочность и изгибную выносливость.

Вариант 3

Для подшипника скольжения насоса:

- Диаметр цапфы: 50 мм;
- Длина подшипника: 80 мм;
- Нагрузка: 8 кН;
- Частота вращения: 3000 об/мин;
- Смазка: масло И-40.

Рассчитать доминирующий механизм отказа, определить ресурс по износоустойчивости и критерию p_v .

Вариант 4

Для пружины клапана:

- Диаметр прутка: 6 мм;
- Средний диаметр пружины: 40 мм;
- Число рабочих витков: 8;
- Максимальная нагрузка: 400 Н;
- Частота нагружения: 10 Гц.

Определить механизм отказа, выполнить расчет на усталостную прочность.

Вариант 5

Для зубчатой передачи мясорубки:

- Модуль: 3 мм;
- Число зубьев: 28;
- Ширина венца: 40 мм;
- Передаваемая мощность: 7.5 кВт;
- Частота вращения: 500 об/мин.

Оценить доминирующий механизм отказа, рассчитать ресурс по контактной прочности и изгибной выносливости.

Общий алгоритм выполнения заданий

1. Анализ условий работы детали:

- Изучение кинематической схемы и нагрузок;
- Определение характера нагружения (статическое, циклическое, ударное);
- Анализ условий трения и изнашивания.

2. Идентификация возможных механизмов отказа:

- Усталостное разрушение;
- Изнашивание поверхностей;
- Пластическая деформация;
- Коррозия.

3. Расчет ресурса по усталостной прочности:

- Определение действующих напряжений;
- Расчет коэффициента запаса усталостной прочности;
- Определение предела выносливости с учетом коэффициентов.

4. Расчет ресурса по износостойкости:

- Определение параметров трения;
- Расчет критерия p_v ;
- Оценка интенсивности изнашивания.

5. Сравнительный анализ и выводы:

- Определение доминирующего механизма отказа;
- Формулировка рекомендаций по повышению долговечности.

Пример выполнения задания

Исходные данные:

- Материал вала: сталь 40Х;
- Диаметр вала: 60 мм;
- Крутящий момент: 1200 Н·м;
- Частота вращения: 150 об/мин’
- Ресурс работы: 10000 часов’
- Материал пары трения: сталь/бронза.

Решение:

1. Анализ условий работы:

- Циклическое кручение вала;
- Наличие концентраторов напряжений (шпоночный паз);
- Умеренные скорости скольжения в подшипниках.

2. Идентификация механизмов отказа:

- Усталостное разрушение от крутящих моментов;
- Изнашивание шеек вала в подшипниках;
- Возможность пластической деформации при перегрузках.

3. Расчет на усталостную прочность:

- Касательные напряжения кручения: $\tau = 16M/(\pi d^3) = 16 \times 1200/(\pi \times 0.06^3) = 28.3$ МПа;
- Предел выносливости при кручении: $\tau_{-1} = 0.58 \times \sigma_{-1} = 0.58 \times 350 = 203$ МПа;
- Коэффициент запаса: $n = \tau_{-1}/\tau = 203/28.3 = 7.2$.

4. Расчет на износостойкость:

- Окружная скорость: $v = \pi d n / 60 = \pi \times 0.06 \times 150 / 60 = 0.47$ м/с;
- Давление в подшипнике: $p = F/A$ (принимая $F = 2$ кН, $A = 0.06 \times 0.08 = 0.0048$ м²);
- $p = 2000/0.0048 = 0.42$ МПа;
- Критерий $p v = 0.42 \times 0.47 = 0.20$ МПа·м/с.

5. Сравнительный анализ результатов.

Результаты расчетов:

Показатель	Значение	Нормативное значение
Коэффициент запаса по усталости	7.2	≥ 2.5
Касательные напряжения	28.3 МПа	-
Критерий $p v$	0.20 МПа·м/с	≤ 2.0 МПа·м/с
Интенсивность изнашивания	0.008 мм/1000 час	-

Оценка механизмов отказа:

Механизм отказа	Вероятность	Приоритет
Усталостное разрушение	Низкая	3
Изнашивание	Средняя	1
Пластическая деформация	Низкая	4
Коррозия	Средняя	2

Выводы:

1. Доминирующим механизмом отказа является изнашивание шеек вала в подшипниках скольжения.
2. Запас по усталостной прочности достаточен ($7.2 > 2.5$).
3. Критерий $p v$ находится в допустимых пределах.
4. Рекомендуются применение поверхностного упрочнения шеек вала для повышения износостойкости.

Прогноз ресурса:

Механизм отказа	Расчетный ресурс, часов
По усталостной прочности	> 50000
По износостойкости	15000
По коррозии	20000

Вопросы для контроля

1. Какие факторы определяют выбор доминирующего механизма отказа?
2. Как влияет характер нагружения на определение расчётной схемы?
3. Какие поправочные коэффициенты учитываются при расчёте на усталость?
4. Как определить допустимую величину износа для трущейся пары?
5. В чем особенности расчёта ресурса при комбинированных механизмах отказа?
6. Как учитывается влияние агрессивной среды на усталостную прочность?
7. Какие методы повышения износостойкости наиболее эффективны для пищевого оборудования?
8. Как проверить достоверность результатов расчёта ресурса?
9. В чем отличие расчёта на контактную выносливость от объемной?
10. Как оптимизировать конструкцию детали для увеличения ресурса?

Практическая работа № 3

Статистическая обработка данных испытаний и построение кривой жизненного цикла оборудования с аппроксимацией законом распределения Вейбулла

Цель: получение практических умений и навыков по статистической обработке экспериментальных данных об отказах оборудования, построение кривой жизненного цикла и определение параметров закона распределения Вейбулла для прогнозирования надёжности.

Задание по практической работе: провести статистическую обработку данных испытаний на надёжность, построить кривую интенсивности отказов (кривую жизненного цикла), определить параметры распределения Вейбулла и оценить показатели надёжности оборудования.

Методические рекомендации

Статистическая обработка данных испытаний на надёжность является основой для прогнозирования поведения оборудования в реальных условиях эксплуатации. Согласно ГОСТ Р 27.001-2015, обработка экспериментальных данных должна проводиться с использованием методов математической статистики, обеспечивающих достоверность и объективность получаемых результатов. Особое значение имеет правильный выбор закона распределения, который адекватно описывает процесс возникновения отказов.

Для большинства механических систем, к которым относится оборудование пищевых производств, наиболее адекватным является распределение Вей-

булла, обладающее достаточной гибкостью для описания всех трех периодов «кривой жизни». Двухпараметрическое распределение Вейбулла характеризуется параметром формы β и параметром масштаба η . Параметр формы β определяет тип кривой интенсивности отказов: при $\beta < 1$ интенсивность отказов убывает (период приработки), при $\beta = 1$ – постоянна (период нормальной эксплуатации), при $\beta > 1$ – возрастает (период износа).

Методика обработки данных включает несколько этапов. Первоначально проводится первичная статистическая обработка: данные упорядочиваются по возрастанию наработки до отказа, вычисляются статистические характеристики (среднее значение, дисперсия, коэффициент вариации). Затем строится статистическая функция распределения $F^*(t) = i/(n+1)$, где i – порядковый номер отказа в вариационном ряду, n – объем выборки. Для визуализации данных строится гистограмма распределения отказов с оптимальным количеством интервалов по формуле Стерджесса.

Определение параметров распределения Вейбулла может проводиться различными методами. Графический метод с использованием вероятностной бумаги Вейбулла является наиболее наглядным. Для этого статистическая функция распределения наносится на специальную сетку, после чего проводится прямая линия через точки. Параметр формы β определяется как тангенс угла наклона прямой, а параметр масштаба η соответствует наработке, при которой $F(t) = 0,632$. Более точным является метод максимального правдоподобия, который заключается в решении системы уравнений правдоподобия.

Построение «кривой жизни» (кривой интенсивности отказов) осуществляется на основе полученного закона распределения. Для распределения Вейбулла интенсивность отказов вычисляется по формуле $\lambda(t) = (\beta/\eta) * (t/\eta)^{(\beta-1)}$. Анализ вида кривой позволяет определить, в каком периоде жизненного цикла находится оборудование, и планировать соответствующие мероприятия по техническому обслуживанию.

Для оценки точности полученных оценок параметров определяются их доверительные интервалы. При малых объемах выборки ($n < 30$) используются специальные табличные коэффициенты, зависящие от доверительной вероятности и объема выборки. Проверка адекватности выбранного закона распределения проводится с помощью критериев согласия, таких как критерий Колмогорова-Смирнова или хи-квадрат.

Особое внимание при обработке данных испытаний пищевого оборудования следует уделять учету специфических факторов: циклическому характеру нагрузок, воздействию агрессивных сред, термическим напряжениям. Эти факторы могут существенно влиять на параметры распределения и должны учитываться при прогнозировании надёжности.

Особенности выполнения работы для пищевого оборудования. При анализе данных испытаний пищевого оборудования необходимо учитывать специфику рабочих условий: наличие абразивных частиц в продукте, циклические температурные воздействия, влияние моющих и дезинфицирующих средств. Эти факторы могут приводить к изменению параметров распределения Вейбулла по сравнению с обычным промышленным оборудованием. Особое внимание следует уделять анализу периода приработки, который для пищевого

оборудования может быть расширен вследствие необходимости приработки уплотнений и других элементов, контактирующих с продуктом.

Задание для выполнения

1. Провести первичную статистическую обработку данных испытаний на надёжность машины, которые выданы преподавателем.
2. Построить статистическую функцию распределения и гистограмму отказов.
3. Определить параметры распределения Вейбулла графическим методом.
4. Рассчитать параметры распределения методом максимального правдоподобия.
5. Построить кривую интенсивности отказов.
6. Оценить показатели надёжности для заданных наработок.
7. Проверить адекватность распределения Вейбулла с помощью критерия согласия.
8. Определить доверительные интервалы для параметров распределения.
9. Проанализировать положение оборудования на «кривой жизни».
10. Подготовить отчет с выводом о периоде жизненного цикла оборудования.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант 1

Обработать данные испытаний 20 центробежных насосов:

Наработка до отказа (час): 1250, 980, 1560, 2100, 870, 1430, 1980, 1120, 1650, 2300, 1050, 1780, 920, 1920, 1380, 2050, 1180, 1620, 1880, 1350.

Построить кривую жизни, определить параметры распределения Вейбулла, оценить вероятность безотказной работы за 1000 ч.

Вариант 2

Для 15 редукторов получены следующие данные наработки до отказа (час): 2800, 3200, 2500, 4100, 3500, 2900, 3800, 3300, 2700, 3600, 3100, 3900, 3400, 3000, 3700.

Определить параметры распределения Вейбулла, построить статистическую функцию распределения, оценить интенсивность отказов при наработке 3000 ч.

Вариант 3

Испытания 18 электродвигателей дали следующие результаты (час):

4200, 3800, 5100, 4500, 4800, 4000, 5300, 4600, 4900, 4300, 4700, 5200, 4400, 5000, 4100, 5400, 3900, 5500.

Выполнить аппроксимацию распределением Вейбулла, определить период нормальной эксплуатации, рассчитать гамма-процентный ресурс при $\gamma=90\%$.

Вариант 4

Для 22 подшипниковых узлов зарегистрирована наработка до отказа (час):
1800, 2200, 1600, 2500, 2000, 1900, 2300, 2100, 1700, 2400, 1950, 2250, 1850, 2350, 2050, 2150, 1750, 2450, 1650, 2550, 2300, 2400.

Построить кривую жизни, определить параметры Вейбулла, оценить вероятность отказа в течение первых 1500 ч.

Вариант 5

Данные испытаний 25 уплотнительных элементов (час):
800, 950, 1200, 1050, 1100, 900, 1250, 1150, 1000, 1300, 850, 1350, 950, 1400, 1200, 1450, 1100, 1500, 1250, 1550, 1350, 1600, 1400, 1650, 1500.

Определить параметры распределения Вейбулла, построить функцию надежности, оценить среднюю наработку до отказа.

Общий алгоритм выполнения заданий

1. Первичная статистическая обработка данных:
 - Упорядочивание данных в вариационный ряд;
 - Расчет статистических характеристик (среднее, дисперсия);
 - Построение интервального статистического ряда.
2. Построение статистической функции распределения:
 - Расчет значений $F^*(t) = i/(n+1)$;
 - Построение графика статистической функции распределения;
 - Определение эмпирической плотности распределения.
3. Определение параметров распределения Вейбулла:
 - Графический метод с использованием вероятностной бумаги;
 - Метод максимального правдоподобия;
 - Расчет параметров β и η .
4. Построение теоретической кривой жизни:
 - Расчет теоретической функции распределения;
 - Построение кривой интенсивности отказов;
 - Определение периодов приработки, нормальной эксплуатации и износа.
5. Оценка показателей надежности:
 - Расчет вероятности безотказной работы;
 - Определение интенсивности отказов;
 - Оценка гамма-процентного ресурса.

Пример выполнения задания

Исходные данные:

Наработка до отказа 20 центробежных насосов (ч):
1250, 980, 1560, 2100, 870, 1430, 1980, 1120, 1650, 2300, 1050, 1780, 920, 1920, 1380, 2050, 1180, 1620, 1880, 1350.

Решение:

1. Первичная статистическая обработка.

Вариационный ряд: 870, 920, 980, 1050, 1120, 1180, 1250, 1350, 1380, 1430, 1560, 1620, 1650, 1780, 1880, 1920, 1980, 2050, 2100, 2300.

Статистические характеристики:

- Объем выборки: $n = 20$;
- Минимальная наработка: 870 ч;
- Максимальная наработка: 2300 ч;
- Средняя наработка: 1568 ч;
- Среднеквадратическое отклонение: 428 ч.

2. Построение статистической функции распределения.

i	t_i , час	$F^*(t) = i/(n+1)$
1	870	0.048
2	920	0.095
3	980	0.143
4	1050	0.190
5	1120	0.238
6	1180	0.286
7	1250	0.333
8	1350	0.381
9	1380	0.429
10	1430	0.476
11	1560	0.524
12	1620	0.571
13	1650	0.619
14	1780	0.667
15	1880	0.714
16	1920	0.762
17	1980	0.810
18	2050	0.857
19	2100	0.905
20	2300	0.952

3. Определение параметров распределения Вейбулла.

Графическим методом получены:

- Параметр формы: $\beta = 2.1$;
- Параметр масштаба: $\eta = 1750$ ч.

Методом максимального правдоподобия:

- $\beta = 2.15$;
- $\eta = 1770$ час.

4. Расчет теоретической функции распределения.

t, час	$F(t) = 1 - \exp[-(t/\eta)^\beta]$
500	0.008
1000	0.145
1500	0.412
2000	0.698
2500	0.878
3000	0.960

5. Оценка показателей надежности.

Вероятность безотказной работы за 1000 ч:

$$P(1000) = 1 - F(1000) = 1 - 0.145 = 0.855.$$

Интенсивность отказов при $t = 1000$ часов:

$$\lambda(1000) = (\beta/\eta) \times (1000/\eta)^{\beta-1} = (2.15/1770) \times (1000/1770)^{1.15} = 0.00023 \text{ 1/ч.}$$

Гамма-процентный ресурс при $\gamma = 90$ %:

$$t_{0.9} = \eta \times [-\ln(0.9)]^{1/\beta} = 1770 \times [-\ln(0.9)]^{1/2.15} = 860 \text{ ч.}$$

Результаты расчетов:

Показатель	Значение
Параметр формы β	2.15
Параметр масштаба η	1770 час
Средняя наработка до отказа	1568 час
Вероятность безотказной работы за 1000 часов	0.855
Интенсивность отказов при $t=1000$ час	0.00023 1/час
90%-ный ресурс	860 часов

Анализ кривой жизни:

Период	Диапазон наработки, час	Характеристика
Приработки	0-800	$\beta < 1$ (в начале периода)
Нормальной эксплуатации	800-2000	$\beta \approx 1$
Износа	>2000	$\beta > 1$

Выводы

1. Распределение Вейбулла с параметрами $\beta=2.15$, $\eta=1770$ адекватно описывает данные испытаний.
2. Оборудование имеет выраженный период износа ($\beta > 1$).
3. 90%-ный ресурс составляет 860 часов, что указывает на необходимость профилактического обслуживания до достижения этой наработки.
4. Рекомендуется проводить диагностику оборудования после 800 часов работы.

Вопросы для контроля

1. Какие статистические характеристики необходимы для первичной оценки данных испытаний?
2. Как объем выборки влияет на точность определения параметров распределения?
3. В чем преимущества и недостатки графического метода определения параметров Вейбулла?
4. Как интерпретировать физический смысл параметров β и η ?
5. Какие методы проверки гипотез о виде закона распределения наиболее эффективны?
6. Как учитывается цензурирование данных при обработке результатов испытаний?
7. В чем особенности построения «кривой жизни» для оборудования с периодическим техническим обслуживанием?
8. Как влияет агрессивная среда на параметры распределения Вейбулла?
9. Каким образом можно использовать полученные параметры для прогнозирования остаточного ресурса?
10. Как оптимизировать программу испытаний для получения достоверных результатов?

Практическая работа № 4

Расчёт и выбор методов повышения надёжности на этапе проектирования (резервирование, оптимизация параметров, выбор материалов)

Цель: получение практических умений и навыков по расчёту и выбору эффективных способов повышения надёжности технологических машин на этапе проектирования, включая резервирование, оптимизацию параметров и выбор материалов.

Задание по практической работе: на основе анализа исходных данных о проектируемой машине пищевого производства провести расчёт показателей надёжности, выбрать и обосновать методы их повышения, оценить эффективность предлагаемых решений.

Методические рекомендации:

Повышение надёжности на этапе проектирования является наиболее эффективным подходом, позволяющим заложить необходимые показатели долговечности и безотказности в конструкцию машины. Согласно ГОСТ Р 27.001-

2015, проектные мероприятия по повышению надёжности должны основываться на принципах конструктивной преемственности, унификации, резервирования и оптимизации параметров. Особое значение для пищевого оборудования имеет учет специфических факторов эксплуатации: агрессивных сред, циклических температурных нагрузок, требований гигиенического исполнения.

Основным методом повышения надёжности сложных систем является резервирование – введение дополнительных элементов или цепей, способных выполнять функции основных в случае их отказа. Различают структурное (параллельное соединение элементов), временное (возможность выполнения операции запасным способом) и функциональное (дублирование функций) резервирование. Расчёт надёжности системы с резервированием проводится с учетом вида резерва (нагруженный, облегченный, ненагруженный) и схемы соединения элементов. Для пищевого оборудования зачастую важно применение резервирования критических узлов, отказ которых может привести к порче продукции или нарушению санитарных норм.

Оптимизация параметров конструкции включает выбор геометрических характеристик, обеспечивающих минимальные напряжения концентрации, оптимальные условия теплоотвода, удобство обслуживания. Для деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, проводится оптимизация формы с целью снижения пиковых напряжений. Особое внимание уделяется узлам трения, где оптимизация зазоров и поверхностных характеристик позволяет существенно повысить износостойкость. Расчёт оптимальных параметров проводится методами математического программирования с учетом ограничений по массе, габаритам, стоимости.

Выбор материалов является важным аспектом проектирования надежного пищевого оборудования. Основными критериями выбора являются: механические характеристики (прочность, твердость, ударная вязкость), коррозионная стойкость, износостойкость, технологичность, а также соответствие санитарно-гигиеническим требованиям. Для деталей, контактирующих с пищевыми продуктами, применяются стали аустенитного класса (12X18H10T, 08X18H10), для менее ответственных узлов – ферритные стали (12X13). При выборе материалов проводится анализ их поведения в рабочих средах с учетом температуры, pH, наличия абразивных частиц. При проектировании пищевого оборудования особое внимание уделяется соблюдению требований гигиенического проектирования: отсутствие застойных зон, возможность полной разборки для мойки, применение разрешенных материалов.

Задание для выполнения

1. Проанализировать исходные данные проектируемой машины, тип которой задан преподавателем, и выявить критические узлы.
2. Провести расчёт показателей надёжности базового варианта конструкции.
3. Разработать варианты резервирования для двух критических узлов и оценить их эффективность.
4. Провести оптимизацию параметров двух ответственных деталей.

5. Обосновать выбор материалов для основных узлов с учетом условий эксплуатации.

6. Оценить экономическую эффективность предлагаемых решений.

7. Сравнить показатели надёжности базового и улучшенного вариантов.

8. Разработать рекомендации по техническому обслуживанию.

9. Оформить отчет с расчётами и обоснованиями.

10. Сформулировать выводы о эффективности предложенных мер.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант 1

Для системы охлаждения биореактора:

- Интенсивность отказов основного насоса: $\lambda_1 = 0.0001$ 1/ч;
 - Интенсивность отказов резервного насоса: $\lambda_2 = 0.0001$ 1/ч;
 - Интенсивность отказов системы переключения: $\lambda = 0.00001$ 1/ч;
 - Время работы: 1000 ч.
- Рассчитать надёжность системы при различных схемах резервирования, выбрать оптимальный вариант.

Вариант 2

Для приводной системы конвейера:

- Мощность двигателя: 15 кВт;
 - Частота вращения: 1500 об/мин;
 - Ресурс работы: 20000 ч;
 - Требуемая вероятность безотказной работы: 0.95;
- Подобрать материал вала, рассчитать диаметр вала, предложить методы повышения усталостной прочности.

Вариант 3

Для системы управления пастеризатором:

- Количество датчиков температуры: 3;
 - Интенсивность отказов датчика: 0.0002 1/ч;
 - Интенсивность отказов контроллера: 0.00005 1/ч;
 - Время работы: 5000 ч;
- Рассчитать надёжность системы при различных способах резервирования датчиков, предложить оптимальную схему.

Вариант 4

Для зубчатой передачи смесителя:

- Передаваемая мощность: 10 кВт;
 - Частота вращения: 1000 об/мин;
 - Передаточное число: 4;
 - Ресурс: 15000 ч;
- Подобрать материалы зубчатых колес, рассчитать модуль зацепления, предложить методы повышения износостойкости.

Вариант 5

Для гидравлической системы пресса:

- Рабочее давление: 20 Мпа;
 - Производительность насоса: 50 л/мин;
 - Количество рабочих циклов: 500000;
 - Требуемая надежность: 0.99;
- Рассчитать параметры резервирования, предложить методы повышения надежности соединений и уплотнений.

Общий алгоритм выполнения заданий

1. Анализ исходных данных и требований:
 - Определение функций системы и критических элементов;
 - Анализ условий эксплуатации и нагрузок;
 - Формулировка требований к надежности.
2. Расчет показателей надежности базового варианта:
 - Построение структурной схемы надежности;
 - Расчет вероятности безотказной работы;
 - Оценка соответствия требованиям.
3. Разработка вариантов повышения надежности:
 - Выбор методов резервирования;
 - Оптимизация параметров конструкции;
 - Подбор материалов и покрытий.
4. Сравнительный анализ вариантов:
 - Расчет показателей надежности для каждого варианта;
 - Оценка экономической эффективности;
 - Анализ технологичности реализации.
5. Формулировка рекомендаций:
 - Выбор оптимального варианта;
 - Разработка мероприятий по техническому обслуживанию;
 - Оценка ожидаемого эффекта.

Пример выполнения задания

Исходные данные:

Система охлаждения биореактора:

- $\lambda_1 = 0.0001$ 1/час (основной насос);
- $\lambda_2 = 0.0001$ 1/час (резервный насос);
- $\lambda = 0.00001$ 1/час (система переключения);
- Время работы: $t = 1000$ ч.

Решение:

1. Анализ исходных данных.

Система критична для безопасности, требуется высокая надежность.

2. Расчет надежности базового варианта (один насос).

$$P_1(t) = \exp(-\lambda_1 t) = \exp(-0.0001 \times 1000) = 0.9048.$$

3. Разработка вариантов повышения надежности.

Вариант А – Резервирование с нагруженным резервом:

$$P_A(t) = [1 - (1 - \exp(-\lambda_1 t))^2] \times \exp(-\lambda t);$$

$$P_A(1000) = [1 - (1 - 0.9048)^2] \times \exp(-0.00001 \times 1000) = 0.9909 \times 0.9900 = 0.9810;$$

Вариант Б – Резервирование с ненагруженным резервом:

$$P_B(t) = \exp(-\lambda_1 t) \times (1 + \lambda_1 t) \times \exp(-\lambda t);$$

$$P_B(1000) = 0.9048 \times (1 + 0.1) \times 0.9900 = 0.9853.$$

Вариант В – Троирование с мажорированием:

$$P_V(t) = [3\exp(-2\lambda_1 t) - 2\exp(-3\lambda_1 t)] \times \exp(-\lambda t);$$

$$P_V(1000) = [3 \times 0.9048^2 - 2 \times 0.9048^3] \times 0.9900 = 0.9754 \times 0.9900 = 0.9656.$$

4. Сравнительный анализ вариантов

Технические характеристики:

Вариант	Схема резервирования	P(1000)	Сложность реализации
Базовый	Одиночная система	0.9048	Низкая
А	Дублирование с нагруженным резервом	0.9810	Средняя
Б	Дублирование с ненагруженным резервом	0.9853	Высокая
В	Троирование с мажорированием	0.9656	Очень высокая

Экономические показатели:

Вариант	Стоимость оборудования	Затраты на обслуживание	Суммарные затраты
Базовый	100 %	100 %	100 %
А	180 %	150 %	165 %

Вариант	Стоимость оборудования	Затраты на обслуживание	Суммарные затраты
Б	190 %	120 %	155 %
В	250 %	200 %	225 %

5. Дополнительные мероприятия по повышению надежности

Методы повышения надежности элементов:

Элемент	Метод повышения надежности	Ожидаемый эффект
Насос	Применение магнитных муфт вместо уплотнений	Снижение λ на 30%
Подшипники	Использование керамических подшипников	Увеличение ресурса в 2 раза
Электродвигатель	Применение влагозащищенного исполнения	Снижение λ на 20%

Результаты расчетов:

Показатель	Базовый вариант	Вариант А	Вариант Б	Вариант В
Вероятность безотказной работы	0.9048	0.9810	0.9853	0.9656
Коэффициент готовности	0.995	0.999	0.999	0.998
Стоимость реализации	100%	165%	155%	225%
Сложность обслуживания	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая

Выводы и рекомендации

1. Наиболее эффективным является Вариант Б (дублирование с ненагруженным резервом) – обеспечивает надежность 0.9853 при умеренных затратах.
2. Рекомендуется дополнительно применить магнитные муфты для снижения интенсивности отказов насосов.
3. Для системы переключения предложить резервирование с периодическим контролем.
4. Установить систему мониторинга состояния оборудования для прогнозирования отказов.

Ожидаемый экономический эффект:

- Снижение потерь от аварийных простоев на 85 %;
- Увеличение межремонтного периода на 40 %;
- Сокращение затрат на экстренные ремонты на 70 %.

Вопросы для контроля

1. Какие виды резервирования наиболее эффективны для пищевого оборудования?
2. Как учитывается влияние агрессивных сред при выборе материалов?
3. Какие методы оптимизации параметров применяются в машиностроении?
4. Как оценить экономическую эффективность мероприятий по повышению надёжности?

5. В чем особенности расчёта надёжности систем с различными видами резервирования?
6. Как учитываются требования гигиенического проектирования при оптимизации параметров?
7. Какие критерии выбора материалов для деталей, работающих в условиях износа?
8. Как проверить адекватность математической модели надёжности?
9. В чем особенности проектирования надёжности для оборудования с переменными режимами работы?
10. Как учитывается возможность технического обслуживания при проектировании?

Практическая работа № 5

Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по данным диагностического контроля и оценка экономической эффективности стратегий ТОиР

Цель: получение практических умений и навыков по прогнозированию остаточного ресурса технологического оборудования на основе данных диагностического контроля, а также научиться оценивать экономическую эффективность различных стратегий технического обслуживания и ремонта.

Задание по практической работе: на основе реальных данных диагностического контроля оборудования пищевого производства провести прогнозирование остаточного ресурса, сравнить различные стратегии ТОиР и выбрать экономически оптимальный вариант обслуживания.

Методические рекомендации

Прогнозирование остаточного ресурса представляет собой сложный многокритериальный процесс, требующий комплексного подхода к анализу данных диагностического контроля. Согласно ГОСТ Р 56542-2015 «Надёжность в технике. Прогнозирование остаточного ресурса технических устройств по данным диагностирования», процедура прогнозирования должна включать следующие этапы: сбор и первичная обработка диагностической информации, выбор диагностических параметров, определение их предельных значений, построение математических моделей изменения параметров во времени, расчёт остаточного ресурса с оценкой точности прогноза.

Для пищевого оборудования особое значение имеет учет специфических факторов эксплуатации: циклических температурных нагрузок, воздействия агрессивных сред (кислот, щелочей, растворов солей), абразивного износа от частиц продукта, влияния частых моек и дезинфекции. Эти факторы существенно ускоряют процессы износа и должны быть учтены в математических моделях прогнозирования. Например, для оборудования пастеризационных установок необходимо рассматривать термическую усталость материалов, а для насосов перекачки суспензий – комбинированное воздействие абразивного износа и кавитации.

Выбор диагностических параметров должен основываться на анализе доминирующих механизмов отказа конкретного типа оборудования. Для ротор-

ных машин (центробежные насосы, вентиляторы, мешалки) наиболее информативными являются виброакустические характеристики: виброскорость, виброускорение, акустическая эмиссия. Анализ виброспектров позволяет выявить дефекты подшипников, дисбаланс ротора, вибрацию валов. Для теплообменного оборудования ключевыми параметрами являются термические характеристики: перепады температур, коэффициенты теплопередачи, гидравлическое сопротивление. Для аппаратов под давлением критически важны параметры, контролируемые ультразвуковыми методами: толщина стенок, наличие трещин и коррозии.

Методы прогнозирования остаточного ресурса можно разделить на две основные группы: детерминистические и вероятностные. Детерминистические методы основаны на экстраполяции трендов изменения диагностических параметров до достижения предельных значений. Наиболее распространены методы линейной и нелинейной регрессии, экспоненциального сглаживания, авторегрессионного моделирования. Вероятностные методы учитывают случайный характер процессов изнашивания и используют статистические распределения (Вейбулла, нормальное, логарифмически нормальное) для оценки доверительных интервалов остаточного ресурса. Для сложного оборудования целесообразно применение комбинированных методов, например, байесовское оценивание, позволяющих корректировать прогноз по мере поступления новых данных диагностики.

Определение предельных значений диагностических параметров является важным этапом прогнозирования. Эти значения устанавливаются на основе нормативной документации (ГОСТ 30575-98 «Вибрация. Нормы вибрации для машин общей назначения»), рекомендаций производителей оборудования, статистики отказов аналогичного оборудования, экспертных оценок. Для пищевого оборудования дополнительно учитываются требования санитарных норм: например, появление микротрещин на поверхностях, контактирующих с продуктом, является предельным состоянием независимо от прочностных характеристик.

Оценка экономической эффективности стратегий ТОиР требует расчёта совокупных затрат на жизненном цикле оборудования. Модель затрат включает: капитальные затраты на диагностическое оборудование и системы мониторинга, эксплуатационные расходы на проведение диагностики, затраты на плановые ремонты и техническое обслуживание, потери от внеплановых простоев, затраты на запасные части, утилизацию оборудования. Для пищевого производства особое значение имеют потери продукции при простоях и затраты на переналадку технологических линий. Экономическая эффективность оценивается с помощью показателей: чистая приведенная стоимость, внутренняя норма доходности, возврат инвестиций.

Задание для выполнения

1. Проанализировать данные диагностического контроля оборудования.
2. Построить тренды изменения диагностических параметров во времени.
3. Определить предельные значения диагностических параметров.

4. Провести прогнозирование остаточного ресурса детерминистическим методом.

5. Оценить остаточный ресурс вероятностным методом с учетом статистики отказов.

6. Рассчитать затраты для различных стратегий ТОиР (по состоянию, по регламенту, по отказу).

7. Сравнить экономическую эффективность стратегий ТОиР.

8. Выбрать оптимальную стратегию обслуживания.

9. Разработать график диагностических проверок.

10. Подготовить отчет с обоснованием выбранной стратегии.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант 1

Для центробежного насоса:

- Исходный зазор в подшипнике: 0.1 мм;
- Предельный зазор: 0.5 мм;
- Данные измерений зазора (мм): 0.12, 0.15, 0.18, 0.22, 0.26, 0.31, 0.37, 0.44;
- Период измерений: 8 месяцев;
- Стоимость планового ремонта: 50 тыс. руб.;
- Стоимость аварийного ремонта: 200 тыс. руб.;
- Потери от простоя: 10 тыс. руб./ч.

Вариант 2

Для редуктора цилиндрического:

- Уровень вибрации на начало эксплуатации: 1.5 мм/с;
- Предельный уровень вибрации: 7.0 мм/с;
- Данные вибромониторинга (мм/с): 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 4.0, 4.8, 5.7;
- Время между измерениями: 2 месяца;
- Стоимость ТО: 15 тыс. руб.;
- Стоимость замены подшипников: 80 тыс. руб.;
- Ущерб от аварийного останова: 150 тыс. руб.

Вариант 3

Для гидравлического пресса:

- Температура масла норма: 45 °С;
- Предельная температура: 85 °С;
- Данные температурного контроля (°С): 48, 52, 57, 63, 70, 78;
- Период контроля: 3 месяца;
- Затраты на очистку системы: 25 тыс. руб.;
- Затраты на капитальный ремонт: 120 тыс. руб.;

- Потери при простое: 8 тыс. руб./ч.

Вариант 4

Для компрессорной установки:

- Производительность на начало эксплуатации: 100 %;
- Предельное снижение производительности: 70 %;
- Данные по производительности (%): 95, 90, 85, 80, 76, 73;
- Время между измерениями: 1 месяц;
- Стоимость обслуживания: 20 тыс. руб.;
- Стоимость ремонта: 90 тыс. руб.;
- Ущерб от отказа: 100 тыс. руб.

Вариант 5

Для транспортерной ленты:

- Толщина ленты новая: 12 мм;
- Предельная толщина: 6 мм;
- Данные измерений толщины (мм): 11.5, 11.0, 10.4, 9.7, 8.9, 8.0, 7.0;
- Период измерений: 7 недель;
- Стоимость профилактической замены: 40 тыс. руб.;
- Стоимость аварийной замены: 110 тыс. руб.;
- Потери от простоя: 12 тыс. руб./ч.

Общий алгоритм выполнения заданий:

1. Обработка диагностических данных:
 - Построение тренда изменения параметра;
 - Определение уравнения регрессии;
 - Расчет скорости изменения параметра.
2. Прогнозирование остаточного ресурса:
 - Определение времени достижения предельного значения;
 - Расчет доверительных интервалов прогноза;
 - Оценка точности прогнозирования.
3. Расчет затрат для различных стратегий ТоиР:
 - Стратегия по состоянию (прогнозная);
 - Стратегия по регламенту (периодическая);
 - Стратегия по отказу (реактивная).
4. Сравнительный анализ экономической эффективности:
 - Расчет суммарных затрат для каждой стратегии;
 - Учет рисков и неопределенностей;
 - Выбор оптимальной стратегии.
5. Разработка рекомендаций:
 - Формирование графика обслуживания;
 - Определение критических параметров контроля;

- Планирование ресурсов на ремонт.

Пример выполнения задания

Исходные данные.

Центробежный насос:

- Исходный зазор: 0.1 мм;
- Предельный зазор: 0.5 мм;
- Данные измерений зазора (мм): 0.12, 0.15, 0.18, 0.22, 0.26, 0.31, 0.37, 0.44;
- Период измерений: 8 месяцев;
- Стоимость планового ремонта: 50 тыс. руб.;
- Стоимость аварийного ремонта: 200 тыс. руб.;
- Потери от простоя: 10 тыс. руб./ч.

Решение

1. Обработка диагностических данных:

Месяц	Зазор, мм	Приращение, мм/мес
0	0.10	-
1	0.12	0.02
2	0.15	0.03
3	0.18	0.03
4	0.22	0.04
5	0.26	0.04
6	0.31	0.05
7	0.37	0.06
8	0.44	0.07

Уравнение тренда: $y = 0.045x + 0.095$.

$R^2 = 0.983$ (высокая достоверность).

2. Прогнозирование остаточного ресурса.

Время достижения предельного зазора (0.5 мм):

$$0.5 = 0.045x + 0.095;$$

$$x = (0.5 - 0.095)/0.045 = 9 \text{ месяцев.}$$

Остаточный ресурс: $9 - 8 = 1$ месяц.

Доверительный интервал (95 %):

- Нижняя граница: 0.8 месяца;
- Верхняя граница: 1.3 месяца.

3. Расчет затрат для различных стратегий.

Стратегия А – Обслуживание по состоянию:

- Затраты на диагностику: 5 тыс. руб./мес $\times$ 9 мес = 45 тыс. руб.
- Плановый ремонт: 50 тыс. руб.
- Простой: 8 часов $\times$ 10 тыс. руб./час = 80 тыс. руб.
- Итого: 175 тыс. руб.

Стратегия Б – Регламентное обслуживание (раз в 6 месяцев):

- Количество ремонтов: 2;
- Затраты на ремонты: 2 $\times$ 50 тыс. руб. = 100 тыс. руб.;
- Простой: 2 $\times$ 8 час $\times$ 10 тыс. руб./час = 160 тыс. руб.;
- Итого: 260 тыс. руб.

Стратегия В – Обслуживание по отказу.

- Аварийный ремонт: 200 тыс. руб.
- Простой: 24 часа $\times$ 10 тыс. руб./час = 240 тыс. руб.
- Итого: 440 тыс. руб.

4. Сравнительный анализ.

Стратегия ТОиР	Суммарные затраты, тыс. руб.	Риск аварийного отказа	Эффективность
По состоянию	175	Низкий	Высокая
По регламенту	260	Средний	Средняя
По отказу	440	Высокий	Низкая

5. Экономический эффект.

Эффективность стратегии по состоянию:

- Экономия относительно регламентной: 260 - 175 = 85 тыс. руб. (32.7 %).
- Экономия относительно стратегии по отказу: 440 - 175 = 265 тыс. руб. (60.2 %).

Результаты прогнозирования:

Показатель	Значение
Текущий зазор	0.44 мм
Предельный зазор	0.50 мм
Скорость износа	0.045 мм/мес
Остаточный ресурс	1 месяц
Рекомендуемый срок ремонта	через 3-4 недели

Рекомендации по техническому обслуживанию:

Мероприятие	Срок выполнения	Ожидаемый эффект
Контроль зазора	Еженедельно	Уточнение прогноза
Анализ масла	При очередном контроле	Выявление абразивного износа
Балансировка ротора	При ремонте	Снижение вибрации
Замена подшипников	Через 1 месяц	Предотвращение аварии

Выводы

1. Рекомендуется стратегия технического обслуживания по состоянию.
2. Плановый ремонт необходимо выполнить через 3–4 недели.
3. Экономический эффект от внедрения прогнозной стратегии составляет 85–265 тыс. руб.
4. Для уточнения прогноза рекомендуется увеличить частоту диагностических измерений.
5. Целесообразно внедрить систему непрерывного мониторинга вибрации.

Контрольные вопросы

1. Какие нормативные документы регламентируют процедуру прогнозирования остаточного ресурса в РФ?
2. Как выбрать оптимальный набор диагностических параметров для конкретного типа оборудования?
3. В чем особенности определения предельных значений параметров для пищевого оборудования?
4. Какие математические методы наиболее эффективны для прогнозирования ресурса при наличии ограниченного объёма данных?
5. Как учитывается влияние агрессивных сред в моделях прогнозирования ресурса?
6. Какие экономические показатели наиболее объективно отражают эффективность стратегий ТОиР?
7. Как оценить потери от простоя оборудования при различных сценариях отказа?
8. В чем преимущества и недостатки стратегии обслуживания по состоянию для пищевого производства?
9. Как оптимизировать периодичность диагностических проверок с учетом экономических факторов?
10. Какие программные комплексы наиболее эффективны для решения задач прогнозирования ресурса?

Практическая работа № 6

Расчёт суммарных затрат на жизненный цикл машины и обоснование решений по модернизации или замене оборудования

Цель: получение практических умений и навыков по расчёту суммарных затрат на жизненном цикле технологического оборудования и обоснованию решений по модернизации или замене на основе технико-экономического ана-

лиза.

Задание по практической работе: провести краткий расчёт суммарных затрат на жизненном цикле действующего оборудования пищевого производства, сравнить варианты модернизации и замены, выбрать оптимальное решение на основе комплексного технико-экономического анализа.

Методические рекомендации

Методология расчёта затрат на жизненном цикле (Life Cycle Costing – LCC) является ключевым инструментом принятия обоснованных решений при управлении промышленным оборудованием. Согласно международному стандарту ISO 15686-5, LCC представляет собой методику системной оценки всех затрат, связанных с приобретением, владением и утилизацией объекта на протяжении всего периода его эксплуатации. Для пищевого оборудования расчёт LCC имеет особую значимость вследствие высоких требований к безопасности продукции, необходимости соблюдения санитарных норм и постоянного ужесточения экологических стандартов.

Структура затрат жизненного цикла для технологического оборудования пищевой промышленности включает несколько основных компонентов. Капитальные затраты состоят из первоначальной стоимости оборудования, расходов на доставку и монтаж, затрат на пуско-наладочные работы, стоимости вспомогательных систем и инфраструктуры. Особенностью пищевого оборудования является необходимость учета затрат на получение гигиенических сертификатов и разрешений. Эксплуатационные затраты включают расходы на энергоресурсы, технологические материалы, плановое техническое обслуживание, заработную плату оперативного персонала, технический надзор и страхование. Для пищевых производств значительную долю таких затрат составляют затраты на мойку и дезинфекцию, контроль качества, сертификацию продукции.

Затраты на техническое обслуживание и ремонты рассчитываются на основе статистики отказов и включают стоимость запасных частей, материалов, труда ремонтного персонала, а также потери от простоев оборудования. Особое внимание уделяется расчёту затрат, связанных с соблюдением требований пищевой безопасности: расходы на периодическую замену контактирующих с продуктом поверхностей, модернизацию для соответствия новым санитарным нормам. Затраты на утилизацию учитывают демонтаж оборудования, транспортировку, переработку или захоронение, экологические платежи.

Методика сравнения вариантов модернизации или замены оборудования основана на дисконтировании денежных потоков. Расчёт чистой приведенной стоимости позволяет объективно сравнить варианты с разными сроками реализации и различным распределением затрат во времени. Для пищевого оборудования при расчёте необходимо учитывать риски, связанные с возможностью порчи продукции при отказах, репутационные потери, штрафы за нарушение санитарных норм. Анализ чувствительности помогает выявить наиболее критичные параметры, влияющие на экономическую эффективность решения.

Задание для самостоятельного выполнения

1. Собрать исходные данные по действующему оборудованию: возраст, техническое состояние, история ремонтов.
2. Рассчитать затраты на дальнейшую эксплуатацию существующего оборудования.
3. Разработать техническое задание на модернизацию с оценкой затрат и эффекта.
4. Подобрать варианты нового оборудования-аналога с расчётом капитальных затрат.
5. Построить денежные потоки для каждого варианта на периоде планирования.
6. Рассчитать показатели экономической эффективности: NPV, IRR, PP, ROI.
7. Провести анализ чувствительности по ключевым параметрам.
8. Оценить риски реализации каждого варианта.
9. Выполнить сравнительный анализ вариантов по техническим и экономическим критериям.
10. Подготовить обоснование выбранного решения.

Варианты индивидуальных заданий

Вариант 1

Для насосного агрегата:

- Первоначальная стоимость: 500 тыс. руб.;
- Срок эксплуатации: 8 лет;
- Годовые затраты на ТО: 50 тыс. руб.;
- Затраты на электроэнергию: 120 тыс. руб./год;
- Стоимость модернизации: 200 тыс. руб. (снизит затраты на ТО на 40 %);
- Стоимость нового оборудования: 600 тыс. руб. (снизит энергозатраты на 30 %).

Вариант 2

Для компрессорной станции:

- Стоимость оборудования: 1.2 млн руб.;
- Срок службы: 10 лет;
- Затраты на обслуживание: 80 тыс. руб./год;
- Затраты на ремонты: 60 тыс. руб./год (ежегодный рост 15 %);
- Вариант модернизации: 300 тыс. руб. (снизит затраты на ремонты на 50%);
- Новое оборудование: 1.5 млн руб. (снизит эксплуатационные затраты на 60 %).

Вариант 3

Для конвейерной линии:

- Первоначальные инвестиции: 800 тыс. руб.;

- Плановый срок службы: 12 лет;
- Энергопотребление: 150 тыс. руб./год;
- Затраты на ТОиР: 70 тыс. руб./год;
- Модернизация приводов: 250 тыс. руб. (снизит энергопотребление на 25 %);
- Замена линии: 1.1 млн руб. (снизит эксплуатационные затраты на 40 %).

Вариант 4

Для холодильной установки:

- Стоимость: 400 тыс. руб.
- Срок эксплуатации: 6 лет.
- Затраты на хладагент: 40 тыс. руб./год.
- Затраты на обслуживание: 35 тыс. руб./год.
- Модернизация системы: 120 тыс. руб. (снизит затраты на хладагент на 30 %).
- Новая установка: 550 тыс. руб. (снизит эксплуатационные затраты на 50 %).

Вариант 5

Для упаковочного автомата:

- Цена оборудования: 350 тыс. руб.
- Срок службы: 7 лет;
- Затраты на материалы: 90 тыс. руб./год;
- Затраты на ремонты: 45 тыс. руб./год;
- Модернизация: 100 тыс. руб. (снизит затраты на материалы на 20 %);
- Новый автомат: 480 тыс. руб. (снизит эксплуатационные затраты на 35 %).

Общий алгоритм выполнения заданий

1. Сбор и анализ исходных данных:
 - Определение текущего состояния оборудования;
 - Анализ эксплуатационных затрат;
 - Оценка остаточного ресурса.
2. Расчет затрат на жизненный цикл для текущего оборудования:
 - Капитальные затраты (амортизация);
 - Эксплуатационные расходы;
 - Затраты на техническое обслуживание и ремонты;
 - Затраты на утилизацию.
3. Расчет экономической эффективности модернизации:
 - Затраты на модернизацию;
 - Снижение эксплуатационных расходов;
 - Расчет срока окупаемости;
 - Оценка NPV и IRR.
4. Сравнительный анализ варианта замены оборудования:

- Первоначальные инвестиции;
 - Эксплуатационные преимущества;
 - Расчет суммарных затрат жизненного цикла;
 - Анализ экономической эффективности.
5. Принятие решения и формирование рекомендаций:
- Сравнение вариантов по экономическим показателям;
 - Учет технических и эксплуатационных факторов;
 - Разработка плана реализации.

Пример выполнения задания

Исходные данные.

Насосный агрегат:

- Первоначальная стоимость: 500 тыс. руб.;
- Срок эксплуатации: 8 лет;
- Годовые затраты на ТО: 50 тыс. руб.;
- Затраты на электроэнергию: 120 тыс. руб./год;
- Стоимость модернизации: 200 тыс. руб. (снизит затраты на ТО на 40 %);
- Стоимость нового оборудования: 600 тыс. руб. (снизит энергозатраты на 30 %);
- Ставка дисконтирования: 10 %.

Решение

1. Расчет затрат на жизненный цикл текущего оборудования.

Год	Капзатраты	ТО	Энергия	Всего	Дисконтированный поток
1	62.5	50	120	232.5	211.4
2	62.5	50	120	232.5	192.2
3	62.5	50	120	232.5	174.7
4	62.5	50	120	232.5	158.8
5	62.5	50	120	232.5	144.4
6	62.5	50	120	232.5	131.3
7	62.5	50	120	232.5	119.3
8	62.5	50	120	232.5	108.5
Итого	500	400	960	1860	1240.6

2. Расчет эффективности модернизации.

Затраты после модернизации:

- ТО: $50 \times 0.6 = 30$ тыс. руб./год;
- Энергия: 120 тыс. руб./год (без изменений).

Показатель	Значение
Затраты на модернизацию	200 тыс. руб.
Экономия на ТО в год	20 тыс. руб.
Срок окупаемости	4.3 года
NPV	18.5 тыс. руб.
IRR	12.5%

3. Анализ варианта замены оборудования.

Затраты нового оборудования:

- ТО: 50 тыс. руб./год;
- Энергия: $120 \times 0.7 = 84$ тыс. руб./год.

Год	Капзатраты	ТО	Энергия	Всего	Дисконтированный поток
1	75.0	50	84	209.0	190.0
2	75.0	50	84	209.0	172.7
3	75.0	50	84	209.0	157.0
4	75.0	50	84	209.0	142.7
5	75.0	50	84	209.0	129.8
6	75.0	50	84	209.0	118.0
7	75.0	50	84	209.0	107.3
8	75.0	50	84	209.0	97.5
Итого	600	400	672	1672	1115.0

4. Сравнительный анализ вариантов.

Показатель	Текущее оборудование	Модернизация	Замена
Суммарные затраты LCC, тыс. руб.	1860	1660	1672
Дисконтированные затраты, тыс. руб.	1240.6	1135.2	1115.0
NPV, тыс. руб.	-	18.5	125.6
Срок окупаемости, лет	-	4.3	3.8
Годовая экономия, тыс. руб.	-	20	47.5

Технико-экономическое обоснование:

Критерий	Текущее оборудование	Модернизация	Замена
Экономическая эффективность	Низкая	Средняя	Высокая
Технический уровень	Устаревший	Улучшенный	Современный
Риски эксплуатации	Высокие	Средние	Низкие
Перспективы развития	Ограниченные	Умеренные	Широкие

Рекомендации по реализации:

1. Приоритетный вариант: Замена оборудования.
2. Срок реализации: 6–8 месяцев.
3. Источник финансирования: Собственные средства или кредит.
4. Ожидаемый эффект:
 - Годовая экономия: 47.5 тыс. руб.;
 - Срок окупаемости: 3.8 года;
 - NPV: 125.6 тыс. руб.

Выводы

1. Наиболее экономически эффективным является вариант замены оборудования.
2. Суммарная экономия за жизненный цикл составит 188 тыс. руб.
3. Модернизация является компромиссным вариантом при ограниченном бюджете.
4. Рекомендуется рассмотреть возможность лизинга для минимизации первоначальных инвестиций.

Вопросы для контроля

1. Какие нормативные документы регламентируют методику расчёта LCC в РФ?
2. Как учитывается моральный износ оборудования при сравнении вариантов?
3. В чем особенности расчёта затрат на утилизацию пищевого оборудования?
4. Как оценить экономический эффект от повышения производительности после модернизации?
5. Какие риски наиболее значимы для пищевого производства при замене оборудования?
6. Как учитываются затраты на адаптацию инфраструктуры при модернизации?
7. В чем отличие расчёта NPV для проектов модернизации и замены оборудования?
8. Как оценить экономические последствия нарушения санитарных норм?
9. Какие программные средства наиболее эффективны для расчёта LCC?
10. Какова типовая структура затрат LCC для пищевого оборудования?

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Согласно учебному плану дисциплины «Основы надёжности и долговечности технологических машин» направления 15.03.02 Технологические машины и оборудование, для студентов заочной формы обучения предусмотрено выполнение контрольной работы.

Работа должна быть выполнена на листах формата А4 с одной стороны листа, в печатном варианте. Шрифт текстовой части размер – 12 (для заголовков – 14), вид шрифта – Times New Roman, интервал 1,5. Поля страницы: левое – 3 см, правое – 1,5 см., верхнее и нижнее – 2 см. Нумерация страниц внизу справа.

Структура контрольной работы:

- титульный лист (приложение А)
- введение
- содержание
- текстовая часть (каждый вопрос начинать с нового листа)
- выводы
- список используемой литературы (оформляется в соответствии с ГОСТ 7.001-2003, ГОСТ 7.82-2001).

В текстовой части не допускается сокращение слов. Объем выполненной работы не должен превышать 15 листов формата А4.

Контрольная работа должна быть оформлена в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контрольным работам:

- текст должен быть отпечатан на компьютере и принтере;
- основной текст подразделяется на озаглавленные части в соответствии с содержанием работы. Заглавия не подчеркиваются, в конце заголовка точка не ставится, переносы допускаются;
- страницы текста пронумерованы арабскими цифрами в правом верхнем углу без точек. Титульный лист считается первым и не нумеруется;
- на каждой странице оставлены поля для замечаний рецензента;
- список использованных источников оформляются по соответствующим требованиям.

Стиль и язык изложения материала контрольной работы должны быть четкими, ясными и грамотными. Грамматические и синтаксические ошибки недопустимы. Выполненная контрольная работа представляется для регистрации на кафедру, затем поступает на рецензирование преподавателю.

Задание по контрольной работе направлено на формирование навыков анализа надёжности и долговечности технологического оборудования, а также разработке проектных и производственных мероприятий, направленных на увеличение срока службы машин.

Положительная оценка «зачтено» выставляется при решении поставленной задачи, если расчёты проведены верно, составлены правильные схемы, или получены неверные схемы из-за ошибок в обозначении, но при этом имеется верная последовательность всех шагов решения.

Контрольная работа с оценкой «не зачтено» возвращается студенту с рецензией, выполняется студентом вновь и сдается вместе с не зачтенной работой на проверку преподавателю. Контрольная работа, выполненная не по своему варианту, возвращается без проверки и зачета.

Задание по контрольной работе предусматривает ответ на два вопроса, что позволяет расширить теоретические знания об особенностях улучшения надёжности и долговечности технологических машин.

Положительная оценка «зачтено» выставляется в зависимости от полноты

раскрытия вопроса и объема предоставленного материала в контрольной работе, а также степени его усвоения, которая выявляется при ее защите (умение использовать при ответе на вопросы научную терминологию, лингвистически и логически правильно отвечать на вопросы по проработанному материалу).

Типовые вопросы для выполнения контрольной работы приведены ниже:

1. Надежность как наука. Предмет надежности. Объект исследования надежности. История развития теории надежности.

2. Основные понятия надежности (работоспособность, отказ, повреждение, сбой, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость).

3. Состояние объекта (исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, предельное). Отказ. Виды отказов. Ремонтируемые и неремонтируемые объекты.

4. Жизненный цикл объекта. Стадии.

5. Показатели для оценки безотказности.

6. Показатели для оценки долговечности.

7. Показатели для оценки ремонтпригодности.

8. Показатели для оценки сохраняемости. Комплексные показатели надежности.

9. Получение информации о надежности машин. Требования к информации. Нормирование показателей надежности (классы надежности).

10. Математические основы надежности. Характеристики случайных величин (среднее арифметическое значение, размах, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации), функции (функция распределения случайной величины, плотность распределения).

11. Нормальное распределение.

12. Экспоненциальное распределение.

13. Распределение Вейбулла.

14. Основы надежности сложных систем. Элементы сложной машины. Структура сложных систем.

15. Расчет надежности системы при последовательном и параллельном соединении ее элементов.

16. Резервирование. Классификация.

17. Изнашивание. Виды трения. Виды изнашивания.

18. Характеристики изнашивания.

19. Методы определения износа.

20. Коррозионные разрушения. Виды коррозии. Методы борьбы с коррозией.

21. Основные понятия технической диагностики (диагностика, структурный параметр, диагностический параметр). Задачи технической диагностики.

22. Методы и виды диагностирования (органолептические и инструментальные).

23. Средства диагностирования (внешние, встроенные, устанавливаемые).

24. Методы получения информации о надежности оборудования (расчетные, экспериментальные и расчетно-экспериментальные методы).

25. Классификация испытаний (определятельные, контрольные, исследовательские (стендовые, полигонные, эксплуатационные)).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щурин, К. В. Надежность машин: учеб. пособие / К. В. Щурин. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 592 с.
2. Проектирование технологических машин: учебное пособие / Б. Ф. Зюзин, А. И. Жигульская, С. Д. Семеев, В. М. Шпынев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тверь: ТвГТУ, 2020. – 112 с.
3. Колобов, А. Б. Прочностная надежность и долговечность деталей машин и конструкций: учеб. пособие / А. Б. Колобов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 192 с.
4. Феофанов, А.Н. Техническое обслуживание, ремонт и испытание мехатронных систем: учебник / А. Н. Феофанов, Т. Г. Гришина. – Москва: Академия, 2018. – 302 с.
5. Остяков, Ю. А. Проектирование деталей и узлов конкурентоспособных машин: учеб. пособие / Ю. А. Остяков, И. В. Шевченко. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 336 с.
6. Лейбенко, В. Г. Проектирование деталей машин: учеб. пособие / В. Г. Лейбенко. – 2-е изд., доработ. – Москва: РТУ МИРЭА, 2019. – 78 с.
6. Макаров, В. А. Пневматические и гидравлические мехатронные системы: учеб. пособие / В. А. Макаров, Ф. А. Королев. – Москва: РТУ МИРЭА, 2021. – 71 с.
7. Белоконов, И. В. Статистический анализ динамических систем: учеб. пособие / И. В. Белоконов, Л. И. Сеницын. – Самара: Самарский университет, 2024. – 116 с.
8. Петрова, С. С. Многомерный статистический анализ: учебное пособие / С. С. Петрова, А. Н. Хаглеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Улан-Удэ: ВСГУТУ, 2018. – 112 с.
9. Леонтьев, Л. Б. Системное проектирование технологических процессов изготовления и восстановления деталей и узлов машин: учебник / Л. Б. Леонтьев. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 380 с.
10. Игнатьев, В. Ю. Трехмерное моделирование и прочностные расчеты в АРМ WinMachine: практикум: учеб. пособие / В. Ю. Игнатьев, Д. С. Воронцов; под ред. В. А. Глотова. – Новосибирск: СГУПС, 2021. – 115 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Институт агроинженерии и пищевых систем
Кафедра инжиниринга технологического оборудования

Контрольная работа
допущена к защите:
должность (звание), ученая степень
_____ Фамилия И.О.
«__» _____ 202__ г.

Контрольная работа
защищена
должность (звание), ученая степень
_____ Фамилия И.О.
«__» _____ 202__ г.

Контрольная работа

по дисциплине
ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН
Шифр студента _____
Вариант № _____

Работу выполнил:
студент гр. _____
_____ Фамилия И.О.
«__» _____ 202__ г.

Локальный электронный методический материал

Олег Вячеславович Агеев

ОСНОВЫ НАДЁЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Редактор С. Кондрашова

Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 6,2. Печ. л. 4,9.

Издательство федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»,
236022, Калининград, Советский проспект, 1