

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования**

**«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ**

кандидатского экзамена

по направлению подготовки 15.06.01 – Машиностроение,  
направленность 05.02.04 – Трение и износ в машинах

---

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящая программа базируется на следующих разделах: основные понятия, термины и история развития трибологии; механические и физико-химические свойства поверхностей; геометрические характеристики поверхностей и их контактное взаимодействие; трение и изнашивание твердых тел, смазка; тепловые процессы при трении, изнашивании и смазке; моделирование процессов трения, изнашивания и смазки; триботехнические материалы и триботехнологии; смазочные материалы; методы и средства испытания на трение и износ; принципы конструирования узлов трения и экологические и экономические аспекты трибологии.

Программа разработана экспертным советом Высшей аттестационной комиссии Минобразования России по машиностроению при участии Государственного унитарного предприятия "Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта", Института машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Российского Государственного университета нефти и газа им И.М. Губкина, Ростовского Государственного университета путей сообщения и Брянского Государственного технического университета.

### **1 ВВОДНЫЙ РАЗДЕЛ**

Основные понятия, термины и определения. Сведения об истории развития трибологии.

### **2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕХАНИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Основы теории твердого тела. Понятие о диаграммах состояния. Силы

связей в твердых телах. Изменение свойств твердых тел в зависимости от температуры.

Упругие свойства кристаллов. Модули упругости и упругие постоянные. Теоретическая и реальная прочность кристаллов. Дефекты в кристаллах.

Механические свойства материалов. Свойства при динамическом нагружении. Пластическая деформация, упрочнение при пластическом деформировании. Сверхпластичность металлов.

Виды разрушения. Механизмы зарождения трещин. Вязкое, хрупкое разрушение. Явление несовершенной упругости. Упругий гистерезис и последействие. Эффект Баушингера. Релаксация напряжений. Ползучесть, усталость.

Диффузия в твердых телах. Законы диффузии.

Поверхность твердых тел. Особенности строения и состава поверхностных слоев. Поверхностная энергия.

Сорбционные процессы. Физическая адсорбция и хемосорбция. Адсорбционное облегчение деформации. Адгезия и когезия. Виды адгезионного взаимодействия. Пленки на поверхностях твердых тел и механизмы их образования. Дисперсные системы.

Неметаллические материалы. Особенности структуры и свойств полимеров. Композиционные материалы.

### **3 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ И КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

#### *3.1 Геометрические характеристики поверхностей твердых тел*

Общие представления о реальной топографии поверхностей трения. Методы описание поверхностей твердых тел. Виды неровностей поверхностей деталей машин. Характеристики микрогеометрии поверхностей. Методы измерения микрогеометрии.

### *3.2 Контактное взаимодействие твердых тел*

Механика контактного взаимодействия твердых тел. Контактная задача Герца. Эпюры распределения напряжений. Контакт упругих тел при наличии трения. Контакт тел за пределами упругости.

Дискретность контакта. Микро- и макро- масштабный уровень рассмотрения характеристик дискретного контакта. Номинальная, контурная и фактическая площади касания. Сближение поверхностей под нагрузкой. Понятие о ненасыщенном и насыщенном контакте. Механика контактного взаимодействия твердых тел с шероховатыми поверхностями.

Методы расчета фактической площади касания. Соотношения между фактическими площадями контакта и сближением контактирующих тел в неподвижном состоянии и при скольжении. Экспериментальные способы определения фактических площадей касания и сближений.

Деформация шероховатых волн. Расчет номинального давления и площади контакта с учетом параметров шероховатости, волнистости и макроотклонений.

## **4 ТРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

### *4.1 Внешнее трение*

Основные положения и развитие теории внешнего трения. Виды фрикционного взаимодействия. Трение скольжения, качения и верчения. Трение покоя. Предварительное смещение твердых тел при внешнем трении. Предварительное смещение при упругих и пластических деформациях в зонах контакта микронеровностей. Механизмы диссипации энергии при фрикционном взаимодействии.

#### *4.2 Силы и коэффициенты внешнего трения*

Определение сил и коэффициентов внешнего трения при упругих и пластических деформациях в зоне контакта микронеровностей. Зависимости коэффициента внешнего трения от вида контакта, нагрузки, температуры, скорости скольжения, свойств материалов пары трения.

#### *4.3 Динамические процессы при трении*

Динамические процессы при скольжении твердых тел без смазочного материала. Влияние внешних вибраций на процесс трения. Фрикционные автоколебания. Устойчивость скольжения при трении твердых тел.

#### *4.4 Трение качения*

Трение качения и верчения. Природа трения качения. Качение упругих тел. Сцепление и проскальзывание при качении. Зависимость между тангенциальной силой и относительным проскальзыванием. Распределение нормальных и тангенциальных напряжений. Влияние тангенциального усилия в контакте на границы упругого и пластического поведения материала (диаграмма приспособляемости материала).

Качение тел, обладающих свойствами релаксации и последействия. Особенности свободного качения, с тормозным и тяговым моментом.

Опоры качения. Контактная прочность. Долговечность опор качения.

## **5 ИЗНАШИВАНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Классификация видов изнашивания. Количественные характеристики изнашивания. Износостойкость и классы износостойкости. Основные закономерности изнашивания. Модели и кинетика разрушения фрикционного контакта. Влияние различных факторов на износостойкость. Изменение вида разрушения

поверхностей при трении в зависимости от режимов работы (приработка, установившийся и форсированные режимы). Особенности изнашивания полимерных материалов.

Термодинамический подход к разрушению и изнашиванию твердых тел. Характеристика основных видов изнашивания: абразивное, гидроабразивное, кавитационное, усталостное, окислительное, при схватывании (заедании), при фреттинге, электроэрозионное, водородное, при избирательном переносе.

Основы расчета узлов трения на износ. Расчет формоизменения сопряженных тел при изнашивании.

Методы повышения износостойкости узлов трения.

## 6 СМАЗКА

### *6.1 Виды смазки*

Классификация видов смазки (смазочного действия). Основные признаки, характеризующие виды смазки.

### *6.2 Жидкостная смазка*

Виды жидкостной смазки: гидродинамическая, гидростатическая, гидростатодинамическая, эластогидродинамическая.

Гидродинамическая смазка. Основные уравнения теории гидродинамической смазки. Уравнение Рейнольдса и граничные условия. Уравнения переноса теплоты. Изотермическая и неизотермическая задачи теории гидродинамической смазки.

Расчет стационарно-нагруженных подшипников скольжения. Несущая способность, потери на трение в смазочном слое. Тепловой баланс.

Нестационарно-нагруженные подшипники скольжения. Система уравнений движения вала, течения смазочного материала, переноса теплоты. Критерии оценки работоспособности подшипников скольжения.

Гидродинамическая неустойчивость высокоскоростных подшипников скольжения.

Эластогидродинамическая смазка. Уравнения течения смазки и упругости. Зависимость вязкости смазочного материала от температуры и давления. Толщина смазочного слоя. Газовая смазка.

### *6.3 Граничная смазка*

Граничная смазка. Природа и строение граничных слоев. Закономерности процессов при граничной смазке. Влияние смазочного материала, температуры, скорости скольжения, шероховатости поверхностей трения на процессы при граничной смазке. Долговечность граничных слоев. Переходные температуры при граничной смазке и температурно-кинетический метод их оценки. Изнашивание при граничной смазке. Подход к подбору смазочных материалов по критерию предельной температуры.

Специфические методы организации граничной смазки: избирательный перенос (эффект безизносности), эффект трибополимеризации.

### *6.4 Трение, износ, смазка в экстремальных условиях*

Трение, износ и смазка в экстремальных условиях. Влияние низких и высоких температур при трении. Воздействие радиации, вакуума, газовой среды, электромагнитных полей. Трибологические проблемы в космосе.

Трение сопровождаемое током.

## **7 ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТРЕНИИ, ИЗНАШИВАНИИ И СМАЗКЕ**

Тепловые задачи при трении и изнашивании твердых тел. Общая постановка задачи теплопроводности при трении. Три основных режима трения: стационарный, нестационарный, квазистационарный. Влияние температуры на трибологические характеристики пар трения.

Расчет температур при стационарном режиме трения. Определение поля температур, средней температуры поверхности трения и температурной вспышки при нестационарном режиме трения. Коэффициент распределения тепловых потоков. Расчет объемной температуры при повторно-кратковременном режиме трения.

Тепловая динамика трения и износа твердых тел. Определение интенсивности изнашивания при трении с учетом тепловых процессов.

## **8 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ, ИЗНАШИВАНИЯ И СМАЗКИ**

Физическое моделирование процессов трения, изнашивания и смазки. Трибологические системы. Виды подобия в трибосистемах. Метод анализа размерностей и его использование при моделировании процессов трения и изнашивания.

Сложные трибосистемы. Методология и математическое моделирование сложных трибосистем.



## **9 ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТРИБОТЕХНОЛОГИИ**

### *9.1 Триботехнические конструкционные материалы*

Совместимость трибосистем. Выбор конструкционных материалов трибосистем с учетом их совместимости.

Понятие о самоорганизации трибосистем. Принципы создания новых материалов на основе структурной приспособляемости и самоорганизации трибосистем.

Металлические материалы для узлов трения различного назначения. Рекомендуемые области использования антифрикционных сплавов. Порошковые, керамические композиционные материалы для антифрикционных и фрикционных узлов трения.

Полимерные и металлополимерные композиционные материалы для подшипников, опор скольжения, тормозов в муфт сцепления.

### *9.2 Триботехнологии*

Виды износостойких покрытий и упрочнения поверхностных слоев. Наплавка износостойких слоев. Напыление износостойких покрытий из порошковых материалов. Лазерное упрочнение. Упрочнение ионно-плазменной обработкой. Диффузионные покрытия. Механотермическое формирование износостойких покрытий. Электрохимические покрытия.

## **10 СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Классификации смазочных материалов: по агрегатному состоянию, происхождению, способу получения, назначению. Жидкие смазочные материалы. Состав, эксплуатационные свойства и ассортимент масел. Базовые масла. Функциональные присадки, антифрикционные добавки к маслам.

Пластичные смазочные материалы. Состав, эксплуатационные свойства и ассортимент пластичных смазок.

Твердые смазочные материалы.

## **11 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС**

Трибометрия и трибодиагностика. Цикл триботехнических испытаний. Испытательная техника для трибологических испытаний и исследований пар трения. Особенности триботехнических испытаний смазочных материалов. Планирование экспериментов при оценке трения и износа.

## **12 ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Основы проектирования, подбора материалов и конструктивного оформления узлов трения. Принцип геометрической оптимизации трибосистем. Выбор рационального нагружения элементов пар трения. Обеспечение необходимого режима смазки узлов трения с разными видами смазочных материалов. Тепловые режимы в технических системах. Оценка вероятности безотказной работы и прогнозирование ресурса узлов трения.

## **13 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТРИБОЛОГИИ**

Трибологические источники загрязнений окружающей среды. Направление работ для улучшения экологических и экономических показателей работы машин. Методики оценки экономической эффективности и экологической чистоты технических систем.

### Основная литература



1. Богданович П. Н., Прушак В. Я. Богданович С. П. Трение и износ в машинах: учебн. для техн. вузов. Минск: Тэхналогія, 2011. 528 с.
2. Гаркунов Д. Н., Мельников Э. Л., Гаврилюк В. С. Триботехника. Краткий курс. М.: Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2008, 344 с.
3. Григорий Рошин, Евгений Самойлов. Детали машин и основы конструирования.: М.: Юрайт, 2013. 356 с.
4. Когаев В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
5. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техника, 1971. 396 с
6. Костецкий Б. И. Фундаментальные закономерности трения и износа.- Киев: Знание, 1987. 30 с.
7. Крагельский И. В., Крагельский И. В. Михин Н. М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
8. Лужнов Ю. М., Александров В.Д. Основы триботехники: учеб. пособие / под ред. Ю.М. Лужнова. М.: МАДИ, 2013. 136 с
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка). Учебник для технических вузов. 2-е издание / под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
10. Крукович М. Г. Минкевич, А.Н. Тонэ Э. Технологические методы повышения износостойкости и восстановления деталей машин. Ч. 2 : повышение износостойкости деталей машин: учеб. пособие / М.Г. Крукович, - М. : [Б. и.], 2002. 150 с.
11. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы технические приложения в трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
12. Трение, износ и смазка: трибология и триботехника / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 2003. 575 с.

### Дополнительная литература по разделу 1

1. Буяновский И. А., Фукс И. Г., Богдасаров Л. Н. Очерки по истории трибологии. М.: Нефть и газ. 1998, 108 с.
2. Подшипники скольжения Термины, определения и классификация. Часть 2, Трение и изнашивание, Часть 3. Смазка и смазывание. Международный стандарт ИСО 4378-2,3 -1983.

### **Дополнительная литература по разделу 2**

1. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение, 1986. 359 с
2. Гуляев А. П. Металловедение. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgia, 1986. 544 с.
3. Арзамасов В. Б., А.А.Черепяхин. Материаловедение. М.: ИЦ «Академия», 2013. 174 с .
3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. М.: Альянс, 2013. 528 с
4. Материаловедение: учебное пособие / Под общ. ред. Л.Г. Петровой . М: МАДИ (ГТУ). 2008. 288 с .

### **Дополнительная литература по разделу 3**

1. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Контактные задачи в трибологии. М.: Машиностроение, 1988. 256 с.
2. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхностей и контакт деталей машин. М.: Машиностроение 1981. 244 с.
3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989, 510с.
4. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение. 2000. 520 с.

### **Дополнительная литература по разделу 4**

1. Геккер Ф. Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983. 280 с.
2. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 487 с.
3. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
4. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа. Гилем, 1999. 199 с.

### **Дополнительная литература по разделу 5**

1. Гриб В.В. Решение триботехнических задач численными методами. М.: Наука, 1982. 112 с.
2. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение.

3. Погодаев Л.В., Шевченко П.А. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. М.: Судостроение, 1984. 264 с.
4. Сорокин Г.М. Трибология сталей и сплавов. М.: Недра, 2000. 317 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 6**

1. Буяновский И.А., Фукс И.Г., Шабалина Т.Н. Граничная смазка: этапы развития трибологии. М.: Нефть и газ, 2002. 230 с.
2. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях, М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
3. Дроздов Ю.Н. Узлы трения на Луне. Проблемы машиностроения и надежности машин, 2002. № 3. С. 50-54
4. Захаров С.М., Никитин А.П., Загорянский Ю.А. Подшипники коленчатых валов теловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981. 181 с.
5. Пешти Ю.В. Газовая смазка. М.: Из-во МГТУ, 1993. 381 с
6. Подольский М.Е. Упорные подшипники скольжения. М.: Машиностроение, 1981. 261 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 7**

1. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар/ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, А.Г. Гинзбург, А.В. Игнатъева . М.: Наука, 1979. 267 с.
2. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах. М.: Наука, 1972. 196 с.
3. Чичинадзе А.В., Матвеевский Р.М., Браун Э.Д. Материалы в триботехнике нестационарных процессов. М.: Наука, 1986 г. 248 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 8**

1. Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. Моделирование трения и изнашивания в машинах. М.: Машиностроение. 1982. 190 с.
2. Захаров С.М., Жаров И.А. Методология моделирования сложных трибосистем. Трение и износ. 1988. Т14. № 5. С. 825-833.
3. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике. М.: Мир. 1982. 351
- 4.

#### **Дополнительная литература по разделу 9**

1. Трение полимеров / В. А. Белый, А. П. Свириденко, М. И. Петроковец, В. Г. Савкин. М.: Наука. 1972. 236 с.
2. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев. Знание, 1990. 31 с.

3. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 223 с.
4. Богатин О. Б., Мороз В. А., Черный И. Н. Основы расчета полимерных узлов трения. М.: Наука, 1972. 153 с.
5. В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.:Наука, 1994. 383 с.
6. Кершенбаум В. Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. М.: Машиностроение, 1987. 230 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 10**

1. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р. М. Матвеевский, В. Л. Лашхи, И. А. Буяновский И. Г. Фукс, К. М. Бадыштова. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.
2. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. Справочник / под ред. В. М. Школьников. М.: Техинформ, 1999. 596 с
3. Попок К. К. Химмотология топлив и смазочных масел. М.: Воениздат, 1970. 192 с.
4. Розенберг Ю. А. Влияние смазочных материалов на надежность и долговечность машин. М.: Машиностроение, 1970. 315 с.
5. Синицын В. В. Подбор и применение пластичных смазок. М.: Химия. 1972. 310 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 11**

1. Качество машин: Справочник / под. ред. А. Г. Сусллова. М.: Машиностроение. 1995. Т1. 256 с; Т2. 430 с.
2. Рыжов Э. В., Колесников Ю. В., Суслов А. Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. Киев: Наукова думка, 1988. 172 с.
3. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р. М. Матвеевский В. Л. Лашхи, И. А. Буяновский, И. Г. Фукс, К. М. Бадыштова. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.

#### **Дополнительная литература по разделу 12**

1. Воскресенский В. А., Дьяков В. И. Расчет и проектирование опор скольжения (Жидкостная смазка). М.: Машиностроение, 1980. 224 с.
2. Орлов П. И. Основы конструирования. Кн. 2. М.: Машиностроение. 1972. 526 с.

3. Основы трибологии: учебн. для техн. вузов. Чичинадзе А.В. Центр «Наука и техника», 1998. 128 с.

### **Дополнительная литература по разделу 13**

1. Джост П. Будущее триботехники // Трение и износ, 1991. Т.12. №1. 10-15 с.

2. Романова А. Т. Экономическое прогнозирование расходной части топливо-энергетического баланса железнодорожного транспорта; в сб. "Актуальные проблемы развития железнодорожного транспорта". М.: МИИТ, 1996. 132 с.

3. Смазочные материалы и проблемы экологии / А. Ю Евдокимов, И. Г. Фукс [и др.]. М.: Нефть и газ, 2000. 424 с.