

# В

**ДЛЯ ВУЗОВ**

---

*Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин*

## ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ

Издание 3-е, стереотипное

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области технологии продуктов питания и пищевой инженерии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 170600 "Машины и аппараты пищевых производств" направления подготовки дипломированного специалиста 655800 "Пищевая инженерия".*

---

**МОСКВА**  
**«ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»**  
**2021**

УДК 620.179.112 (075,8)

ББК 34.41я73

П 25

Р е ц е н з е н т ы:

д-р техн. наук, профессор Института машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук *В.Г. Павлов*,  
д-р техн. наук, зав. кафедрой прикладной механики и основ  
конструирования Северо-Кавказского государственного  
технического университета *В.Г. Копченков*

**Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М.**

П 25 Основы трибологии и триботехники: учебное пособие.  
3-е изд., стереотипное. М.: Инновационное машиностроение,  
2021. 208 с.: ил.

ISBN 978-907104-97-6

В учебном пособии, в соответствии с программой дисциплины «Основы трибологии», разработанной специалистами Ассоциации инженеров-трибологов России, изложены основные положения контактного взаимодействия твердых тел, свойства и топография их поверхностей, природа и виды внешнего трения, влияние различных факторов на трение. Описаны различные виды изнашивания, роль смазки, температуры, фрикционности и антифрикционности материалов для деталей сопряжений, основные способы повышения износостойкости материалов и деталей машин. Приведены расчетные методы оценки интенсивности изнашивания наиболее часто встречающихся трибосопряжений. Рассматриваются основные положения моделирования трибологических процессов, методы испытания на трение и изнашивание, а также роль трибологии в решении социально-экономических проблем, обусловленных трибологическими источниками: потери от недовыпуска продукции, потери всех видов ресурсов, ухудшение экологичности, энергетической эффективности различных видов транспорта и др.

Пособие рассчитано на студентов технических специальностей, изучающих эту дисциплину или ее разделы в других дисциплинах, аспирантов, научных и инженерно-технических специалистов в области трения, износа и смазки в машинах.

УДК 620.179.112(075,8)

ББК 34.41я73

ISBN 978-5-907104-97-6

© ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2021

© Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М., 2021

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,  
опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства  
и со ссылкой на источник информации

## Оглавление

Введение .....	5
<b>Глава 1. Общие вопросы трибологии и триботехники .....</b>	<b>7</b>
1.1. Трибология и ее развитие .....	7
1.2. Основные понятия и определения .....	9
1.3. Потери на трение в машинах и качественная картина износа деталей .....	10
1.4. Экономические аспекты проблемы трения и износа при эксплуатации техники .....	18
1.5. Роль смазки в трибосопряжениях .....	22
<b>Глава 2. Конструкционная прочность и состояние поверхностного слоя трибосопряжения .....</b>	<b>24</b>
2.1. Особенности строения твердых тел .....	24
2.2. Состояние материала деталей при циклических нагрузениях .....	29
2.3. Избыточная энергия поверхностного слоя .....	35
2.4. Структура и физико-механические свойства материала поверхностного слоя .....	38
2.5. Поверхностно-активные вещества. Эффект Ребиндера. Трещины Гриффитса .....	40
2.6. Особенности поведения жидкостей и газов на поверхности трения .....	43
<b>Глава 3. Топография поверхности и контакт твердых тел .....</b>	<b>45</b>
3.1. Макрогеометрия поверхности деталей .....	45
3.2. Микрогеометрия поверхности деталей .....	46
3.3. Методы оценки микрогеометрии поверхности .....	47
3.4. Радиус кривизны микронеровностей и кривая опорной поверхности .....	49
3.5. Фрикционные связи при контакте неровностей .....	50
3.6. Площади контакта шероховатых поверхностей .....	53
<b>Глава 4. Природа и виды внешнего трения .....</b>	<b>57</b>
4.1. Основные закономерности трения скольжения при отсутствии смазочного материала (сухое трение) .....	58
4.2. Трение при граничной смазке .....	66
4.3. Жидкостное трение .....	73
4.4. Трение качения .....	82
4.5. Роль температуры при трении .....	86

---

<b>Глава 5. Изнашивание материалов и деталей машин</b> . . . . .	90
5.1. Классификация видов изнашивания . . . . .	92
5.2. Абразивное изнашивание . . . . .	94
5.2.1. Изнашивание о закрепленный абразив . . . . .	96
5.2.2. Изнашивание в абразивной прослойке . . . . .	97
5.2.3. Изнашивание в абразивной массе . . . . .	98
5.2.4. Изнашивание при ударе по абразиву . . . . .	100
5.2.5. Газоабразивное изнашивание . . . . .	101
5.2.6. Гидроабразивное изнашивание . . . . .	103
5.3. Усталостное изнашивание . . . . .	104
5.4. Кавитационное изнашивание . . . . .	109
5.5. Адгезионное изнашивание . . . . .	112
5.6. Эрозионное изнашивание . . . . .	114
5.7. Окислительное изнашивание . . . . .	115
5.8. Водородное изнашивание . . . . .	116
5.9. Изнашивание при фреттинг-коррозии . . . . .	117
5.10. Электроэрозионное изнашивание . . . . .	119
<b>Глава 6. Фрикционные, антифрикционные и смазочные материалы</b> . . . . .	120
6.1. Природа фрикционности и антифрикционности . . . . .	120
6.2. Фрикционные материалы . . . . .	121
6.3. Антифрикционные материалы . . . . .	124
6.4. Смазочные материалы . . . . .	129
6.5. Выбор смазочного материала для узла трения . . . . .	137
<b>Глава 7. Основные способы повышения износостойкости материалов и деталей машин</b> . . . . .	141
7.1. Конструкционные способы . . . . .	141
7.2. Технологические способы . . . . .	153
7.3. Эксплуатационные способы . . . . .	158
7.4. Расчетные методы оценки износостойкости деталей и материалов деталей машин . . . . .	160
<b>Глава 8. Моделирование и лабораторные испытания на трение и изнашивание</b> . . . . .	178
8.1. Основы моделирования трибологических процессов . . . . .	178
8.2. Испытание на трение и изнашивание . . . . .	187
8.3. Общая методология испытаний на трение и изнашивание . . . . .	196
<b>Список литературы</b> . . . . .	205

## ВВЕДЕНИЕ

---

Повышение производительности труда, экономии топливно-энергетических, материальных и трудовых ресурсов, обеспечение технического уровня и конкурентоспособности на мировом рынке продукции машиностроения зависят от эффективности, надежности, безопасности, экологичности машин и механизмов, приборов и другого оборудования.

Одной из главных задач, стоящих перед машиностроением, является повышение надежности и долговечности машин. Действительно, повышение долговечности отдельных машин на 30... 40 % равноценно такому же увеличению производства, что приводит к высвобождению огромных финансовых, материальных и трудовых ресурсов. В тоже время, долговечность машин, под которой понимают способность сохранять работоспособность до предельного состояния, чаще всего определяется не поломками из-за низкой прочности отдельных деталей, а износом поверхностей трения, т.е. изменением их размеров вследствие изнашивания. В результате износа нарушается герметичность (например, в трибосопряжении цилиндр–поршень), теряется точность взаимного перемещения деталей (направляющие и суппорт станков) и т.п., и, как следствие этого, ухудшаются показатели работы машины.

Повышенный износ вызывают удары и вибрации, что может привести к авариям. Часто выход из строя многотонного агрегата обуславливается износом и потерей работоспособности небольшой детали, в то время как сам износ выражается долями миллиметра.

Таким образом, износ в большой мере определяет срок службы машин. Например, для закрытой зубчатой передачи это несколько тысяч часов, цепной – несколько сот часов. Лемех плуга изнашивается в течение нескольких десятков часов. Изношенное оборудование подвергается ремонту, при этом его стоимость часто в 3 – 10 раз превышает стоимость нового изделия.

Другая сторона проблемы состоит в том, что при работе машин значительная часть энергии бесполезно расходуется на тре-

ние. Но трение не всегда играет отрицательную роль. Например, в тормозных устройствах автомобилей, тракторов, железнодорожных поездов, самолетов требуется решать обратную задачу – повысить силу трения. С использованием силы трения работают резьбовые соединения, соединения с гарантированным натягом, фрикционные и ременные передачи и другие механизмы.

Можно с уверенностью отметить, что современный человек, опираясь на науку и опыт, одержал важные победы над трением на транспорте, в промышленности и в быту и в значительной мере подчинил его себе. Это достигнуто, в основном, благодаря освоению и массовому производству опор качения, созданию многочисленных типов минеральных и синтетических смазок, в том числе твердых и газообразных, способных работать в тяжелых и необычных условиях, включая и космическое производство. Однако такие технические возможности появились сравнительно недавно, в основном лишь во второй половине XX века. В то же время быстро развивающаяся техника в XXI веке не только не снимает с повестки дня проблемы трения, а наоборот, часто ставит их во все более острой форме. Проблемы, связанные с трением и изнашиванием, нередко встают на пути прогрессивных конструкторских идей, сдерживая их реализацию на десятки и сотни лет.

Данное пособие, как и изучаемая студентами машиностроительных и механических специальностей дисциплина «Трибология и триботехника» или «Трение и износ в машинах», позволит более целенаправленно применять основные трибологические закономерности для решения конкретных конструкторских, технологических и эксплуатационных задач, связанных с трением, износом и смазкой в машинах и механизмах.

Введение, гл. 1, 3–6, 8, пп. 2.4–2.6, 7.3 написаны Н.С. Пенкиным; пп. 2.1–2.3, 7.2 написаны А.Н. Пенкиным; пп. 7.1, 7.4 написаны В.М. Сербиным и Н.С. Пенкиным совместно.