

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные обозначения	3
Введение	16
Глава 1. Смешанное трение и износ в тяжело нагруженном трибо- сопряжении скольжения	21
1.1. Основные предпосылки описания смешанного трения	21
1.2. Краткий обзор работ по рубежным и переходным режимам между жидкостным и граничным трением	22
1.3. Классификация режимов трения	33
1.4. Взаимодействие жесткого треугольного выступа с жесткопластичной поверхностью (литературный обзор)	34
1.5. Постановка задачи по определению параметров смешанного трения	46
Глава 2. Математическая модель трения и изнашивания несмазанных тяжело нагруженных контактов скольжения	48
2.1. Разрушение поверхностного слоя трибоконтакта	49
2.1.1. Обзор теорий разрушения материалов	49
2.1.1.1. Деформационные критерии	52
2.1.1.2. Энергетические критерии	54
2.1.2. Усталостная теория изнашивания	57
2.1.3. Теория износа расслаиванием	62
2.1.3.1. Влияние топографии поверхности на износ	63
2.1.3.2. Деформация поверхностного слоя	64
2.1.3.3. Зарождение трещины	66
2.1.3.4. Распространение трещины	67
2.1.3.5. Образование частицы износа	69
2.1.3.6. Динамика дислокаций и износ	69
2.1.3.7. Влияние скорости скольжения	70
2.1.3.8. Влияние смазки на износ при трении скольжения ...	70
2.1.3.9. Износ при комбинированной нагрузке	71
2.2. Залечивание повреждений, возникающих при пластической деформации	71
2.2.1. Литературный обзор	71
2.2.2. Условие минимизации износа при пластическом контакте .	78
2.3. Взаимодействие жесткого шероховатого вала и мягкой втулки в радиальном подшипнике скольжения	79
2.3.1. Постановка краевой задачи	79
2.3.2. Численное моделирование взаимодействия вала и втулки в радиальном подшипнике скольжения	82

2.3.3. Алгоритмы расчета параметров подшипника скольжения . . .	83
2.3.4. Результаты численного моделирования взаимодействия жесткого шероховатого вала с жесткопластичной втулкой в радиальном подшипнике скольжения	86
2.4. Расчет температурного поля в подшипниках скольжения	88
2.4.1. Общие положения	88
2.4.2. Общая постановка плоской нестационарной задачи теплопередачи и математическая модель расчета температурного поля	89
2.5. Проверка адекватности математической модели определения температурного поля в узлах скольжения	94
2.5.1. Методика замера температур на поверхностях трения в шарошках при работе буровых долот на глубинах до 14 м	94
2.5.2. Методика замера температур на поверхностях трения в шарошках буровых долот на глубинах 2—3 тыс. м	94
2.5.3. Результаты замеров температур в исследуемых точках долота при бурении скважин в полевых условиях	97
2.5.4. Моделирование температурного поля подшипниковой опоры шарошки долота в зависимости от его материалов и режимов работы	99
Глава 3. Течение смазки между шероховатыми поверхностями в зоне трения скольжения	105
3.1. Течение смазки между поверхностями в смешанном режиме трения с гидродинамической составляющей (основные положения)	105
3.2. Построение математической модели течения смазки в пограничном слое трибосопряжения на примере радиального подшипника скольжения	107
3.2.1. Постановка задачи	107
3.2.2. Ограничения	107
3.2.3. Математическая модель течения смазки между шероховатыми поверхностями в подшипнике скольжения	110
3.2.4. Область применимости и принятые упрощения	117
3.3. Определяющие соотношения, входящие в уравнения математической модели	118
3.3.1. Модели проницаемости	118
3.3.2. Связь между параметрами шероховатости поверхностей трения и проницаемостью пограничного слоя трибосопряжения	125
3.3.3. Экспериментальное определение проницаемости стыка шероховатых поверхностей	134
3.3.4. Вязкость. Зависимость вязкости смазок от давления	140
3.3.5. Зависимость вязкости смазок от температуры	146
3.3.6. Зависимость вязкости от температуры и давления	149
3.3.7. Зависимость вязкости от температуры некоторых расплавленных металлов	154
3.3.8. Коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c и мощность внутренних источников тепла Q	158
3.4. Программное обеспечение математической модели	163

4.9.4. Момент трения между пятой и подпятником в смешанном режиме	220
4.9.5. Пример расчета момента трения между пятой и подпятником с центральной камерой	223
4.9.6. Коэффициенты трения между пятой и подпятником	229
4.9.7. Работа сил трения и интенсивность изнашивания на круговом подпятнике	230
Глава 5. Краевые задачи смешанного трения с гидродинамической составляющей в стационарной и нестационарной постановке ..	233
5.1. Постановка краевой задачи течения смазки в радиальном подшипнике скольжения при смешанном трении с гидродинамической составляющей	233
5.2. Математическая модель	234
5.2.1. Основные уравнения модели подшипника скольжения	234
5.2.2. Алгоритм расчета момента трения между валом и втулкой ..	238
5.3. Пример решения краевой задачи	240
5.4. Постановка краевой задачи смешанного трения в упорном подшипнике скольжения (круговом подпятнике)	245
5.5. О границах зоны смешанного трения при качении цилиндра по плоскости	246
5.5.1. Постановка задачи	246
5.5.2. Алгоритм определения границ зоны трения	249
5.5.3. Пример решения задачи	255
5.5.4. Обсуждение результатов и выводы	257
5.6. Нестационарный режим смешанного трения	259
5.6.1. Постановка задачи и алгоритм решения	259
5.6.2. Пример решения нестационарной задачи	264
Глава 6. Экспериментальная проверка адекватности математической модели смешанного трения скольжения и разработка путей снижения износа	268
6.1. Проверка адекватности модели в лабораторных и производственных условиях	268
6.1.1. Исследования в лабораторных условиях	269
6.1.2. Исследования в производственных условиях на обжимных прокатных станах	277
6.2. Сравнение результатов расчетов коэффициентов трения и интенсивностей изнашивания по предлагаемой модели с результатами расчетов других авторов	280
6.3. Исследование износостойкости тяжелоагрессивных подшипников при использовании некоторых современных методов упрочнения поверхностей (на примере подшипников шарошек буровых долот)	282
6.3.1. Влияние ионного имплантирования долотных сталей на их износостойкость	282
6.3.2. Влияние алмазного покрытия элементов подшипников на их износостойкость	284
6.3.3. Некоторые другие методы повышения износостойкости трибосопряжений	284

6.4. Разработка технологии нанесения медных покрытий на одну из поверхностей трения	292
6.4.1. Подготовка поверхности трения перед нанесением покрытий	292
6.4.2. Отработка режимов для нанесения медных покрытий на долотные стали 17ХНЗМА и 20ХНЗА	293
6.5. Влияние химико-термической обработки на структуру и твердость долотных сталей	298
6.5.1. Традиционная термообработка долотных сталей	298
6.5.2. Материал и методика исследования	300
6.5.3. Результаты исследования и их оценка	301
6.5.4. Выбор места для операции меднения в технологическом цикле термической обработки долотной стали	306
6.6. Влияние медного покрытия на износ трибосопряжения	308
6.7. Разработка подшипника скольжения, работающего в широком интервале температур и нагрузок	310
6.7.1. Смазка расплавом при трении скольжения.	310
6.7.2. Принцип работы подшипника	311
6.7.3. Стадии работы подшипника	312
6.8. Испытания модели подшипника в лабораторных условиях	317
6.8.1. Цель испытаний	317
6.8.2. Техническая характеристика модели (макета) подшипника .	317
6.8.3. Методика проведения эксперимента	319
6.9. Результаты испытаний подшипника	322
6.9.1. Термомеханические параметры	322
6.9.2. Химический состав противозадирной пленки	331
Глава 7. Роль смазки в снижении трения и износа	336
7.1. Общие замечания	336
7.2. Смазка как объект управления в процессах трения и изнашивания	337
7.3. Разработка и испытание металлоплакирующих смазок для тяжело-	
нагруженных трибосопряжений	340
7.3.1. Предварительные полевые испытания металлоплакирующей смазки с присадкой МКФ-18У	340
7.3.2. Составы смазок для буровых долот	341
7.3.3. Методика проведения испытаний	342
7.3.3.1. Определение коэффициента трения	342
7.3.3.2. Определение нагрузки задира	344
7.3.4. Результаты испытаний смазок	344
7.4. Смазка расплавом	347
Список литературы	350