

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. Г. В. КАРПЕНКО

На правах рукописи

ЧЕРНЕЦ
Мирон Васильевич

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ
КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТЕЛ

01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Л Ъ В О В — 1 9 9 1

Работа выполнена в Физико-механическом институте
им. Г.В.Карпенко АН Украины.

Официальные оппоненты:

академик АН Украины, доктор физико-математических
наук, профессор Б.Л.РБАЧКВ,

член-корреспондент АН Украины, доктор технических
наук, профессор В.И.ПОХМУРСКИЙ,

доктор физико-математических наук, профессор
В.М.АЛЕКСАНДРОВ.

Ведущее предприятие: Институт горного дела

им. А.А.Скочинского /г.Москва/

Защита диссертации состоится "18" декабря 1991 г.
в 15 часов на заседании специализированного совета
ДР 016.42.99 в Физико-механическом институте им.Г.В.Карпенко
АН Украины (290601, г. Львов, ГСП, ул. Научная, 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Физико-механического института им.Г.В.Карпенко АН Украины.

Автореферат разослан "7" января 1991 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный
гербовой печатью, просим направлять в адрес Института.

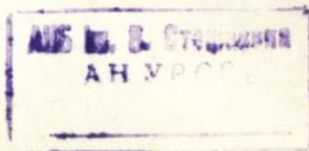
Ученый секретарь
специализированного совета
докт. техн.наук

Г.Н.НИКИФОРЧИН

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00815814 (R)



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из главных причин недостаточной надежности и долговечности техники является износ ее трибосистем различного вида. В решении задач триботехники, направленных на повышение их износостойкости, весьма важное значение приобретают методы прогнозирования триботехнических характеристик, а также оптимизация материалов и конструкций трибосопряжений скольжения. Существующие подходы, в силу различных причин, не в полной мере удовлетворяют нужды триботехники. Более полный учет особенностей трибоконтактного взаимодействия тел, в частности их несовершенства формы, шероховатости, деформируемости, наличия тонких покрытий, изменения параметров трибосистемы при изнашивании, позволяет обоснованно решать задачи по расчету характеристик трибопроцессов. Следовательно, актуальность темы определяется важным значением расчетных методов, как методов прогнозной оценки триботехнических характеристик с целью сравнительного анализа долговечности и надежности трибосистем скольжения, в частности при неоднородном распределении давлений, а также их оптимизации.

Цель и задачи исследований. В связи с перспективностью использования в решении практических задач трибологии расчетных методов исследования кинетики трибоконтактного взаимодействия твердых тел целью реферлируемой работы является развитие нового подхода, базирующегося на комбинации микро- и макро моделирования, и разработка на его основе более совершенных методов расчета триботехнических характеристик трибосистем при различных видах трения скольжения.

Поставленная цель реализуется путем решения комплекса следующих задач:

1. Построения расчетной модели локального трибоконт-тактноусталостного разрушения материалов в условиях скольжения гладких и шероховатых тел.

2. Разработки методики определения базисного параметра модели за результатами экспериментальных трибологических исследований.

3. Построения математической модели (замкнутой системы уравнений) для определения ресурса трибосистем.

4. Формулировки метода решения двумерных контактных задач для цилиндрических сопряжений, где имеется начальная малая некруглость их элементов.

5. Постановки и реализации задач по оценке износа или долговечности различных трибосистем скольжения.

6. Исследования трибоконт-тактного взаимодействия породоразрушающих инструментов - дисковых шарошек лобового действия и буровых шарошечных долот с горным массивом с целью расчета их стойкости и параметров процесса проходки выработок и скважин.

7. Разработки методов оптимизации конструкций породоразрушающих инструментов с целью повышения эффективности бурения.

Объектом исследования являются процессы трибоконт-тактно-го взаимодействия твердых деформируемых тел при различных видах трения скольжения; триботехнические системы, элементы которых по форме являются круговыми или близкими к ним; трибосистема породоразрушающий инструмент - горный массив.

Научная новизна работы заключается в разработке обобщенного на различные виды трения скольжения нового теоретического подхода исследования кинетики трибоконтактных процессов и состоит в следующем:

1. Построена новая расчетная модель локально-усталостного разрушения материалов при трибоконтактном взаимодействии скольжения твердых деформируемых тел.

2. Предложен новый метод решения практически важных задач о внутреннем контактном взаимодействии цилиндрических тел близких радиусов, имеющих эллиптичность или огранку.

3. Построена новая математическая модель исследования кинетики изнашивания трибосистем скольжения.

4. Разработаны новые методы расчета долговечности и износа трибосистем с круговой или близкой к ней формой контуров их элементов.

5. Развита эффективные методы исследования кинетики трибоконтактного взаимодействия некоторых породоразрушающих инструментов с массивом при бурении скважин и горных выработок и предложены, на этой основе, методы расчета их стойкости.

6. Поставлена принципиально новая задача оптимизации процессов бурения скважин и горных выработок, предложены эффективные методы практической реализации ее решения, разработаны рекомендации, направленные на повышение эффективности бурения.

Достоверность основных научных положений и полученных результатов обеспечивается физической обоснованностью построенных моделей трибопроцесса, экспериментальной проверкой основополагающих предположений, корректностью постановки

трибоконтактных задач, согласованием полученных решений с известными в литературе результатами и данными промышленной отработки реальных трибосистем.

Практическая ценность. Разработанные методы расчета износа и ресурса достаточно эффективно реализуются в инженерной практике, причем позволяют обоснованно учитывать наличие шероховатости, огранки различной сложности, покрытий, различные упругие свойства материалов. Полученные результаты работы рекомендованы к использованию в производстве при оценке сверхнормативной долговечности опор стреловых систем кранов, оптимизации проведения нефтяных скважин, оптимизации конструкций дисковых шарошек по стойкости и прочности. Годовой эффект от их внедрения составил 594865 рублей.

На защиту выносятся:

- расчетная модель локально-усталостного разрушения материалов при трибоконтактном взаимодействии ;

- методика трибозкопериентальных исследований по определению функции износостойкости материалов, как базисного параметра модели, и результаты исследований изнашивания материалов и покрытий ;

- метод и результаты решения контактных задач для сопряжений аксиальных цилиндров близких радиусов, контуры которых являются некруговыми ;

- методы и результаты решения трибоконтактных задач для трибосистем с криволинейными контурами тел, а также для породоразрушающего инструмента ;

- метод и результаты оптимизации процессов бурения скважин шарошечными долотами и горных выработок дисковыми лобовыми шарошками.

Апробация работы. Отдельные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на II-ом Всесоюзном съезде по теории машин и механизмов (Одесса, 1982); Всесоюзном семинаре "Расчеты и испытания на контактную усталость материалов и деталей машин" (Москва, 1984); Всесоюзных семинарах "Создание высокоэффективного крупногабаритного шарошечного инструмента" (Дрогобыч, 1985; 1988, 1991); сессиях Межведомственного научного совета по трибологии при АН СССР, ГКНТ СССР и совзе НИО СССР (Дрогобыч, 1981; Винница, 1987; Харьков, 1989; Ростов-на-Дону, 1990); I-ой Всесоюзной конференции "Механика разрушения материалов" (Львов, 1987); совещании "Проблемы комплексной оценки поврежденности и предельного состояния силовых систем" (Гомель, 1990); семинарах "Контактное взаимодействие конструктивных материалов в рабочих средах" (Славское, 1988, 1990); VII Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике" (Ульяновск, 1991).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на научных семинарах ФМИ АН Украины, ИПМ АН СССР, Институте горного дела им. А.А.Скочинского, ИПМаш АН Украины.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в монографии, 36 препринтах, статьях и докладах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, восьми глав, приложения и списка литературы. Она изложена на 399 страницах машинописного текста и содержит 31 таблицу, 107 рисунков, 29 страниц приложений и список литературы из 262 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определена цель и задачи исследования, изложено ее содержание и значи-

щаемые научные положения.

Первая глава посвящена анализу основных концепций расчета трибосопряжений. Рассмотрены сущность и особенности известных теорий и моделей трибопроцесса, моделей оценки долговечности цилиндрических трибосистем скольжения, методов оценки характеристик контакта в цилиндрических сопряжениях тел близки радиусов.

Важный вклад в развитие теории и методов оценки трибоконтактного и контактного взаимодействия деформируемых тел, в том числе криволинейных, внесен А.Е.Андрейкиным, В.М.Александровым, Н.М.Алексеевым, Л.А.Галиным, Д.Б.Грилицким, В.М.Голубцом, И.Г.Горлчезой, Н.Б.Демкиным, Б.Н.Дроздовым, Е.В.Коваленко, М.В.Коровчинским, Б.И.Костецким, И.В.Крагельским, Е.В.Панасяком, В.Л.Рвачевым, М.И.Теплым, И.А.Штаерманом и др. Однако в имеющихся работах при исследовании различных аспектов кинетики трибоконтактного взаимодействия и построении расчетных моделей введен ряд гипотез и допущений, не позволяющих использовать их в широком диапазоне внешних условий при различных видах трения скольжения. В частности, это гипотеза о пропорциональности износа давлению на трибоконтакте, подтверждающаяся лишь для абразивного изнашивания; допущение о недеформируемости элементов трибосистем, существенно искажающее картину контактного взаимодействия; использование теории Герца для расчета характеристик контакта цилиндрических сопряжений тел близких радиусов и некоторые другие предположения. Также при расчете характеристик контакта в цилиндрических сопряжениях разработанными методами не проводится учет малой некруглости, обусловленной технологическими причинами при изготов-

лении реальных деталей, что является необоснованной идеализацией и приводит к определенной некорректности полученных решений.

Таким образом, существует необходимость, обусловленная потребностями инженерной практики, в создании подхода исследования кинетики трибоконтактного взаимодействия деформируемых тел, не использующего упомянутые гипотезы и допущения и позволяющего эффективно решать практически важные триботехнические задачи, в частности для трибосистем криволинейных тел, где реализуются различные виды трения скольжения.

Во второй главе изложены положения расчетной модели локально-усталостного разрушения материалов при трибоконтактном взаимодействии скольжения твердых тел. При ее построении использованы как общеизвестные, так и установленные в работе закономерности макро- и микромеханики фрикционного разрушения материалов. Принято, что изнашивание, как процесс малоциклового фрикционной усталости, описывается законом Коффина-Менсона.

Трансформация трибосистемы скольжения с криволинейными границами (рис. 1а) при изнашивании описывается вектором $\Delta \vec{R}_k(\alpha, t)$, очевидным образом связанным с линейным износом $h_k(\alpha, t)$ ее элементов 1 и 2. Из физических и геометрических соображений

$$\gamma_k = \frac{\Delta h_k(\alpha, t)}{\Delta t_k} = \frac{\partial h_k(\alpha, t)}{\partial t_k} = \frac{\partial R_k(\alpha, t)}{\partial t_k} \cos \theta_k, \quad (I)$$

$$\cos^{-1} \theta_k = \sqrt{1 + R_k^{-2}(\alpha, t) [\partial R_k(\alpha, t) / \partial \alpha]^2}, \quad k=1; 2.$$

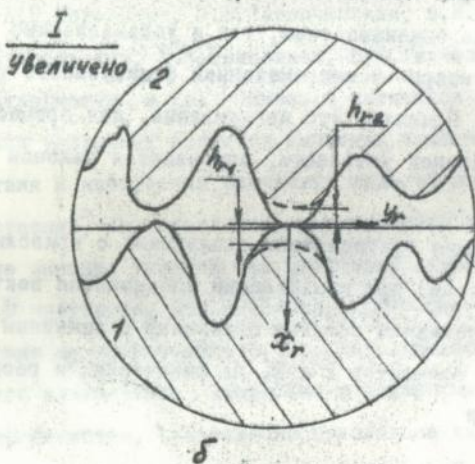
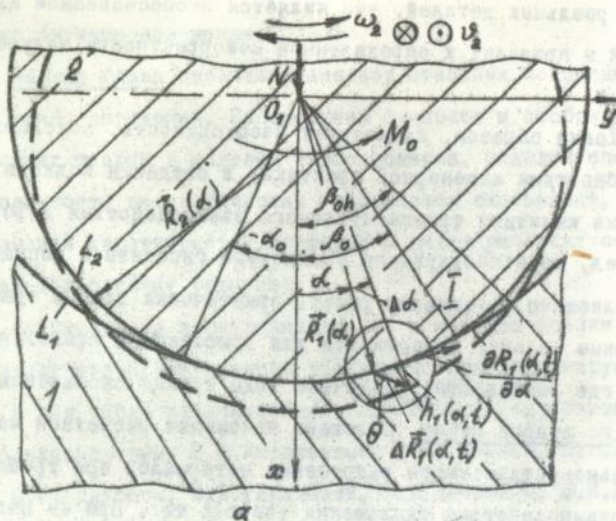


Рис. I

Как свидетельствуют фундаментальные факты экспериментальной трибологии, вследствие макронесвершенств и микрогеометрии поверхностей реальных тел, в сопряжениях осуществ-

вляется дискретное взаимодействие микровыступов их шероховатых слоев (рис. 1б). В трибопроцессе они испытывают циклическое нагружение при высоких локальных давлениях, приводящее к пластическим деформациям ϵ_k . Разрушение произвольного микровыступа на высоту $h_r(x_r, y_r, t) = c' R_z$ произойдет после некоторого числа его взаимодействий N_{θ} с сопряженной шероховатой поверхностью (R_z - стандартный параметр шероховатости). Соответственно

$$N_{\theta k} = L_{rk} \tilde{\rho}_k = v t_k \tilde{\rho}_k, \quad (2)$$

где L_r - путь трения скольжения микровыступа; $\tilde{\rho}$ - частота его взаимодействия на единице L_r , устанавливаемая соответствующим образом по профилограммам шероховатых поверхностей трибоконтакта; v - скорость относительного скольжения.

При указанных условиях реализуется малоцикловая фрикционная усталость и поэтому число взаимодействий N_{θ} отождествляется с количеством циклов N_r нагружений материала микровыступа, необходимых для его разрушения на высоту h_r . Тогда фрикционное взаимодействие материалов микровыступов предлагается описывать законом Коффина-Менсона, где

$$N_{rk} = C'' \epsilon_k^{-S'}, \quad (3)$$

Здесь C'' , S' - неизвестные константы.

Деформация микровыступов, в допущении пластического с упрочением материала и условия пластичности Треска-Сен-Венана, связывается с нагруженностью дискретного трибоконтакта, оцениваемой возникающей удельной силой трения τ_r , следующим образом:

$$\epsilon_k = D_k [(\tau_r - \tau_{sk}) / \tau_{sk}]^{S''}, \quad (4)$$

где S'' - неизвестная характеристика деформационного упрочнения материала; $\tau_s = 0,5 \sigma_T$ - предел его текучести при одвиге; σ_T - предел его текучести при растяжении; D - постоянная.

На основании вышеизложенного из (I) с учетом (2)-(4) получено, что для дискретного трибоконтакта

$$\delta_{rk}(\tau_r) = \nu R_{zk} \tilde{\rho}_k A'_{rk} [(\tau_r - \tau_{sk}) / \tau_{sk}]^{m_{rk}} = \nu \Phi_{rk}^{-1}(\tau_r), \quad (5)$$

где $A'_r = \tilde{c} D^{-s'}$; $\tilde{c} = c'/c''$; $m_r = -s' + s''$; величины A'_r и m_r являются характеристиками фрикционной стойкости (износостойкости) материала; $\Phi_r(\tau_r)$ - характеристическая функция износостойкости материала, принятая базисным параметром излагаемой модели.

Для расчета $\tau_r = f \rho_r$ (f - коэффициент трения скольжения) использованы результаты известных работ Н.Б.Демкина, И.В.Крагельского по расчету характеристик контактного взаимодействия шероховатых тел: фактического контактного давления ρ_r , площади A_r фактического контакта, числа N_r контактов. С учетом этого на основании вышеизложенного получена такая обобщенная система дифференциальных уравнений в частных производных для описания кинетики локального трибоконтактного взаимодействия деформируемых тел:

$$\frac{\partial R_{rk}(\alpha, t)}{\partial t_k} \left\{ \sqrt{1 + R_{rk}^{-2}(\alpha, t) \left[\frac{\partial R_{rk}(\alpha, t)}{\partial \alpha} \right]^2} \right\}^{-1} = \quad (6)$$

$$= \nu R_{zk} \tilde{\rho}_k A'_{rk} \left\{ [f N \left(\frac{2,35 N \tilde{\rho}_k^{0,5} A_{\alpha}^{0,5 \nu'} (\beta)^{0,5 \nu'}}{2^{0,5 \nu'} K R_{max}^{0,5}} \right)^{-\frac{2\nu}{2\nu+1}} - \frac{\sigma_T}{2} \left(\frac{\sigma_T}{2} \right)^{-1}]^{m_{rk}} \right\}.$$

Здесь $\tilde{\sigma} = (1-\nu^2)/E$; ν , E - упругие постоянные материалов; \tilde{r} - средний радиус скругления вершин микровыступов, рассчитываемый по разработанной в литературе методике; A_a - номинальная площадь контакта; $R_{max} \approx 4R_z$ - максимальная высота микровыступов; ν' , β' - параметры степенной аппроксимации кривой опорной поверхности, устанавливаемые обработкой профилограмм поверхностей трибоконтакта по известным методикам; $K = K(\nu')$.

Предельные износы, как правило, малы в сравнении с размерами трибосистемы и, вследствие этого, из (6) возможно получить систему обычных дифференциальных трибокинетических уравнений.

Базисным параметром модели принята функция $\Phi_r(\tau_r)$, вид которой устанавливается из (5). Она позволяет определить характеристики фрикционной стойкости A'_r , m_r материалов на основании результатов трибоэкспериментальных исследований. Для дискретного контакта функция износостойкости экспериментально находится так:

$$\Phi_{rk}^{(j)} = L_{rk}^{(j)} / h_{rk}^{(j)} = \frac{L_{rk}^{(j)} A_{rk} \rho}{M_k^{(j)}}, \quad j = 1; 2; 3; \dots, \quad (7)$$

где h_r - линейный износ шероховатой поверхности; j - число нагружений; $M^{(j)}$ - среднемассовый износ; ρ - плотность материала; $A_r = \beta' A_r$ - площадь изнашивания шероховатых поверхностей; β' рассчитывается по разработанной в работе методике.

Продолжительность трибоконтакта L_r микровыступа применительно схеме торцевого трения S пальцевых образцов I - кольцо 2 определялась по разработанной методике, бази-

рующей на анализе профилограмм и учитывающей особенности дискретного трибоконтакта поверхностей. В результате получено соотношение для расчета $\Phi_r^{(i)}$

$$\Phi_{rK}^{(i)} = 30\tilde{S}^2 \omega_2 d_r A_r n_{пK}^2 A_{\alpha_1} \rho_K (\tilde{x} \tilde{l}_{пK} \sqrt{K_{\beta 3}} M_K^{(i)})^{-1}, \quad K=1; 2. \quad (8)$$

Здесь $\tilde{S} = SK_{\beta 3}$; $K_{\beta 3} = A_{\alpha_1}/A_{\alpha 2}$ - коэффициент взаимного перекрытия; ω_2 - частота вращения образца 2; $d_r = \sqrt{4A_r/xn_r}$ - средний диаметр единичного пятна контакта; $n_{п}$ - число микровыступов профилограммы протяженностью $l_{п}$, расположенных ниже уровня $0,3 R_{max}$; $\tilde{l}_{п} = l_{п} \gamma_2^{-1}$, γ_2 - горизонтальное увеличение профилограммы; \tilde{v} - размер образца I в направлении скольжения.

Установлено, что характеристики A'_r , m_r являются константами материала в условиях малоциклового фрикционного разрушения. В то же время известно, что установившаяся шероховатость поверхностей трибоконтакта определяется, в основном, сочетанием материалов. Следовательно, функция износостойкости материалов, как интегральная характеристика трибопроцесса, будет описываться двумя независимыми факторами, т.е.

$$\Phi_{rK}(\tau_r) = \Phi_{rK}(R_z, \tilde{\rho}) \Phi_{rK}(A'_r, m_r).$$

При этом первый из них - фактор микрогеометрии, будет изменяемым, а второй - фактор сопротивления материала микровыступов шероховатого слоя локально-усталостному разрушению, является его константой.

Такой подход позволяет осуществить по (5) прогнозирование износостойкости материалов, если установлены в результате трибоэкспериментальных исследований константы фрикционной стойкости A'_r , m_r материалов. Изменяемый фактор микро-

геометрии находится тогда профилометрированием поверхностей трибоконтакта исследуемых реальных трибосистем. То есть, если для материалов в парах I - III и II - III определены константы A'_r, m_r , то для прогнозирования функций $\Phi_r(\tau_r)$ материалов пары I - II необходимо кроме этого найти для них, как указывалось, характеристики шероховатости. Установлена хорошая корреляция прогнозируемых и экспериментальных данных $\Phi_r(\tau_r)$.

Изложенная модель локально-усталостного разрушения обобщена на случай континуального трибоконтакта. Учитывая интегрально шероховатость в (6) характеристиками износостойкости материалов и принимая параметром нагруженности континуального трибоконтакта удельную силу трения $\tau = f\rho$, система трибокинетических уравнений сводится к виду

$$\frac{dh_k(\alpha, t)}{dt_k} = v B_k^{-1} \left\{ [f\rho(\alpha, t, h) - \tau_k^{(0)}] / \tau_k^{(0)} \right\}^{m_k} = v \Phi(\tau), \quad (9)$$

где $B, m, \tau^{(0)}$ - характеристики износостойкости материалов, интегрально учитывающие совокупность условий трибопроцесса; функция $\Phi(\tau)$ устанавливается за результатами трибоэксперимента с учетом особенностей континуального контакта согласно (7).

В третьей главе приводятся результаты трибологических исследований усталостно-фрикционной стойкости материалов. Рассмотрена общая методология определения базисного параметра расчетной модели трибоконтактного разрушения материалов в условиях дискретного контакта тел. Представлены особенности методики расчета при этом линейного износа шероховатого тела и пути трения единичного микровыступа с сопряженной шероховатой поверхностью, что позволило, с использо-

ванием результатов предыдущей главы, установить характеристики усталостно-фрикционной стойкости исследованных материалов.

Предложены и построены, как характеристики сравнительной износостойкости материалов в условиях усталостно-фрикционного разрушения, диаграммы износостойкости в координатах $\Phi_n(\tau_n) \sim \tau_n$.

В дальнейшем, базируясь на обобщении построенной модели на случай континуального трибоконтакта, представлены особенности методики определения здесь функции износостойкости материалов $\Phi(\tau)$ и построения их диаграмм износостойкости. В результате для широкого класса конструкционных материалов и защитных покрытий при сухом и граничном трении, различных видов абразивного изнашивания установлены характеристики их износостойкости и построены диаграммы.

Установлено, что модель континуального трибоконтакта корректна для описания процесса сухого трения, где преобладающим является механизм малоциклового фрикционной усталости, так и его других исследованных видов. Результаты исследований реализуют возможность проведения изучения трибопроцессов трения скольжения на единой методологической основе - модели трибоконтактноусталостного разрушения материалов.

В четвертой главе излагается метод решения плоской задачи теории упругости в внутреннем контакте цилиндрических тел близких радиусов с эллиптическими (овальными) или ограниченными контурами, которые образуются при изготовлении реальных деталей или их изнашивании.

Принципиальным отличием от известных методов для круглых тел является учет некруглости контуров, определенными

образом представляемой в соотношениях для их кривизн при деформировании. Основное уравнение задачи для расчета контактных давлений установлено на основании равенства этих кривизн.

Расчетная схема задачи представлена на рис. 2.

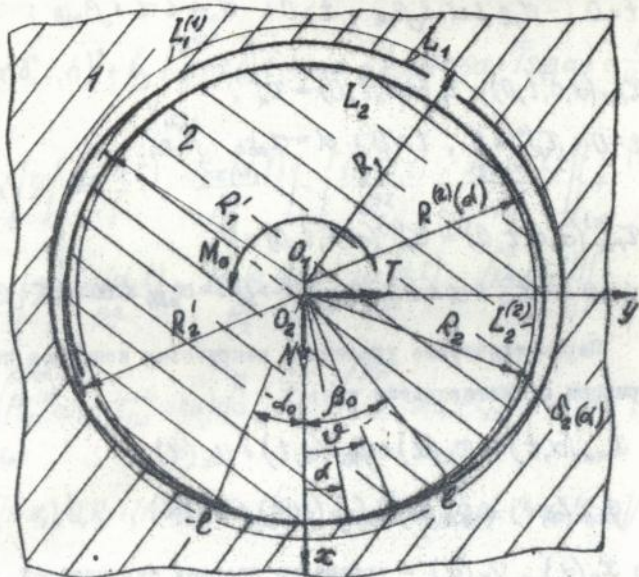


Рис. 2

Определяются начальные контактные давления ($t = 0$): нормальные $\sigma_r(\alpha, \delta)$ и касательные $\tau_{rx}(\alpha, \delta)$ или трибоконтактные давления ($t > 0$): $\sigma_r(\alpha, \delta, t, h)$ и $\tau_{rx}(\alpha, \delta, t, h)$. Полагается, что $R_1 \approx R_2 = R$, но радиальный зазор $\epsilon = R_1 - R_2 > 0$. Контуры L_x сопрягаемых тел приобретает малую некруглость обусловленную технологическими причинами или их износом. В первом случае рассматривается контактная, а во втором - трибокон-

тактная задача.

Вследствие малости некруглости, характеризуемой параметрами $\delta_K \ll R$ и износа, характеризуемого функцией $h_K(\alpha, t)$, граничные условия, как обосновано в диссертационной работе, отнесены к контурам опорных окружностей и имеют вид

$$\tau_{r\alpha}(\alpha, \delta, t, h) = f \sigma_r(\alpha, \delta, t, h), \quad \sigma_r(\alpha, \delta, t, h) = -p(\alpha, \delta, t, h),$$

$$t=0: -\alpha_{o\delta} \leq \alpha \leq \beta_{o\delta}, \quad t>0: -\alpha_{o\delta h} \leq \alpha \leq \beta_{o\delta h};$$

$$\tau_{r\alpha}(\alpha, \delta, t, 0) = \sigma_r(\alpha, \delta, t, 0) = \tau_K^{(0)}, \quad (10)$$

$$t=0: \tau_K^{(0)} = 0, \quad t>0: \alpha = \alpha_{o\delta h} = \beta_{o\delta h};$$

$$\tau_{r\alpha}^{(K)}(\alpha, \delta, t, 0) = \sigma_r^{(K)}(\alpha, \delta, t, 0) = 0,$$

$$t=0: -\alpha_{o\delta} \leq \alpha \leq 2x - \beta_{o\delta}, \quad t>0: -\alpha_{o\delta h} \leq \alpha \leq 2x - \beta_{o\delta h}.$$

Параметрические уравнения некруговых контуров после деформации представляются так:

$$x_{K*}(\alpha, t) = x_K(\alpha) + f_{Kx}(\alpha, t) + u_K(\alpha), \quad (11)$$

$$y_{K*}(\alpha, t) = y_K(\alpha) + f_{Ky}(\alpha, t) + v_K(\alpha),$$

где $x_K(\alpha)$, $y_K(\alpha)$ - уравнения опорных окружностей $L^{(K)}$ (рис. 2) до деформации; $f_{Kx}(\alpha, t)$, $f_{Ky}(\alpha, t)$ - характеристики некруглости контуров тел; $u_K(\alpha)$, $v_K(\alpha)$ - проекции векторов перемещений точек контуров тел при их деформации.

Кривизны $K_{K*}(\alpha, t)$ контуров L_K некруговых тел устанавливаются с использованием (11) по известной формуле для вычисления кривизны плоской кривой. С точностью до малых величин порядка $f_K^2(\alpha, t)/R^2$, между компонентами векто-

ров перемещений точек некруговых контуров тел и искомыми напряжениями имеется такая же связь, как и в случае круговых тел, установленная В.В.Панасюком. На основании этого основное уравнение задачи получено в виде

$$\begin{aligned}
 k_1 \int_{-\alpha_0 \delta}^{\beta_0 \delta} \operatorname{ctg} \frac{\alpha - \nu}{2} [p'(\alpha, \delta, t, h) + fp(\nu, \delta, t, h)] d\nu = k_2 [p(\alpha, \delta, t, h) - \\
 - fp'(\alpha, \delta, t, h)] + k_3 \int_{-\alpha_0 \delta}^{\beta_0 \delta} p(\alpha, \delta, t, h) d\alpha + k_4 (N \cos \alpha + \bar{T} \sin \alpha) + \frac{\varepsilon}{R_1 R_2} - \\
 - \sin \alpha \left\{ 2 \left[\frac{f'_{1x}(\alpha, t)}{R_1^2} - \frac{f'_{2x}(\alpha, t)}{R_2^2} \right] - \left[\frac{f''_{1y}(\alpha, t)}{R_1^2} - \frac{f''_{2y}(\alpha, t)}{R_2^2} \right] \right\} + \\
 + \cos \alpha \left\{ 2 \left[\frac{f'_{1y}(\alpha, t)}{R_1^2} - \frac{f'_{2y}(\alpha, t)}{R_2^2} \right] + \left[\frac{f''_{1x}(\alpha, t)}{R_1^2} - \frac{f''_{2x}(\alpha, t)}{R_2^2} \right] \right\}, \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$N = - \int_{-\alpha_0 \delta}^{\beta_0 \delta} (G_r^{(2)} \cos \alpha - \tau_{rx}^{(2)} \sin \alpha) d\alpha, \quad \bar{T} = - \int_{-\alpha_0 \delta}^{\beta_0 \delta} (G_r^{(2)} \sin \alpha + \tau_{rx}^{(2)} \cos \alpha) d\alpha;$$

$$k_1 = [(1 + \nu_1)/G_1 R_1 + (1 + \nu_2)/G_2 R_2] / 8\kappa, \quad k_2 = [(1 - \nu_2)/G_2 R_2 - (1 - \nu_1)/G_1 R_1] / 4,$$

$$k_3 = (1 + \nu_1) / 8\kappa G_1 R_1, \quad k_4 = [\nu_1 / G_1 R_1 + 1 / G_2 R_2] / 2\kappa;$$

κ - постоянная Колосова-Мусхелишвили, $\kappa = 3 - 4\nu$ (плоская деформация), $\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ (плоское напряженное состояние); G , ν - модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала; штрихи обозначают производные по α .

Соответственно

$$f_{kx}(\alpha, t) = x_k^*(\alpha) - x_k(\alpha) \pm h_{kx}(\alpha, t), \quad (13)$$

$$f_{ky}(\alpha, t) = y_k^*(\alpha) - y_k(\alpha) \pm h_{ky}(\alpha, t),$$

где $x^*(\alpha)$, $y^*(\alpha)$ – параметрическое уравнение контура тела с возмущением; при $K = 1$ здесь будет плюс, при $K = 2$ – минус.

В результате проведенных исследований построена математическая модель описания кинетики изнашивания трибосистем окольжения при граничных условиях (I0), состоящая из системы дифференциальных трибокинетических уравнений (9) и интегродифференциального уравнения (I2) для оценки нагруженности трибоконтакта.

Предложенным методом осуществлен расчет характеристик контактного взаимодействия некруговых тел. Для приближенного решения уравнения (I2) использован известный метод коллокаций. Здесь принято такое представление функции контактного давления:

$$p(\alpha, \delta) \approx (C_0 + C_2 \xi^2) \sqrt{d_{os}^2 - \xi^2}, \quad -d_{os} \leq \alpha \leq d_{os}, \quad (I4)$$

где $\xi = tg(0,5\alpha)$, $d_{os} = tg(0,5\alpha_{os})$, C_0 и C_2 – неизвестные коэффициенты.

Контактная задача решена для сопряжений эллиптических тел, находящихся под действием усилия N , при различных вариантах их взаиморасположения. Результаты ее численной реализации для случая плоской деформации свидетельствуют, что наблюдается заметное влияние некруглости на характеристики контактного взаимодействия, а его величина зависит от взаиморасположения тел, величин их эллиптичности, нагрузки N и радиального зазора \mathcal{E} . Результаты представлены графически в виде номограмм зависимости абсолютных или относительных (по сравнению с круговыми контурами) максимальных давлений на контакте и их распределения от характеристик некруглости тел. Они позволяют, во-первых, наглядно оценивать ха-

рактически и величину влияния на них некруглости и, во-вторых, провести по ним предложенным способом расчет параметров контактного взаимодействия для лобов, в исследуемом диапазоне, величин возмущений.

Стандартизованными видами некруглости реальных цилиндрических тел является, однако, овальность и огранка, не описываемые в канонической форме, как эллиптичность. Предложен способ описания огранки произвольной сложности обобщенными параметрическими уравнениями

$$x_{\kappa\ell}^{(\omega)}(\alpha) = r_{\kappa\ell}^{(\omega)}(\alpha) \cos \alpha, \quad y_{\kappa\ell}^{(\omega)}(\alpha) = r_{\kappa\ell}^{(\omega)}(\alpha) \sin \alpha, \quad (15)$$

где $r_{\kappa\ell}^{(\omega)}(\alpha) = a_{\kappa} [\delta_{\kappa}^{+} - (-1)^{\ell} \delta_{\kappa} \cos \omega \alpha]$ - радиус-вектор огранного контура; $\omega = 2, 3, 4, \dots$ коэффициент огранки ($\omega = 2$ - овальность, $\omega = 3$ - трехгранность и т.д.); $\ell = 1$; 2 - коэффициент взаиморасположения, $\ell = 1$ при $x_{\kappa} = a_{\kappa}$, $\ell = 2$ при $x_{\kappa} = b_{\kappa}$, a_{κ} , b_{κ} - соответственно максимальный и минимальный размеры (радиусы) тел (рис. 2);

С его использованием образована обширная группа сопряженных огранных тел различной сложности. Для них проведено численное решение частных случаев задачи. Установлено, что огранка оказывает существенное влияние на характеристики контакта. Для наиболее распространенных сопряжений и их групп изучены особенности этого влияния.

В результате предложен способ упрощенной оценки максимальных давлений и их распределения в сопряжениях одного типоразмера при изменении радиального зазора и параметра огранки тел. В качестве исходного для расчета используется любое из имеющихся решений, полученных ранее разработанными методами. С достаточной для инженерной практики точностью иско-

мые давления $p(0)_{\varepsilon-\delta}$ и полуугол контакта $\alpha_{0\varepsilon-\delta}$ рассчитываются так:

$$p(0)_{\varepsilon-\delta} \approx p(0)_{\varepsilon-} \tilde{\varepsilon}_{\rho\delta} \approx p(0)_{\varepsilon+} \tilde{\varepsilon}_{\rho} \tilde{\varepsilon}_{\rho\delta}, \quad (16)$$

$$\alpha_{0\varepsilon-\delta} \approx \alpha_{0\varepsilon-} \tilde{\varepsilon}_{\rho\delta}^{-1} \approx \alpha_{0\varepsilon+} \tilde{\varepsilon}_{\rho}^{-1} \tilde{\varepsilon}_{\rho\delta}^{-1}. \quad (17)$$

Здесь $p(0)_{\varepsilon-}$, $\alpha_{0\varepsilon-}$ — соответственно неизвестные давления и полуугол контакта для круговых тел; ε^+ , ε^- — радиальные зазоры соответственно для имеющегося и искомого решения задачи $\tilde{\varepsilon}_{\rho} = (\varepsilon^-/\varepsilon^+)^{0,5}$, $\tilde{\varepsilon}_{\rho\delta} = [1 \pm A_j(\delta_1/\varepsilon^-) \pm B_j(\delta_2/\varepsilon^-)]^{0,5}$, постоянные A_j , B_j и их знак зависят от вида сопряжения.

Решению триботехнических задач по расчету долговечности или износа систем скольжения посвящена пятая глава. Здесь рассмотрены такие трибосопряжения: гидроцилиндр выносных опор автомобильного крана, высшая кинематическая пара, цилиндрические направляющие, подшипники скольжения турбобура и опоры стреловой системы порталного крана.

Поставленные задачи решались различным образом в зависимости от величин линейных износов и кинематики элементов трибосистем. Для гидроцилиндра вследствие малых износов давление на трибоконтакте изменяется мало в сравнении с начальным, оценка величины которого проводится разработанным методом. В высшей кинематической паре и цилиндрической направляющей давление на трибоконтакте в общем может быть рассчитано по уравнению (12). Однако вследствие сложности практической реализации решения в этих задачах использован способ непосредственного установления вида функции $p(\alpha, \delta, t, h)$. Для подшипников скольжения и шарнирных опор стреловой системы крана приближенное решение задачи получено по уравнениям (9) и (12) математической модели исследования трибокинетики.

Расчет износа и долговечности трибосопряжений гидроцилиндра проведен для нескольких вариантов упрочнения материалов термообработкой, деформированием, покрытиями, что позволило оптимизировать их по износостойкости и экономичности.

При рассмотрении задач по износу элементов высшей кинематической пары цилиндр-полупространство, определению периода приработки цилиндрической направляющей или ее ресурса давление на трибоконтакте $p(\alpha, \delta, t, h)$ представляется следующим образом :

$$p(\alpha, \delta, t, h) = p(\alpha, \delta) \pm p(\alpha, h), \quad (18)$$

где $p(\alpha, h) \approx d_h h(\alpha, t)$ - изменение начального давления $p(\alpha, 0)$ или $p(\alpha, \delta)$, функция которого принимается в виде (14) или другим известным образом.

Полагая также, согласно гипотезе Винклера, начальное давление пропорциональным с коэффициентом d_h смещению точек контуров при их деформации, в результате их сравнения определяется его величина. Указанный прием позволил получить замкнутые решения этих задач в виде простых соотношений.

В общей постановке решена задача для подшипника скольжения и шарнирного соединения (опор). Здесь учитывается кинематика их элементов, наличие некруглости, покрытий различной толщины, упругость тел и различная износостойкость их материалов. Функция (18) здесь представляется таким образом:

$$p(\alpha, \delta, t, h) = E_\delta \varepsilon_\delta \sqrt{d_{\delta\delta}^2 - \xi^2} \pm E_h \varepsilon_h \sqrt{d_{\delta h}^2 - \xi^2}, \quad (19)$$

где $E_\delta = E_\delta(\alpha_{\delta\delta}, G, \nu, R)$, $E_h = E_h(\alpha_{\delta h}, G, \nu, R)$, $\varepsilon_\delta = \varepsilon - 0,5(\beta_1 D_1^{(\omega)} + \beta_2 D_2^{(\omega)})$, $D_k^{(\omega)}(\alpha_{\delta\delta}) = 1 - (\omega^2 - 1) \cos \omega(\alpha_{\delta\delta}/2)$ - характеристика огранки тела, $\alpha_{\delta h}$ - полуугол контакта при трибоконтактном взаимодействии ограненных или круглых ($\beta_k = 0$) тел,

$\varepsilon_h = \pm h_1 K_{\delta_3}^{(1)} \pm h_2 K_{\delta_3}^{(2)}$, $K_{\delta_3} = 0 \dots 1$ - коэффициент взаимного перекрытия элементов трибосопряжения, устанавливаемый кинематикой.

Расчет углов $\alpha_{o\delta}$, $\alpha_{o\delta h}$ проводится из уравнения равновесия

$$N = 4\kappa RE_{\delta} \varepsilon_{\delta} \sin^2 \frac{\alpha_{o\delta}}{4} = 4\kappa RE_h (\varepsilon_{\delta} + \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\alpha_{o\delta h}}{4} \quad (20)$$

С использованием результатов второй и четвертой глав функция долговечности здесь получена в следующем виде:

$$t_k(\alpha) = \frac{\bar{r} B_k (\tau_k^{(0)})^{m_k}}{v S_h (K_{\delta_3}^{(k)} \pm h'_k) (1 - m_k)} \left\{ [S_{\delta} \Sigma_{\delta} - \tau_k^{(0)}]^{1 - m_k} - [S_{\delta h} \Sigma_{\delta h} - \tau_k^{(0)}]^{1 - m_k} \right\} \quad (21)$$

Здесь $S_h = f \sqrt{d_{o\delta h}^2 - \xi^2} E_h$, $S_{\delta} = f \sqrt{d_{o\delta}^2 - \xi^2} E_{\delta}$, $\Sigma_{\delta} = \varepsilon_{\delta}$,

$\Sigma_{\delta h} = \varepsilon_{\delta} + \varepsilon_h$, $S_h S_{\delta}^{-1}$, $h'_1 = \Phi_1(\tau) / \Phi_2(\tau)$, $h'_2 = \Phi_2(\tau) / \Phi_1(\tau)$.

Для опор стрелы порталного крана рассчитан их сверхнормативный ресурс, оцененный по пути трения скольжения.

Разработанный метод охватывает имеющиеся варианты исполнения таких трибосистем при возвратно-поступательном, вращательном и качательном движении. В работе проведена численная реализация задачи для различных схем подшипников.

В шестой главе представлены результаты исследования трибоконтактного взаимодействия дисковых шарошек лобового действия с горным массивом. Здесь решена соответствующая контактная задача для инструмента, как тела двойной кривизны и массива, как упругого полупространства с характеристиками породы. Для описания формы рабочего клинового неизношенного или с износом профиля использован развитый в четвертой главе метод. Рассмотрены две возможные схемы взаимодействия инструмента с породой: при малых подачах Δ (аналог задачи

Герца) и реальных подачах (рис. 3). В последнем, практически важном, случае с учетом особенностей контактного взаимодействия разрушающее напряжение σ_* в породе связывается с

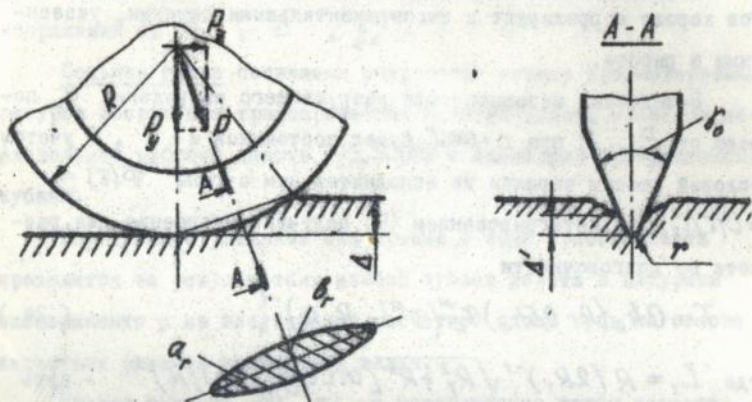


Рис. 3

напорно-перекатывающим усилием $P = \sqrt{P_y^2 + P_z^2}$ и параметрами a_r и b_r площадки контакта

$$\sigma_* = 1,5 P / \alpha a_r b_r, \quad (22)$$

где из рис. 3 $\alpha_r = R \sin [\arccos (R - \Delta) / R]$, $b_r = \sqrt{2 r_h \Delta' - \Delta'^2}$
 при $\Delta' \leq r_h (1 - \sin 0,5 \gamma_0)$, $b_r = [r_h (\sin^2 0,5 \gamma_0 - 1) + \Delta'] \operatorname{tg} 0,5 \gamma_0$
 при $\Delta' > r_h (1 - \sin 0,5 \gamma_0)$, $\Delta' = 0,45 \sqrt{\Delta}$, $r_h = r_{2r}^{(\omega)}(\alpha, h) =$

$$= 0,5 [(\delta_2^* - \delta h) + (\delta_2^* - \delta h) \cos \omega \alpha], \delta^* = 1 \text{ для } x, \delta^* = 0 \text{ для } y.$$

Полагается, что $\sigma_* = \alpha_k \rho_k$, где $\rho_k \approx 1,36 \sigma_g$ - контактная прочность пород, σ_g - их предел прочности при одноосном сжатии, $\alpha_k' = \alpha_k'(\rho_w, \rho_k, \Delta)$, ρ_w - шаг разрушения. Из рис. 3

$$P_y = P \cos [0,5 \arccos (R - \Delta) / R], P_z = P \sin [0,5 \arccos (R - \Delta) / R]. \quad (23)$$

Разработанная методика позволяет решить весьма важные для практики проходки горных выработок задачи - оценить уси-

лия P_y и P_z по заданной подаче Δ или рассчитать Δ в зависимости от P , характеристик породы, геометрических параметров инструмента, его износа. Результаты проведенных расчетов хорошо коррелируют с экспериментальными данными, указанными в работе.

Вследствие независимости разрушающего напряжения σ_* породы от P_y , P_z при $\Delta = const$ будет постоянной и τ . С учетом условий работы шарошки на исполнительном органе $\Phi(\tau) = C(\tau/\tau_s)^m$ и интегрированием (9) получено уравнение для расчета ее долговечности

$$T = Ch_* (R - 0,5h_*) \tau_s^m (\tau^n L_1 R_T n)^{-1}, \quad (24)$$

где $L_1 = R (2R_T)^{-1} \sqrt{R_T^2 + R^2} [\arccos(R-\Delta)/R]^2$ - путь трения точки вершины шарошки за один оборот, n - частота вращения исполнительного органа, h_* - допустимый радиальный износ, R_T - радиус траектории перекатывания шарошки, $\tau = f\sigma_*$.

Характеристики износостойкости C, m стали XI2M установлены за результатами ее экспериментальных трибологических исследований изнашивания с породами, проведенных по методикам третьей главы на сконструированном испытательной стенде.

Сравнение расчетной долговечности шарошек с имеющимися в литературе данными и результатами промышленной отработки свидетельствует об корректности разработанного метода.

Эффективность проходки зависит от величины подачи инструмента на забой, которая, в свою очередь, по (23) связана с силовыми параметрами процесса. Однако их увеличение сверх допустимых значений приведет к разрушению обода шарошки.

Здесь разработан приближенный метод оценки прочности ее венца. С этой целью использовано известное решение задачи о действии сосредоточенных усилий на вершину клина. Оно трансформи-

ровано на случай клина со скругленной вершиной с учетом особенностей силовой схемы взаимодействия шарошки с массивом. Исследована зависимость максимальных эквивалентных напряжений от ρ_k , Δ , γ_0 .

Седьмая глава посвящена разработке метода прогнозирования ресурса вооружения трехшарошечных буровых долот. Объектом исследования выбрано долото 295,3 СВ с клиновыми притупленными зубами.

Определение удельных сил трения в зоне трибоконтакта проводится за результатами износа зубьев долота в натурном эксперименте и из соотношений расчетной схемы зуба на основе известных решений контактных задач.

Расчет функций $\Phi^{(i)}(r)$ и установление затем характеристик C, m стали 20ХНЗА проведено за результатами трибоэксперимента долота на стенде.

С учетом особенностей работы долота при бурении пород получены уравнения для расчета ресурса его вооружения

$$T = \frac{R_0}{60u^2 \dot{\gamma} n_g \rho_{ш} \tau_0^m a_r m} (e^{a_r m} - 1), \quad (25)$$

$$T = \frac{R_0 C \tau_0^m}{30u^2 \dot{\gamma} n_g \rho_{ш} f^m} \frac{[\pi l_x (1 - \nu^2)]^{\frac{m}{2}} \left(\frac{\rho_n \cos \frac{\delta_0}{2} + h_n \sin \frac{\delta_0}{2} \right)^{\frac{m}{2} + 1} - \left(\frac{\rho_n \cos \frac{\delta_0}{2}}{2} \right)^{\frac{m}{2} + 1}}{(m+2) \sin \frac{\delta_0}{2}} \quad (26)$$

Здесь R_0 , $\dot{\gamma}$ - соответственно радиус обкатывания венцов по забов и радиусы венцов шарошки, $u = n_{ш} / n_g$ - передаточное отношение долота, $n_{ш}$ и n_g - частоты вращений шарошки и долота, τ_0 - начальная (при $\dot{\gamma} = 0$) удельная сила трения, a_r - постоянная, l_x - суммарная длина контакта зубьев долота с породой, δ_0 - угол заострения клиновой части зуба, l_n - ширина начальной площадки притупления зуба.

Численное решение хорошо коррелирует с данными промышленной отработки долот.

В восьмой главе изложены положения метода оптимизации бурения скважин долотами и проходки горных выработок дисковыми шарошками. Проведен выбор, применительно каждому из процессов, критериев оптимизации: для проходки - максимум проходки H_{max} и максимум проходки q_{max} на единицу затрат; для бурения - максимум рейсовой скорости v_{pmax} бурения. Они соответственно представляются так:

$$H = n \Delta T, \quad q = n \Delta T C_D^{-1}, \quad v_p = \frac{v_M v_C T}{v_C T + H}, \quad (27)$$

где C_D - стоимость шарошки, v_C - скорость спуско-подъемных операций, H - глубина скважины, v_M - механическая скорость бурения.

Переменные Δ , v_M и T зависят от ряда факторов a_i , условно разделенных на режимные, конструктивные, породы, материала. В результате оптимизации процесса по принятым значимым факторам влияния, обеспечиваются относительные максимумы принятых критериев. Для их исследования необходимо построить многопараметрические зависимости $\Delta = \Delta(a_1, a_2, \dots, a_i)$ и $v_M = v_M(a_1', a_2', \dots, a_i')$. Структура зависимостей для долговечности установлена ранее в виде (24) - (26).

Для построения указанных зависимостей использован известный в механике разрушения материалов метод граничной интерполяции, где общее решение многопараметрической задачи представляется через решения некоторых частных однопараметрических задач. Применительно к разрушению пород бурением это зависимости, связывающие Δ или v_M с каждым из значимых факторов a_i , a_i' в отдельности.

Соответственно $\Delta(a_i)$ и $\psi_M(a_i')$ представляются функциями

$$\Delta(a_i) = F(a_i) = F(b_i + x_i) = F(b_1 + x_1, b_2 + x_2, \dots, b_i + x_i). \quad (28)$$

$$\psi_M(a_i') = F(a_i') = F(b_i' + x_i') = F(b_1' + x_1', b_2' + x_2', \dots, b_i' + x_i'). \quad (29)$$

Здесь b_i, b_i' - начальное значение i -го фактора; $x_i \ll b_i, x_i' \ll b_i'$ - вариация факторов.

Разложением в ряд (28) и (29) в окрестности точек b_i, b_i' , пренебрегая величинами высших порядков малости, получено, что

$$\Delta(a_i) \approx -(i-1)F(b_1, b_2, \dots, b_i) + \sum_j^i F_i(b_1, \dots, b_{i-1}, b_i + x_i), \quad (30)$$

$$\psi_M(a_i') \approx -(i-1)F(b_1', b_2', \dots, b_i') + \sum_j^i F_i(b_1', \dots, b_{i-1}', b_i' + x_i'). \quad (31)$$

Применительно трехшарошечным буровым долотам по имеющимся литературным данным возможно построить однопараметрические зависимости $\psi_M \sim P_y, \psi_M \sim n_d, \psi_M \sim K_c$. Этого недостаточно для решения задачи оптимизации процесса. Поэтому, в дальнейшем, решена задача о разрушении массива клиновым зубом со скругленной в процессе износа вершиной радиуса r_i' , позволяющая, с учетом особенностей работы долота на забое, получить функцию ψ_M . С использованием зависимости $\psi_M \sim K_c$ на основании (31) получено, что

$$\psi_M(a_i') \approx \frac{7,2 K_g^{1/2} r_i'^{3/2} U}{R_0 \rho_{из}} \left[\sqrt{1 + \frac{1 - \text{tg}^2 \alpha/2}{4 \text{tg}^2 \alpha/2}} \right]^2 + \frac{C_d P_y^{1/2}}{2 l_z z_k \text{tg}^2 \alpha/2} - r_i' \frac{1 - \text{tg}^2 \alpha/2}{4 \text{tg}^2 \alpha/2} \Big|^3 + U_{an} + C_k K_c^{1/2} - \tilde{\psi}_M, \quad (32)$$

где $K_g = 1, 2, 3$ - количество венцов, перекрывающихся по забое одного диаметра; C_d, U_1, U_2, U_3, C_k - постоянные, уста-

нарливаемые обработкой опытных данных; l_z, z_k - длина и количество зубьев, одновременно взаимодействующих с забоем; $\tilde{v}_m = F(v_1', v_2', \dots, v_i')$ - известная начальная скорость бурения для совокупности факторов v_i' ; $v_{om} = v_m$ при $K_c = 0$.

С использованием функций $T(a_i')$ и $v_m(a_i')$ по критерию v_p проведен поиск его максимума для долота 295,3 СГВ, что позволило получить оптимальные значения его конструктивных параметров и режимов обработки. В дальнейшем выбрано долото с параметрами, близкими к оптимальным и, в последующем, оптимизированы для него режимы бурения для проводки скважин в Бориславском УБР.

По литературным данным для дисковых шарошек построены однопараметрические зависимости Δ от a_i и в соответствии с (30) установлено, что

$$\Delta(a_i) \approx -5\Delta_0 + C_{p_k}(\rho_k/\rho_k^*)^{z_k} + C_p(F_y/P_y^*)^{z_p} + C_D(D/D_0)^{z_D} + C_r(r/r_0)^{z_r} + C_\gamma \cos^{z_\gamma}(\gamma - 50^\circ) + C_{\rho_{ш}} \ln^{z_\rho}(\rho_{ш}/\rho_{ш0}), \quad (33)$$

где $\Delta_0 = F(v_1, v_2, \dots, v_i)$ - известная подача для совокупности факторов v_i ; $C_i; z_i$ - рассчитываются по опытным данным; $D = 2R$; $\rho_k^* = 2000$ МПа; $P_y^* = 250$ кН - максимальное напорное усилие на шарошку для существующих проходческих комплексов; $D_0 = 200$ мм; $r_0 = 1,5$ мм - минимальное рекомендуемое значение радиуса округления; $\rho_{ш0} = 40$ мм.

Для оптимизации использованы критерии H и q , однако вследствие более простой структуры предпочтителен критерий H . С его применением оптимизирован диаметр шарошек в зависимости от их расположения по центральной части исполнительных органов комбайнов "Совз-І9У", "Роббино", "Вирт".

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена расчетная модель локального трибоконтактно-усталостного разрушения материалов при трении скольжения твердых деформируемых тел. Установлена в результате основная система трибокинетических дифференциальных уравнений в частных производных. Проведено обобщение модели на случай континуального трибоконтакта.

2. Разработана методика прогнозирования функций износостойкости материалов при локально-усталостном разрушении шероховатых тел.

3. Предложены методики расчета по результатам трибоэкспериментальных исследований принятого базисного параметра модели — функции износостойкости материалов для схем дискретного и континуального трибоконтакта.

4. Проведены трибологические исследования гаммы конструкционных материалов и защитных покрытий при сухом и граничном трении, различных видах абразивного изнашивания, за результатами которых рассчитаны функции их износостойкости, установлены характеристики усталостно-фрикционной стойкости и построены диаграммы износостойкости.

5. Для оценки нагруженности трибоконтакта цилиндрических сопряжений тел с контурами близкими к круговым разработан метод расчета контактных давлений.

6. Построена математическая модель (замкнутая система уравнений) для исследования кинетики изнашивания трибосистем скольжения.

7. Предложен способ описания ограниченных тел и исследовано влияние эллиптичности и отбраки на характеристики контактно-

ного взаимодействия различных видов сопряжений.

8. Разработан способ упрощенной оценки характеристик контакта круговых и ограненных тел одностипных сопряжений при вариации в них радиального зазора и огранки.

9. Осуществлена постановка ряда трибоконтактных задач для сопряжений тел с круговыми или ограненными контурами, предложены методы решения.

10. Исследовано трибоконтактное взаимодействие дисковой лобовой шарошки с горным массивом и разработан метод прогнозирования ее стойкости.

11. Предложена методика расчета силовых параметров процесса проходки горных выработок бурением и подачи инструмента.

12. Разработана методика расчета прочности венца дисковых шарошек и прогнозирования подачи в зависимости от его формы и прочности разрушаемых пород.

13. Исследовано трибоконтактное взаимодействие вооружения трехшарошечных буровых долот с забоем и предложены методы расчета его стойкости.

14. Проведены трибоэкспериментальные исследования материалов дисковых шарошек и долот и установлены их характеристики износостойкости.

15. Разработан метод оптимизации конструкций породопроходческого инструмента и процессов бурения. Проведен выбор критериев оптимизации, построены целевые функции механической скорости бурения и подачи.

16. Проведена оптимизация конструкции долота 295,3 СГВ и режимов его обработки, что позволило рекомендовать для

практического бурения скважин в Бориславском УБР долото 295,3 МГВ-I с близкими к оптимальным геометрическими параметрами. В результате оптимизации конструкции дисковых ша-рошек для исполнительных органов проходческих комплексов "Совз - I9У", "Роббинс", "Вирт" рекомендовано изменение типоразмеров инструмента, а также изменение схемы их расположения ("Совз - I9У").

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Чернец М.В. Определение времени приработки двух цилиндрических деталей //Физ.хим.механика материалов. - 1981. - № 3. - С. 101 - 104.

2. Чернец М.В. О контактировании цилиндрических тел с овальной формой контуров, мало отличной от круговой, при их внутреннем соприкосновении //Прикл.механика, 1987. - № 5. - С. 42 - 46.

3. Чернец М.В. Влияние возмущения контуров аксиальных цилиндров на характеристики контактного взаимодействия //Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1987. - № 3. - С. 25 - 27.

4. Чернец М.В. К вопросу об исследовании кинетики изнашивания материалов при некоторых видах трения скольжения //Трение и износ. - 1987. - № 4. - С. 662 - 670.

5. Чернец М.В. Метод оценки стойкости возмущения буровых долот //Физ.хим. механика материалов. - 1991. - № 3. - С. 121 - 124.

6. Чернец М.В. Об упрощенной оценке контактных характеристик в цилиндрическом сопряжении круговых и ограниченных тел //Докл. АН УССР. Сер. А. - 1991. - № 1. - С. 27 - 30.

7. Чернец М.В. Об одном методе расчета цилиндрических сопряжений поступательного движения // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1991. - № 4. - С. 53 - 55.
8. Чернец М.В. Об одном методе решения задачи для подшипника скольжения // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1991. - № 6. - С. 50 - 52.
9. Чернец М.В. Напряженное состояние трубы при воздействии наружного давления // Физ.хим. механика материалов. - 1980, - № 3. - С. 91 - 94. (Совместно с Теплым М.И.),
10. Чернец М.В. Об одной задаче для кругового кольца // Прикл. механика. - 1980. - № 10. - С. 75 - 81 (Совместно с Теплым М.И.),
11. Чернец М.В. К теории изгиба материалов при сухом трении // Физ.хим. механика материалов. - 1981. - № 2. - С. 51 - 57 (Совместно с Андрейкивым А.В., Панасюком В.В.),
12. Чернец М.В. Контактные давления в цилиндрических телах, контуры которых близки к окружности // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1981. - № 5. - С. 57 - 61 (Совместно с Панасюком В.В., Андрейкивым А.В.),
13. Чернец М.В. К теории контактной прочности элементов конструкций // Физ.хим. механика материалов. - 1981. - № 6. - С. 69 - 72 (Совместно с Панасюком В.В., Андрейкивым А.В.),
14. Чернец М.В. К оценке износа подвижных сопряжений гидроцилиндра выносных опор автокранов и подбору оптимальных сочетаний материалов их пар трения // - Львов, 1982. - 18 с. - Деп. в ВИНТИ 15.09.82, № 48 (Совместно с Андрейкивым А.В., Голубцом В.И., Лифшицем М.И., Швидлером А.П.).

15. Чернец М.В. О расчете долговечности диффузионных покрытий при абразивном изнашивании // Физ.хим. механика материалов. - 1983. - № 6. - С. 110 - 111 (Совместно с Голубцом В.М.).

16. Чернец М.В. Об одном способе описания контуров цилиндрических деталей, имеющих овальность или огранку. - Львов, 1985. - 10 с. - Деп. в ВИНТИ 22.04.85, № 2684 (Совместно со Скварком М.В.).

17. Чернец М.В. О решении контактной задачи для цилиндрических тел огранной конфигурации при их внутреннем соприкосновении //Пробл. прочности. - 1987. - № 6. - С.103-106 (Совместно с Гончакиским И.Н., Скварком М.В.).

18. Чернец М.В. К вопросу оптимизации процесса проходки горных выработок бурением //Физ.хим. механика материалов. - 1989. - № 2. - С. 62 - 66 (Совместно с Андрейкивым А.В., Панасюком В.В., Скварком М.В.).

19. Чернец М.В. Оптимизация процесса разрушения горных пород бурением // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1989. - № 2. - С. 34 - 37 (Совместно с Панасюком В.В., Андрейкивым А.В., Скварком М.В., Янивим П.П.).

20. Чернец М.В. Метод оценки характеристик контактного взаимодействия деталей цилиндрических сопряжений. - Львов, 1989. - 107 с. - (Препр. АН УССР. Физ.-мех.ин-т; № 159) (Совместно с Андрейкивым А.В., Панасюком В.В.).

21. Чернец М.В. О влиянии пульпы железорудного концентрата на разрушение трубных сталей //Физ.хим. механика материалов. - 1990. - № 2. - С. 120 - 125 (Совместно с Андрейкивым А.В.).

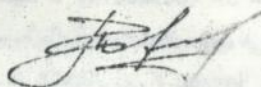
22. Чернец М.В. Определение нагруженности лобовой шарошки при разрушении горного массива // Физ. хим. механика материалов. - 1990. - № 4. - С. 96 - 99 (Совместно с Андрейкиным А.В., Скварком Ю.Ю.).

23. Чернец М.В. Расчет стойкости и оптимизация конструкций дискового шарошечного инструмента. - Львов, 1991. - 78 с. - (Препр. АН УССР. Физ.-мех. ин-т. ; № 177) (Совместно с Андрейкиным А.В., Скварком Ю.Ю.).

24. Чернец М.В. Прогнозирование износа цилиндрических направляющих // Физ. хим. механика материалов. - 1991. - № 4, - С. 66 - 70 (Совместно с Андрейкиным А.В.).

25. Чернец М.В. Метод расчета долговечности опор скольжения турбобура ЗТШ - 195 ТЛ // Физ. хим. механика материалов. - 1991. - № 6. - С. 115 - 117 (Совместно с Голубцом В.И.).

26. Чернец М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. - Киев: Наук. думка, 1991. - 170 с. (Совместно с Андрейкиным А.В.).



Подписано к печати 29.10.91. Формат 60x84/16.
Объем 2 печ. листа, Зак. 709. Тир. 100, Бесплатно.

Отпечатано офсетным способом
в учебно-экспериментальной типографии
Украинского полиграфического института
имени Ивана Федорова
г. Львов-4, ул. Дичаківська 3.

466692

БЕСПЛАТНО.

АВ 25.392

[Handwritten signature]

[Handwritten signature]