

На правах рукописи
УДК 621.839, 621.891

НОСКО Алексей Павлович

**МЕТОД РАСЧЁТА ТЕМПЕРАТУР В ОБЛАСТИ КОНТАКТА
ЭЛЕМЕНТОВ ПАР ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ
ПОДЪЁМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

Специальности:

- 05.05.04 — Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины;
- 05.02.04 — Трение и износ в машинах.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2010

Диссертационная работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель	кандидат технических наук, доцент Ромашко Александр Мефодиевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Густов Юрий Иванович; кандидат технических наук Потапов Валентин Алексеевич
Ведущая организация	Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

Защита диссертации состоится 28 июня 2010 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.07 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: г. Москва, 105005, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан „ ____ “ _____ 2010 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
д. т. н., проф.

_____ Гладов Г. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одними из важнейших элементов подъёмно-транспортной машины (ПТМ), обеспечивающими её безопасную эксплуатацию, являются тормоза. Во фрикционных тормозах сухого трения при торможении механическая энергия преобразуется в тепловую. Интенсификация работы ПТМ, стремление к снижению массы и габаритов их элементов приводят к тому, что по мере совершенствования машин их тормоза испытывают всё большие механические и тепловые нагрузки.

Для повышения энергоёмкости тормозов создаются и внедряются новые фрикционные материалы, способные работать при высоких тепловых нагрузках. Для рационального применения этих материалов важно адекватно сопоставлять показатели материалов, полученные при лабораторных испытаниях и при испытаниях реальных тормозов.

Известно, что температура является информативным показателем степени нагружения фрикционной пары, позволяющим прогнозировать работоспособность и долговечность тормоза. Несмотря на то, что разработке экспериментальных и теоретических методов определения температур в области трения посвящено много исследований, до сих пор лишь в отдельных случаях удается достаточно точно воспроизводить взаимосвязи между температурой и интенсивностью изнашивания, температурой и коэффициентом трения. Сложность задачи заключается в том, что физические процессы, происходящие в микрообъёмах, до настоящего времени рассчитываются и измеряются преимущественно на макроуровне.

Для правильной оценки работы фрикционных материалов в реальных тормозах на основе результатов лабораторных испытаний необходимы достоверные методы определения температур в области трения. Поэтому разработка новых методов расчёта температур в области контакта элементов фрикционных пар тормозов ПТМ является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка метода расчёта температур в области контакта элементов пар трения тормозных устройств ПТМ, учитывающего дискретность взаимодействия, особенности фрикционного тепловыделения и контактного теплообмена. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов теоретического определения контактной температуры и выбрать основные направления исследований.
2. Разработать методику выбора модели геометрии контакта на основе исследования влияния дискретности фрикционного взаимодействия на тепломеханические процессы.
3. Проанализировать условия фрикционного теплового контакта и получить точные решения геометрически одномерных задач нестационарного теплообмена.

онарной теплопроводности для тел трения с учётом особенностей фрикционного тепловыделения и контактного теплообмена.

4. Исследовать распределение тепловых потоков при трении. Описать характер изменения температуры на фрикционной поверхности полимерной накладке тормоза ПТМ с учётом распределения тепловых потоков.
5. Разработать модель дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом для описания тепломеханических процессов в полимерной накладке тормоза ПТМ.
6. Исследовать влияние дискретности контакта и интенсивности контактного теплообмена на характер распределения давлений и температур в подобластях дискретного взаимодействия.
7. Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований контактной температуры во фрикционной паре тормоза ПТМ.

Объектом исследования являются тепловые и механические процессы в трибологических системах.

Предметом исследования являются закономерности изменения температур в области контакта элементов пар трения тормозов ПТМ.

Методы исследования. Получение точных решений задач нестационарной теплопроводности для тел трения основано на методе интегрального преобразования Лапласа и методах теории функций комплексного переменного. Для анализа указанных решений и разработки модели дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом применены методы векторного, матричного, дифференциального и интегрального исчислений. Анализ тепломеханических процессов при дискретном контакте тел трения и обработка результатов экспериментального исследования контактной температуры во фрикционной паре тормоза ПТМ проведены с применением методов теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна. Разработан новый метод расчёта температур в области контакта элементов пар трения тормозных устройств ПТМ, учитывающий особенности фрикционного теплового взаимодействия: дискретность контакта, характер распределения тепловой энергии между трибоэлементами, неравномерность распределения механической и тепловой нагрузок на поверхности трения, а также их перераспределение во времени.

1. Предложена классификация тепловых задач сухого трения в зависимости от степени непрерывности контакта. Разработан критерий выбора модели геометрии контакта, который позволяет определить класс конкретной тепловой задачи трения.
2. Установлена закономерность распределения плотности тепловых потоков и временные зависимости контактных температур при тепловом контакте тел трения.

3. Получены зависимости распределения давлений и температур в под-областях контакта тела трения с абсолютно жёстким контртелом.

Практическая ценность. Предложен метод расчёта температур в области контакта элементов пар трения тормозных устройств ПТМ, позволяющий более точно определять температуры при оценке фрикционно-износных характеристик фрикционных материалов, а также при оценке работоспособности и долговечности тормозов.

1. Разработана методика выбора модели геометрии контакта, позволяющая учесть степень непрерывности контакта при решении тепловых задач трения.
2. Разработана методика приближённого расчёта нестационарных температур в трибоэлементах тормозов ПТМ.
3. Разработана модель дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом и компьютерная программа расчёта давлений и температур в подобластях взаимодействия трибоэлементов тормозов ПТМ.

Внедрение результатов работы. Метод расчёта температур в области контакта элементов пар трения тормозных устройств ПТМ применяется в ОАО «Авиационная корпорация «Рубин» (г. Балашиха, РФ). Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре подъёмно-транспортных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана и на кафедре подъёмно-транспортной техники Восточнoукраинского национального университета имени Владимира Даля (г. Луганск, Украина).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов на 10-ой, 11-ой, 12-ой и 13-ой Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (РФ; 2006, 2007, 2008 и 2009 г. соответственно), на 18-ой Международной Интернет-конференции молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения при Институте машиноведения им. А. А. Благовраова РАН (РФ, 2006 г.), на 1-ой Московской межвузовской научно-практической конференции «Студенческая наука» (РФ, 2006 г.), на международном семинаре «Тормоза ПТМ и оборудования — 2006. Нормативно-техническая база и тенденции развития» при МГТУ им. Н. Э. Баумана (РФ, 2006 г.), на 8-ом Международном симпозиуме украинских инженеров-механиков во Львове (Украина, 2007 г.), на Научно-методическом семинаре для студентов и аспирантов при кафедре прикладной математики МГТУ им. Н. Э. Баумана (РФ, 2007 г.), на 6-ом Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Беларусь, 2008 г.), на Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Беларусь, 2009 г.), на 4-ом Международном трибологическом конгрессе (Япония, 2009 г.), на Научном семинаре по трению и

износу в машинах им. М. М. Хрущева при Институте машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (РФ, 2010 г.).

Диссертационная работа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры подъёмно-транспортных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана (2010 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научные работы: 1 монография; 13 статей в журналах, входящих в перечни ВАК РФ, Украины и Беларуси; 10 тезисов конференций.

Личный вклад соискателя в опубликованных работах:

- методика выбора модели геометрии контакта [16, 17];
- классификация условий фрикционного теплового контакта [1, 24];
- математические модели задач нестационарной теплопроводности для тел трения с неидеальным тепловым контактом согласно условиям Барбера–Протасова и закономерность распределения плотности тепловых потоков [2, 3, 9, 10, 11];
- математическая модель задачи нестационарной теплопроводности в полуограниченном теле с обобщённым граничным условием [4, 23];
- описание характера изменения температуры на поверхности трения полимерной накладке тормозного устройства [8, 13, 14, 15, 20, 21, 22];
- математическая модель дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом [5, 6, 7, 12, 18, 19].

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и приложения. Она содержит 135 страниц текста, при этом 11 таблиц на 4 страницах, 50 рисунков на 13 страницах, приложение на 8 страницах и 108 литературных источников на 10 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, указаны применяемые в работе методы исследования, сформулированы научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** проведён анализ существующих подходов и методов к теоретическому определению температуры в области контакта тел трения и определены основные направления исследований.

Значительный вклад в теорию тепловой динамики и механики фрикционного контакта внесли научные школы РФ, Украины и Беларуси (современные названия): Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (Гинзбург А. Г., Дроздов Ю. Н., Игнатъева З. В., Коровчинский М. В., Крагельский И. В., Чичинадзе А. В., Щедров В. С.), Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН (Александров В. М., Горячева И. Г., Добычин М. Н.), Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского (Протасов Б. В.), Тверской государственный технический университет (Дёмкин Н. Б.), Институт прикладных проблем механики и ма-

тематики им. Я. С. Подстригача НАНУ (Подстригач Я. С., Шевчук П. Р.), Львовский национальный университет им. И. Франко (Грилицкий Д. В.), Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ (Балакин В. А., Мышкин Н. К., Петроковец М. И.). Кроме того, необходимо отметить фамилии учёных различных трибологических школ мира: Barber J. R., Berry G. A., Blok H., Bowden F. P., Charron F., Hasselgruber H., Jaeger J. C., Johnson K. L., Ling F. F., Ridler E. W., Tabor D.

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования температур в элементах пар трения тормозных устройств ПТМ проведены на кафедре подъёмно-транспортных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана (Александров М. П., Носко А. Л., Ромашко А. М., Чиналиев О. К.).

Анализ работ перечисленных выше учёных показал, что существуют следующие подходы к теоретическому определению температурных полей в телах трения:

1. С точки зрения схематизации геометрии контакта:

- классическая постановка краевой задачи нестационарной теплопроводности для тел трения с непрерывной областью контакта;
- применение модели дискретного фрикционного контакта.

2. С точки зрения условий теплового контакта:

- задание условий идеального фрикционного теплового контакта, предполагающие баланс тепловой энергии и непрерывность поля T температур в области $x = 0$ контакта тел 1 и 2 для каждого момента времени $t > 0$ (рис. 1, а);
- учёт сложных тепломеханических процессов трения, протекающих в «третьем теле» 3 (рис. 1, б), с помощью модели неидеального теплового контакта (рис. 1, в), предполагающей замену «третьего тела» физической поверхностью с приведёнными параметрами.

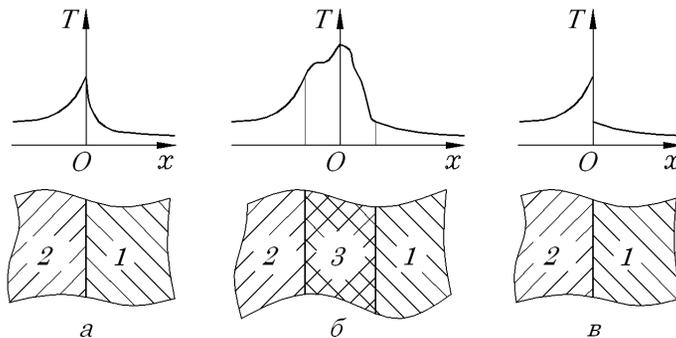


Рис. 1

Вместе с тем, как показал обзор литературы, до настоящего времени не разработана методика, позволяющая учесть влияние дискретности фрик-

ционного взаимодействия на тепломеханические процессы и обосновывающая рациональный подход к решению конкретной тепловой задачи трения с точки зрения схематизации геометрии контакта. Кроме того, недостаточно исследованы особенности фрикционного тепловыделения и контактного теплообмена в тормозах ПТМ, которые обуславливают подтверждённую экспериментальным путём неидеальность теплового взаимодействия элементов фрикционных пар.

На основе проведённого анализа определены основные направления теоретических исследований.

Вторая глава посвящена разработке методики выбора модели геометрии контакта на основе анализа влияния дискретности фрикционного взаимодействия на тепломеханические процессы.

Для описания степени непрерывности области A_d дискретного контакта тел трения выбран параметр

$$s = \frac{2r}{d}, \quad 0 < s \leq 1,$$

где r — радиус подобласти контакта, а d — расстояние между центрами соседних подобластей (рис. 2).

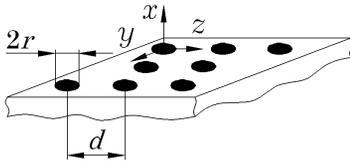


Рис. 2

Обоснована целесообразность применения схем размещения подобластей контакта, представленных на рис. 3, для исследования тепломеханических процессов трения.

Решена задача нестационарной теплопроводности для полупространства, на поверхности которого задана плотность теплового потока в следующих областях: номинальная область A_n контакта, область A_d , единичная подобласть A_e контакта.

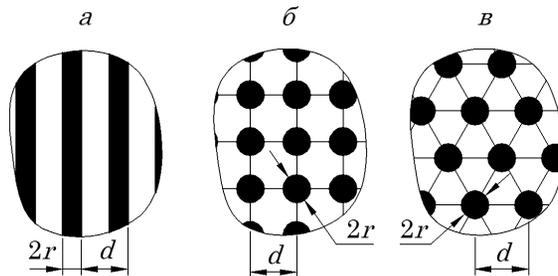


Рис. 3

Исследована погрешность ε_R допущения о равномерном распределении плотности фрикционного теплового потока в области A_n . Для этого определена величина R равномерности распределения контактной температуры,

которая равна отношению максимальной температуры T_d на поверхности полупространства при его нагреве в области T_d к поверхностной температуре T_n полупространства при его равномоном нагреве в области A_n :

$$R = 1 - \varepsilon_R = \frac{T_n}{T_d}, \quad 0 < R \leq 1. \quad (1)$$

Проведено исследование погрешности ε_U допущения об отсутствии взаимного теплового влияния подобластей контакта. Данная погрешность определена с помощью величины U , которая характеризует степень незначительности взаимного теплового влияния подобластей контакта и равна отношению максимальной температуры T_e на поверхности полупространства при его нагреве в подобласти A_e к температуре T_d , т. е.

$$U = 1 - \varepsilon_U = \frac{T_e}{T_d}, \quad 0 < U < 1. \quad (2)$$

С учётом зависимостей (1) и (2) для заданного значения Fo безразмерного времени (числа Фурье) предложено выделить интервалы параметра s , в каждом из которых тепловые процессы имеют качественное сходство.

Условие

$$R(s) > 1 - \varepsilon_R \quad (3)$$

определяет интервал \mathcal{A} параметра s , в котором контакт тел целесообразно считать непрерывным, а распределение плотности теплового потока на поверхности трения — равномерным.

Условие

$$U(s) > 1 - \varepsilon_U \quad (4)$$

определяет интервал \mathcal{C} , в котором взаимным тепловым влиянием подобластей контакта целесообразно пренебречь.

Условия (3) и (4) положены в основу критерия выбора модели геометрии контакта.

На рис. 4 в качестве примера показан результат применения указанного критерия к тепловой задаче трения с подобластями контакта в виде бесконечных полос (см. рис. 3, а) при $Fo = 10$, $\varepsilon_R = 0,1$, $\varepsilon_U = 0,05$. Точками s_R и s_U , являющимися корнями соответствующих уравнений (1) и (2), определены интервалы

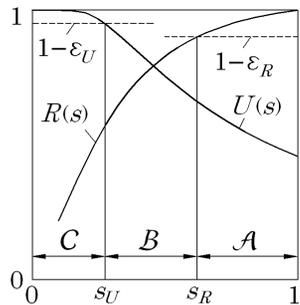


Рис. 4

$$\mathcal{C} = \{s | s \in (0, s_U)\}, \quad \mathcal{B} = \{s | s \in (s_U, s_R)\}, \quad \mathcal{A} = \{s | s \in (s_R, 1)\}.$$

На основе критерия выбора модели геометрии контакта предложена классификация, согласно которой множество тепловых задач сухого трения разделяется на 3 класса задач (см. рис. 4): \mathcal{A} — задачи с непрерывным

контактом; \mathcal{B} — задачи с насыщенным дискретным контактом; \mathcal{C} — задачи с ненасыщенным дискретным контактом.

В **третьей главе** предложена классификация условий фрикционного теплового контакта, получены точные решения геометрически одномерных задач нестационарной теплопроводности для тел трения с тепловым контактом согласно условиям Барбера–Протасова, исследовано распределение плотности тепловых потоков и описан характер изменения температуры на поверхности трения полимерной накладке тормоза ПТМ.

На основе анализа условий фрикционного теплового контакта показано, что для расчёта температур T_1 и T_2 тел трения в номинальной области $x = 0$ взаимодействия целесообразно использовать условия неидеального теплового контакта согласно Барберу–Протасову:

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha_{\text{эТ}} q(t) - \gamma(T_1 - T_2) \Big|_{x=0}; \\ \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} &= (1 - \alpha_{\text{эТ}}) q(t) + \gamma(T_1 - T_2) \Big|_{x=0}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{эТ}}$ — коэффициент распределения энергии трения, определяющий долю выделяющейся на поверхности трения первого тела тепловой энергии; γ — контактная тепловая проводимость; λ_1 и λ_2 — коэффициент теплопроводности первого и второго тела соответственно; q — удельная мощность фрикционного тепловыделения.

Предложена классификация условий фрикционного теплового взаимодействия (рис. 5). Показано, что условия Барбера–Протасова являются обобщением известных контактных условий.

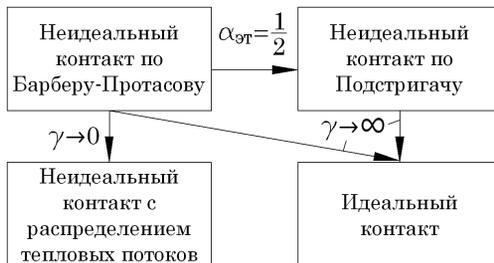


Рис. 5

Получены точные решения геометрически одномерных задач нестационарной теплопроводности для следующих случаев: контакт полупространств, контакт полупространства и слоя, полупространство с обобщённым граничным условием и контакт плоскопараллельных слоёв. В области взаимодействия приняты условия (5).

На основе анализа решений вышеперечисленных задач разработана методика приближённого расчёта температур в трибоэлементах тормозов ПТМ.

Исследовано решение задачи о контакте полупространств для постоянного q и получена закономерность распределения плотности тепловых потоков:

$$\alpha_{\text{ТП}} = \alpha_{\text{ЭТ}} + \left(\frac{A-1}{A} - \alpha_{\text{ЭТ}} \right) \left(1 - e^{-A^2 B^2 \text{Fo}} \operatorname{erfc} \left(AB\sqrt{\text{Fo}} \right) \right), \quad (6)$$

где $A = 1 + \lambda_1 \sqrt{a_2} / (\lambda_2 \sqrt{a_1})$; $\alpha_{\text{ТП}}$ — коэффициент распределения тепловых потоков; B — безразмерная контактная тепловая проводимость; a_1 и a_2 — коэффициент температуропроводности первого и второго тела соответственно; $\operatorname{erfc}(z)$ — дополнительная функция ошибок Гаусса.

Установлено, что асимптотические оценки функции (6) в виде

$$\lim_{\text{Fo} \rightarrow 0} \alpha_{\text{ТП}} = \alpha_{\text{ЭТ}}; \quad \lim_{\text{Fo} \rightarrow \infty} \alpha_{\text{ТП}} = \frac{A-1}{A} = \frac{\lambda_1 \sqrt{a_2}}{\lambda_2 \sqrt{a_1} + \lambda_1 \sqrt{a_2}}$$

являются математическим представлением известных закономерностей процессов при трении шероховатых поверхностей:

- при малых числа Фурье распределение плотности тепловых потоков определяется свойствами шероховатых поверхностей (коэффициентом $\alpha_{\text{ЭТ}}$);
- с течением времени трибосистема энергетически перестраивается, и при стационарном трении распределение плотности тепловых потоков определяется свойствами её элементов (параметром A).

Для проверки адекватности различных условий фрикционного теплового контакта с помощью методики приближённого расчёта температур в трибоэлементах тормозов ПТМ определена температура T_p на поверхности трения накладки из полимерного материала 145–40.

На рис. 6 показаны трибоэлементы дисково-колодочного тормоза: накладка 1 прижимается давлением $p = 4$ МПа к диску 2 со средним радиусом трения $r_T = 0,06$ м, который вращается с угловой скоростью

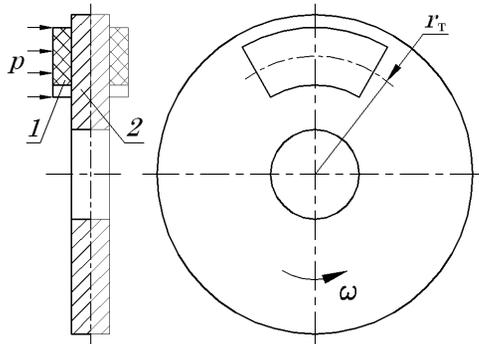


Рис. 6

$$\omega(t) = \omega_0 \left(1 - \frac{t}{t_0} \right), \quad 0 \leq t \leq t_0,$$

где начальная скорость $\omega_0 = 200$ рад/с; время торможения $t_0 = 1,1$ с.

Результат расчёта представлен в увеличенном (рис. 7, а) и уменьшенном (рис. 7, б) масштабах: кривая «э» — экспериментальная; кривая 1 — расчёт для условий идеального контакта; кривая 2, 3, 4 и 5 — расчёт для условий контакта с распределением тепловых потоков по Блоку, Шаррону, Хассельгруберу и Чичинадзе соответственно; кривая 6 — расчёт для условий неидеального контакта по Барберу–Протасову; кривая 7 — расчёт для условий неидеального контакта по Подстригачу.

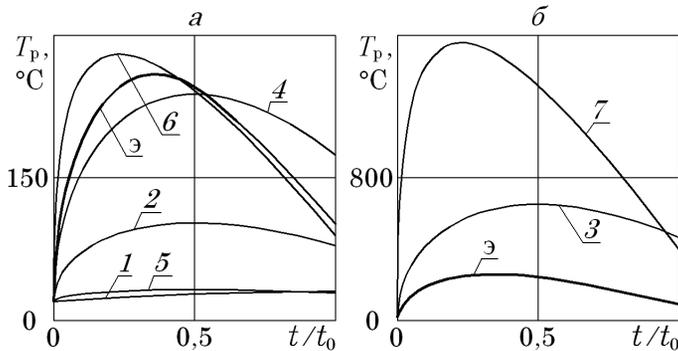


Рис. 7

На основе проведённого анализа установлено, что:

- применение условий идеального контакта (кривая 1), условий контакта с распределением тепловых потоков (кривые 2, 3, 5) и условий неидеального контакта по Подстригачу (кривая 7) приводит к недопустимо большой погрешности расчёта;
- условия контакта с распределением тепловых потоков по Хассельгруберу (кривая 4) могут быть применены для оценочного расчёта;
- условия Барбера–Протасова (кривая 6) позволяют качественно и количественно описать зависимость изменения температуры на фрикционной поверхности тормозной накладки.

В **четвёртой** главе разработана модель дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом для описания тепломеханических процессов в подобластях дискретного контакта трибоэлементов тормозов ПТМ, проведён анализ влияния дискретности контакта и интенсивности контактного теплообмена на характер распределения давлений и температур в подобластях взаимодействия.

Рассмотрено тепломеханическое взаимодействие в трибосистеме упругое тело — абсолютно жёсткое контртело. Приняты следующие допущения: тело и контртело являются полупространствами; на поверхности трения тела имеются выступы рельефа; взаимодействие тела и контртела осуществляется в конечном числе n одинаковых круговых подобластей кон-

такта, размещённых в узлах квадратной сетки (см. рис. 3, б); распределение давления является равномерным в пределах каждой подобласти контакта; температура контртела постоянна; распределение плотности теплового потока является равномерным в пределах каждой подобласти контакта и квазипостоянным во времени.

Условие неразрывности нормальных к поверхности трения перемещений в центрах подобластей контакта представлено в виде

$$\bar{H} = \bar{H}_0 + \bar{U}_{\text{ТГ}} + \bar{U}_y - \bar{U}_н, \quad (7)$$

где \bar{H} — вектор мгновенных высот выступов рельефа поверхности; \bar{H}_0 — вектор начальных высот выступов рельефа поверхности; $\bar{U}_{\text{ТГ}}$ — вектор термоупругих перемещений, вызванных фрикционным нагревом тела; \bar{U}_y — вектор упругих перемещений, вызванных механическим взаимодействием; $\bar{U}_н$ — вектор износа.

С учётом условия (7) получено уравнение дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом:

$$\begin{pmatrix} \dot{\bar{P}} \\ \dot{\bar{\Theta}} \\ \dot{\bar{W}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta\kappa M_1 & -B\kappa M_2 & \kappa M_3 \\ \beta\Phi & -B\Phi & \Phi \\ \beta E & -BE & 0E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{P} \\ \bar{\Theta} \\ \bar{W} \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{P} \\ \bar{\Theta} \\ \bar{W} \end{pmatrix} \Big|_{\text{Fo}=0} = \begin{pmatrix} \bar{P}_0 \\ \bar{0} \\ \bar{0} \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} [M_1]_{mk} &= [\Omega^{-1}(\Psi - \mu E)]_{mk} - b \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}]_{mj} \cdot \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}(\Psi - \mu E)]_{jk}; \\ [M_2]_{mk} &= [\Omega^{-1}\Psi]_{mk} - b \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}]_{mj} \cdot \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}\Psi]_{jk}; \\ [M_3]_{mk} &= [\Omega^{-1}\dot{\Psi}]_{mk} - b \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}]_{mj} \cdot \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}\dot{\Psi}]_{jk}; \quad b = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\Omega^{-1}]_{ij}}; \end{aligned}$$

\bar{P} — вектор безразмерных давлений в подобластях контакта; \bar{P}_0 — вектор безразмерных начальных давлений; $\bar{\Theta}$ — вектор безразмерных температур в центрах подобластей контакта; \bar{W} — вектор безразмерной удельной теплоты; E — единичная матрица; Φ , Ω и Ψ — матрица тепловой, упругой и термоупругой податливости соответственно; β , κ и μ — коэффициент интенсивности тепловыделения, термоупругих процессов и изнашивания соответственно; $[\dot{\quad}] = d[\quad]/d\text{Fo}$; $[M]_{mk}$ — элемент матрицы M в m -ой строке и k -ом столбце.

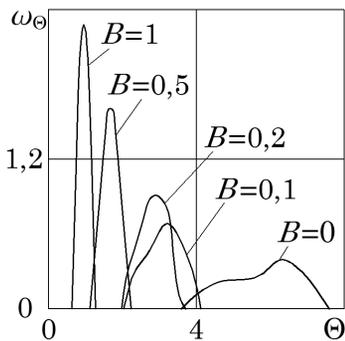


Рис. 8

различных s . Установлено, что с увеличением параметра s происходит значительное уменьшение равномерности распределения давлений.

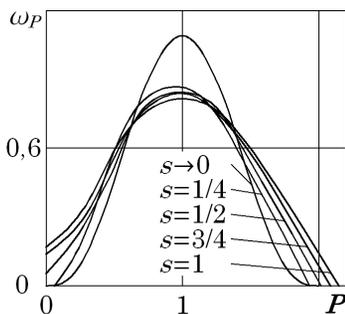


Рис. 9

Для каждого экспериментального торможения определены временные зависимости измеренной температуры T_3 и расчётной температуры T_p на фрикционной поверхности. При этом T_3 получена путём осреднения температур, измеренных с помощью 5 специальных малоинерционных термопар, а T_p — с помощью методики приближённого расчёта температур в трибоэлементах тормозов ПТМ.

На рис. 10 представлены температуры T_p и T_3 : а — легкий тепловой режим работы тормоза при $p = 4$ МПа, $\omega_0 = 100$ рад/с, $t_0 = 1,4$ с; б — средний тепловой режим работы при $p = 4$ МПа, $\omega_0 = 240$ рад/с, $t_0 = 1,1$ с.

На основе исследования температурных зависимостей для различных параметров p , ω_0 и t_0 показано, что методика приближённого расчёта температур в трибоэлементах тормозов ПТМ может быть применена для описания тепловых процессов во всём температурном интервале работы фрикционной пары полимер — металл.

На основе решения уравнения (8) проведён анализ влияния параметров B и s на распределение безразмерного давления P и распределение безразмерной температуры Θ по подобластям контакта.

На рис. 8 представлена плотность ω_Θ стационарного распределения температуры Θ для различных B . Показано, что температуры в подобластях контакта существенно уменьшаются с ростом проводимости B .

На рис. 9 показана плотность ω_P стационарного распределения давления P для

В пятой главе проведено сравнение результатов теоретического и экспериментального исследований контактной температуры во фрикционной паре 145–40 — СЧ15–32 тормоза ПТМ.

Обработаны результаты экспериментальных исследований температуры на фрикционной поверхности тормозной накладки из полимерного материала 145–40, полученные на кафедре подъёмно-транспортных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана и в Институте машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН.

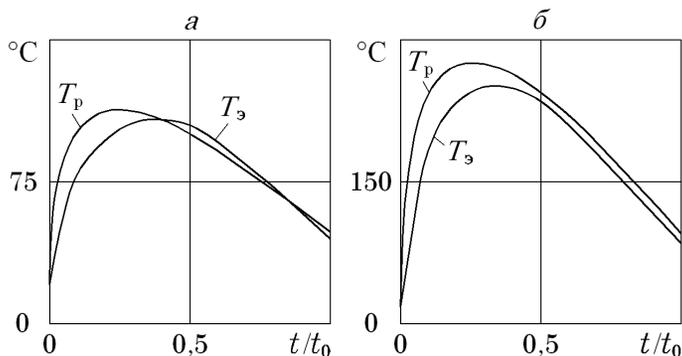


Рис. 10

Проведён сравнительный анализ максимальных температур

$$\tilde{T}_p = \max_{0 < t < t_0} \{T_p\} \quad \text{и} \quad \tilde{T}_3 = \max_{0 < t < t_0} \{T_3\}$$

для 30 экспериментальных торможений, в которых $p = 1,5..5$ МПа, $\omega_0 = 100..350$ рад/с, $t_0 = 0,5..5$ с.

В результате анализа (рис. 11) установлено, что расчётная температура \tilde{T}_p является верхней оценкой измеренной температуры \tilde{T}_3 с ожидаемой погрешностью

$$\varepsilon = \frac{|\tilde{T}_p - \tilde{T}_3|}{\tilde{T}_3} \approx 50 \%$$

Приложение содержит экспериментальные данные в виде временных зависимостей температур на поверхности трения полимерной тормозной накладке.

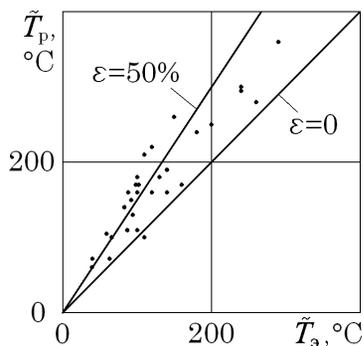


Рис. 11

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе обобщения известных теоретических результатов, а также проведения новых исследований разработан метод расчёта температур в области контакта элементов пар трения тормозных устройств ПТМ, который учитывает особенности фрикционного теплового взаимодействия — дискретность контакта и характер распределения тепловой энергии между трибоэлементами.

1. Показано, что существующие теоретические методы определения контактной температуры ограниченно учитывают дискретность взаимодействия и характер распределения теплоты между телами трения и,

- как следствие, не позволяют с достаточной точностью рассчитывать температуру в области контакта пар трения тормозов ПТМ.
2. Разработана методика выбора модели геометрии контакта, которая учитывает дискретность фрикционного взаимодействия и позволяет классифицировать тепловые задачи сухого трения следующим образом: класс задач с непрерывным контактом, класс задач с насыщенным дискретным контактом и класс задач с ненасыщенным дискретным контактом.
 3. Предложена классификация условий фрикционного теплового контакта. Показано, что условия Барбера–Протасова обобщают общепринятые условия теплового взаимодействия тел трения, учитывают особенности фрикционного тепловыделения и контактного теплообмена, происходящих в «третьем теле».
 4. Получены аналитические решения различных геометрически одномерных задач нестационарной теплопроводности для тел трения с неидеальным тепловым контактом согласно условиям Барбера — Протасова. На основе анализа этих решений разработана методика приближённого расчёта температур в трибоэлементах тормозов ПТМ.
 5. Установлена закономерность распределения плотности тепловых потоков при неидеальном тепловом контакте тел трения. Показано, что данная закономерность согласуется с известными закономерностями процессов при трении шероховатых поверхностей.
 6. Показано, что среди общеизвестных условий фрикционного теплового контакта только условия Барбера–Протасова позволяют качественно и количественно описать изменение температуры на поверхности трения полимерной накладке тормоза ПТМ.
 7. Разработана модель дискретного фрикционного контакта тела с абсолютно жёстким контртелом, которая позволяет описать тепломеханические процессы, определить давления и температуры в подобластях дискретного контакта трибоэлементов тормозов ПТМ.
 8. Получена зависимость распределения давлений и температур в подобластях дискретного взаимодействия тела с абсолютно жёстким контртелом от степени непрерывности контакта и контактной тепловой проводимости.
 9. Проведено сравнение результатов теоретического и экспериментального исследований температуры на поверхности тормозной накладке из полимера 145–40. Установлено, что предлагаемый метод расчёта температур в области контакта элементов пар трения тормозных устройств ПТМ обладает погрешностью $\approx 50\%$ и позволяет более точно учесть температурный фактор при оценке работоспособности и долговечности тормозов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Беляков Н. С., Носко А. П. Математическое моделирование тепловых процессов при неидеальном фрикционном контакте // 6-ой Минский международный форум по тепло- и массообмену. Минск, 2008. С. 252–253.
2. Беляков Н. С., Носко А. П. Математическое моделирование тепловых процессов трения при неидеальном контакте // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 1. С. 129–136.
3. Беляков Н. С., Носко А. П. Неидеальный тепловой контакт тел при трении. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 104 с.
4. Носко А. Л., Беляков Н. С., Носко А. П. Применение обобщённого граничного условия для решения тепловых задач трения // Трение и износ. 2009. Т. 30, № 6. С. 615–625.
5. Носко А. Л., Носко А. П. Исследование термоупругого контактного взаимодействия в трибосопряжениях // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. 2007. № 2. С. 71–81.
6. Носко А. Л., Носко А. П. Математическое моделирование трибологических систем (применительно к тормозным устройствам ПТМ) // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. 2006. № 1. С. 83–98.
7. Носко А. Л., Носко А. П. Моделирование термоупругого фрикционного контакта // Трение и износ. 2007. Т. 28, № 4. С. 345–350.
8. Носко А. Л., Носко А. П. Расчёт нагрева тормозных устройств ПТМ // Строительные и дорожные машины. 2007. № 3. С. 38–43.
9. Носко А. Л., Носко А. П. Решение контактной тепловой задачи с учётом теплопередачи между элементами трибосопряжения // Трение и износ. 2006. Т. 27, № 3. С. 279–284.
10. Носко А. Л., Носко А. П. Решение фрикционной тепловой задачи с учётом термической проводимости контакта // Проблемы трибологии. 2006. № 4. С. 75–77.
11. Носко А. Л., Носко А. П. Тепловые процессы в узлах трения машин // Известия вузов. Машиностроение. 2005. № 11. С. 3–9.
12. Носко А. Л., Носко А. П. Численное моделирование трибологических систем (применительно к тормозным устройствам ПТМ) // Известия вузов. Машиностроение. 2005. № 12. С. 8–17.
13. Носко А. Л., Носко А. П., Мишкарёва Е. В. Технично-економические расчёты при выборе колодочных тормозных устройств ПТМ // Тяжёлое машиностроение. 2007. № 10. С. 35–39.
14. Носко А. Л., Носко О. П., Нікольська Т. О. Динаміка теплотворення на фрикційному контакті гальмових пристроїв піднімально-транспортних машин // 8-ий Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Львів, 2007. С. 139.

15. Носко А. П. Выбор контактных тепловых условий при расчёте температур элементов трибосопряжения «полимерный материал — металл» // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: 13-ая Московская международная конференция. М., 2009. С. 193.
16. Носко А. П. Выбор модели геометрии контакта и модели теплового контакта при описании тепловых процессов трения // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: 12-ая Московская международная конференция. М., 2008. С. 132–133.
17. Носко А. П. Выбор модели геометрии контакта при моделировании тепловых процессов трения // Трение и износ. 2009. Т. 30, № 2. С. 174–185.
18. Носко А. П. Моделирование дискретного теплового контакта тел трения // Полимерные композиты и трибология: Международная научно-техническая конференция. Гомель, 2009. С. 168–169.
19. Носко А. П. Моделирование термоупругого фрикционного контакта // Студенческая наука: 1-ая Московская межвузовская научно-практическая конференция. М., 2006. С. 185–186.
20. Носко А. П. Обзор контактных методов измерения температуры при сухом трении // 18-ая Международная Интернет-конференция молодых учёных и студентов по проблемам машиноведения. М., 2006. С. 44.
21. Носко А. П. Расчёт нагрева тормозных устройств ПТМ // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: 11-ая Московская межвузовская конференция. М., 2007. С. 102.
22. Носко А. П. Решения задач нагрева элементов трибосопряжений применительно к тормозным устройствам ПТМ // Подъёмно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы: 10-ая Московская межвузовская конференция. М., 2006. С. 46.
23. Belyakov N., Nosko A. Generalized Boundary Condition Approach in Heat Transfer Frictional Problems // Proceedings of World Tribology Congress 2009. Kyoto, 2009. P. 206.
24. Belyakov N. S., Nosko A. P. Heat Frictional Contact of Semi-Bounded Solids // Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. Motorization and Power Industry in Agriculture. 2008. V. 10A. P. 83–91.