

М434068

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
ИМЕНИ Н.Э. Баумана

На правах рукописи

УДК 621.86:621.891

НОСКО Андрей Леонидович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА НАГРЕВА ДИСКОВО-
КОЛОДЧНЫХ ТОРМОЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ
МАШИН С УЧЕТОМ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
КОНТАКТА

05.05.05 - Подъемно-транспортные машины

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники
РСФСР, доктор технических наук,
профессор М.П. АЛЕКСАНДРОВ

Научный консультант - кандидат технических наук,
старший преподаватель А.М. РОМАНКО

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Борисов С.М.
кандидат технических наук, доцент Маханько А.М.

Ведущее предприятие - ВНИИАТИ

Защита состоится "17" февраля 1986 г. на заседании специализированного совета К 053.15.10 МВТУ им. Н.Э. Баумана по транспортному машиностроению по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская

С
Н.Э.

МВТУ им.

латъ

просьба выс-

Учен
ка

С. Г. ин

М434068

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981-1985 годы и на период до 1990 года" отмечена необходимость дальнейшего роста и совершенствования подъемно-транспортной техники на основе неуклонного повышения эффективности и качества машин.

Одним из направлений выполнения этой задачи является создание более производительных и обладающих большей единичной мощностью подъемно-транспортных машин (ПТМ), что предъявляет повышенные требования к тормозным устройствам, обеспечивающим их надежную и безаварийную работу. Существующие конструкции тормозов ПТМ (например, широко используемые в настоящее время в промышленности колодочные тормоза) зачастую не удовлетворяют этим требованиям.

Перспективными для применения в ПТМ являются дисково-колодочные тормоза (ДКТ) с малым коэффициентом взаимного перекрытия ($K_{вз} \leq 0,2$). Однако одной из причин, которая сдерживает внедрение ДКТ в отечественное подъемно-транспортное машиностроение, является отсутствие методов теплового расчета ДКТ, работающих в режимах трения ПТМ.

Опыт эксплуатации показывает, что фрикционно-износные характеристики материалов пар трения тормозных устройств ПТМ зависят главным образом от температурного режима узла трения и прежде всего от нагрева поверхностных слоев трущихся материалов. Поэтому разработка новых конструкций ДКТ для ПТМ и правильная их эксплуатация невозможны без создания достаточно совершенного метода теплового расчета, позволяющего с определенной степенью точности определять величину и характер изменения температуры поверхности трения элементов фрикционной пары тормоза в процессе торможения. Наличие такого метода позволит давать более обоснованные рекомендации по выбору материалов для фрикционной пары и конструктивных параметров тормоза, назначать методику испытаний и выявлять эксплуатационные возможности разрабатываемых тормозов на стадии проектирования.

Цель работы - разработка методики расчета нагрева дисково-колодочных тормозов подъемно-транспортных машин с учетом особенностей контактного теплообмена между элементами фрикционной пары в процессе торможения, при малом коэффициенте взаимного перекрытия этого типа тормозов.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на использовании основных положений теории теплопроводности, тепло-

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

М434068

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1434068

Носко А. П. Разработка метод



I

обмена и механического контактирования твердых тел для неподвижного и подвижного контактов. Для решения дифференциальных уравнений теплопроводности применялся метод интегрального преобразования Лапласа. Результаты теоретического решения положены в основу методики расчета нагрева ДКТ ПТМ, по которой разработана программа для ЭВМ.

Экспериментальные исследования проводились на стендах лаборатории кафедры "Подъемно-транспортные машины" МВТУ им. Н.Э. Баумана с использованием современной регистрирующей и измерительной аппаратуры. Обработка экспериментальных результатов проводилась на ЭВМ с использованием методов теории вероятностей и математической статистики. Температура на поверхностях трения ДКТ измерялась ленточными термопарами.

Научная новизна. В работе проведено комплексное (теоретическое и экспериментальное) исследование температуры поверхности трения ДКТ ПТМ, в результате которого:

- впервые экспериментально установлена разность между средними температурами поверхностей трения диска и накладки, причем температура накладки выше температуры диска;

- проведен расчетный анализ существующих формул для определения коэффициента распределения тепловых потоков и сделаны выводы о границах их применения в тепловых расчетах тормозных устройств;

- создана новая математическая модель распределения тепла между накладкой и диском ДКТ, которая учитывает неравенство средних температур поверхностей трения накладки и диска в процессе торможения (и как следствие этого, обменный тепловой поток между ними) и наличие на фрикционном контакте термического сопротивления контакта (R_k);

- впервые в общем виде получено аналитическое решение задачи определения температурного поля в элементах фрикционных пар тормозных устройств с малым $K_{вз}$ с учетом величины и характера изменения R_k в процессе торможения, которое положено в основу методики расчета нагрева ДКТ;

- впервые получены экспериментальные и расчетные зависимости R_k от различных факторов (давление, температура, чистота обрабатываемых поверхностей) для материалов пар трения металл-фрикционный асбодополимерный материал, используемых в ДКТ;

- обоснована методика измерения температуры поверхности трения с помощью термопар без заранее подготовленного опая - ленточ-

ных. Проведены экспериментальные исследования и расчеты по определению тепловой инерционности и геометрических размеров спая этих термопар.

Достоверность получаемых результатов обеспечивается применением научно обоснованных положений и допущений теории теплопроводности, теории механического контактирования поверхностей и молекулярно-механической теории трения; современных средств измерения и методов обработки экспериментальных результатов с использованием ЭЕМ. Достоверность численных результатов, полученных в работе, устанавливалась путем сравнения с результатами проведенных автором экспериментальных исследований, а также с известными решениями других исследователей.

Практическая ценность. Установлено, что теоретические и экспериментальные исследования нагрева поверхностей трения элементов фрикционных пар ДКТ ПТМ необходимо проводить и для накладки и для диска, так как их поверхностные температуры различны.

Получены экспериментальные результаты (в виде графиков) и удобная для инженерных расчетов формула зависимости R_k от различных параметров, определяющих процесс трения для материалов фрикционных пар, применяемых в ДКТ ПТМ.

Разработана методика теплового расчета ДКТ ПТМ, по которой составлена программа для вычисления средней температуры поверхностей трения фрикционной пары тормоза на ЭЕМ.

Отработана методика измерения температуры поверхности трения ДКТ с помощью ленточных термопар.

Разработанная в данной диссертационной работе методика расчета нагрева с учетом термического сопротивления контакта может быть использована в проектных и конструкторских организациях для тепловых расчетов различных тормозных и фрикционных устройств с малым $K_{вз}$.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы: при расчетах и испытаниях унифицированного ряда ДКТ для ПТМ, созданного на кафедре ПТМ МВТУ им. Н.Э. Баумана; при совершенствовании и создании новых конструкций тормозных и фрикционных устройств шахтных подъемно-транспортных машин и механизмов в НПО "Углемеханизация".

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и неоднократно обсуждались на ежегодных научных семинарах кафедры "Подъемно-транспортные машины" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1980-1985 гг.); на комитете "Тормозные устройства и муфты спец-

ления" секции триботехники МТП НТО Машпром, Москва, 1984 г.; на X конференции молодых ученых "Актуальные проблемы механики и машиностроения" ИМАШ им. А.А. Благодрава АН СССР, 1985 г.; на Всесоюзной научной конференции "Новое в подъемно-транспортной технике", Москва, 1985 г.; на научно-техническом совете ВНИАТИ, Ярославль, 1986 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 5 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы, приложения и содержит 128 страниц машинописного текста, 8 таблиц, 51 рисунок, 22 страницы приложения, список литературы из 107 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулирована цель работы и приведено кратко содержание выполненных автором исследований.

В первой главе проведен анализ: особенностей работы и теплового нагружения ДКТ; методов теплового расчета тормозных устройств ПТМ; существующих расчетных формул для определения коэффициента распределения тепловых потоков и сделаны выводы о границах их применения в тепловых расчетах тормозных устройств.

Показано, что перспективными для применения в ПТМ являются ДКТ с вентилируемым тормозным диском и накладками из фрикционно-го асбодополимерного материала (ФАПМ).

Известно, что при оценке общей надежности и эффективности работы тормозных устройств (в том числе и ДКТ) необходимо учитывать температурные поля фрикционной пары. Как показал анализ имеющихся в литературе сведений о работе тормозов с фрикционной парой металл-ФАПМ, "слабым" к термическому воздействию элементом является тормозная накладка из ФАПМ, температурное поле и температура поверхности трения которой оказывают основное влияние на фрикционно-износные показатели материалов пары трения.

Вопросам нагрева тормозных и фрикционных устройств и разработке методов их теплового расчета посвящены работы отечественных и зарубежных ученых Александрова М.П., Иноземцева В.Г., Коконина С.С., Крагельского И.В., Парфенова В.Н., Пестова А.И., Пыжовича Л.М., Трояновской Г.И., Чичинадзе А.В., Черенкова Г.М.,

Щедрова В.С., Егера Д., Блока Н., Боудена Ф., Ньюкомба Т., Хасельгрубера Х., Шаррона Ф. и других, в которых заложены основы тепловых исследований различных узлов трения.

Основная трудность в расчете температур тормозных устройств по известным методикам заключается в определении количества тепла трения, поступающего в элементы фрикционной пары в процессе торможения, которое обычно характеризуется коэффициентом распределения тепловых потоков ($\alpha_{т.п.}$).

Общим для известных расчетных формул по определению $\alpha_{т.п.}$ является то, что они предполагают равенство средних температур на трущихся поверхностях обоих элементов фрикционной пары. Для тормозов с $0,2 < K_{вз} \leq 1,0$ это предположение теоретически обосновано и подтверждено экспериментально многочисленными исследованиями.

Проведенные автором экспериментальные исследования по определению температуры поверхности элементов пар трения ДКТ ПТМ показали, что в дисково-колодочных тормозах с $K_{вз} \leq 0,2$ во время торможения средние температуры на поверхности трения накладки и диска не равны. Причем с уменьшением $K_{вз}$ эта разница в нагреве поверхностей элементов фрикционной пары увеличивается и не учитывать ее в тепловых расчетах нельзя, так как это приводит к существенным погрешностям. Неравенство средних поверхностных температур является причиной возникновения направленного теплового потока от более нагретого тела пары трения к менее нагретому (из накладки в диск), при оценке которого необходимо учитывать термическое сопротивление контакта R_k .

В соответствии с изложенным, основными задачами данной работы являются:

- определение нагрева элементов фрикционной пары ДКТ ПТМ с учетом неравенства средних поверхностных температур элементов пары трения, вызванного этим неравенством теплообмена между трущимися телами и термического сопротивления контакта R_k ;

- экспериментальное и расчетное определение количественных и качественных зависимостей R_k для материалов, используемых в парах трения ДКТ ПТМ.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки, методики, а также результатов экспериментальных исследований и расчетного определения R_k .

Исследования R_K проводились в два этапа.

Целью первого этапа является экспериментальное определение количественных и качественных зависимостей R_K от давления, температуры и чистоты обработки контактирующих поверхностей материалов трictionных пар металл-ФАИМ, используемых в ДКТ ПМ. Необходимость проведения данного исследования объясняется тем, что в литературе по контактному теплообмену конкретных значений R_K применительно к этим материалам и условиям их работы в тормозных устройствах нам не встречалось.

Для проведения экспериментальных исследований автором была разработана и создана экспериментальная установка стержневого типа, смонтированная на базе универсальной испытательной машины ИМЧ-30, которая позволяет за один опыт получать результаты R_K по двум парам поверхностей. Для определения R_K был использован общепринятый метод стационарного теплового режима, суть которого состоит в следующем: если с одной стороны контактирующих образцов поместить источник тепла (нагреватель), а с другой - сток тепла (холодильник), боковые поверхности образцов теплоизолировать, то в аксиальном направлении по образцам и через их контакт будет протекать постоянный тепловой поток - q . После установления стационарного теплового режима, т.е. при линейном законе изменения температуры вдоль материалов, R_K для каждой пары образцов определяется по следующей зависимости: $R_K = \Delta t_K / q$, где Δt_K - температурный перепад в контакте. Для измерения температуры по длине образцов располагались термопары с заранее подготовленным спаем. С целью повышения точности результатов обработка экспериментальных данных проведена на ЭВМ.

Параметры режимов экспериментальных исследований выбирались из условия соответствия реальным режимам и условиям работы ДКТ ПМ и варьировались в пределах: нагрузка - 0,1 ... 7,0 МПа, температура контакта - 40 ... 280°C, шероховатость поверхностей контактирующих материалов - 0,18 ... 200 мкм. Металлические образцы были выполнены из стали - Ст.45, а неметаллические из ФАИМ шифров I45-40-69, 242-9-71, Т-266.

Автором впервые получены экспериментальные зависимости термического сопротивления контакта для материалов трictionных пар металл-ФАИМ, используемых в ДКТ ПМ.

По результатам каждого эксперимента, с целью возможности сравнения их с расчетными данными, проведен регрессионный анализ

и построены графики.

Второй этап исследований имел своей целью дать оценку расчетных формул, ранее полученных другими авторами (Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Попов В.М., Царевский С.Н.) для металлических контактных пар с точки зрения возможности их использования и соответствия результатов расчета по ним с экспериментальными результатами для пар металл-ФАПМ.

Используемая нами расчетная формула для определения R_K материалов металл- ФАПМ, обусловленного только шероховатостью, имеет вид:

$$R_K = 1 / \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_M} \right) = 1 / \left(\lambda_c / (h_1 + h_2) (1 - m) (1 - \varepsilon) + 4 \rho \bar{\lambda} / 3 \pi d \sigma_a \right), \quad (I)$$

где: R_C - термическое сопротивление междоугольной среды (в нашем случае это воздух); R_M - термическое сопротивление фактического контакта; h_1, h_2 - высоты микронеровностей контактирующих поверхностей; m - коэффициент заполнения профиля неровностей при различных видах механической обработки; ε - усредненное значение относительного облизания поверхностей; σ_a - предел прочности при сжатии пластически деформируемого материала (в нашем случае это ФАПМ); $\bar{\lambda}$ - приведенная теплопроводность контактирующих материалов; ρ - давление; d - средний диаметр пятна фактического контакта.

Предложенная формула получена из расчетной модели контакта, которая базируется на общепринятых допущениях теории механического контактирования поверхностей, разработанной Н.Б. Демкиным, и предполагает определение общей проводимости контакта $1/R_K$ в виде суммы проводимостей мест фактического контакта $1/R_M$ и междоугольной среды $1/R_C$. Возможность такого подхода подтверждается рядом экспериментальных работ по контактному теплообмену, обзор которых приведен в работах Шлыкова Ю.П. и Попова В.М., а также результатами экспериментов автора.

Сравнительный анализ расчетных значений R_K с результатами экспериментальных исследований показал, что расчетные данные находятся в достаточно удовлетворительном соответствии с опытными как по характеру зависимостей, так и по абсолютной величине. Относительная ошибка расчета составляет в среднем 10...20%.

Экспериментально установлено, что с увеличением давления происходит уменьшение R_K , причем в интервале давлений 0,5 ... 2,0 МПа это снижение происходит резко, а затем при $p > 2,0$ МПа более плавно. При постоянном давлении и переменной температуре контакта, с ростом температуры зависимость $R_K = f(t_K)$ (где t_K -

температура контакта) имеет линейный падающий характер. При повышении класса чистоты обработки контактирующих поверхностей величина R_k уменьшается, в то время как характер зависимости $R_k = f(p)$ изменяется незначительно.

Анализ результатов расчетного определения термического сопротивления контакта R_k показал, что характер изменения R_k полностью определяется соотношением его составляющих R_c и R_m и в первую очередь сопротивлением мест фактического контакта R_m . Проведенный анализ позволил также сделать предположение, что изменение R_k с увеличением нагрузки происходит в основном за счет интенсивного роста фактической площади контакта поверхностей, что приводит к резкому уменьшению R_m при незначительном уменьшении R_c . Это предположение хорошо согласуется и вполне объяснимо с позиций механики деформирования твердых тел, а также подтверждается сравнением и анализом полученных автором результатов зависимости для пар металл-ФАИМ с данными экспериментальных исследований металлических контактных пар и пар металл-металлокерамика, проведенных другими авторами (Шлыков Ю.П., Миллер В.С.).

Из проведенного автором анализа результатов работ Демкина Н.Б. Крагельского И.В., Михина Н.М. следует, что для пластического контакта (который в основном характерен для материалов металл-ФАИМ и режимов работы ДКТ ПТМ) увеличение фактической площади соприкасающегося контакта по сравнению с неподвижным контактом не превышает 5...15% и приводит к незначительному изменению (уменьшению) R_k . Результаты работ Попова В.М., Мазо Л. подтверждают этот вывод. Таким образом, зависимость (I) может быть использована для оценки величины R_k и в случае фрикционного контакта материалов металл-ФАИМ.

В третьей главе приведено теоретическое исследование нагрева элементов фрикционной пары ДКТ ПТМ.

На основании рассмотрения процессов выделения и распространения тепла в элементах пар трения тормозных и фрикционных устройств, а также в результате анализа работ Чичинадзе А.В., Зинovieва Е.В., Иноземцева В.Г. и Ромашко А.М. при расчете нагрева ДКТ ПТМ автором принято следующее допущение: во время единичного торможения температуры поверхностей трения элементов фрикционной пары могут быть представлены в виде суммы отдельных температур (температуры окружающей среды, объемной температуры и приращения температуры поверхности трения). С достаточной для практики точностью при определении температуры поверхностей трения

материалов пары металл-ФАИМ температура вспышки может не учитываться.

Создана новая тепловая модель фрикционного контакта для тормозных устройств с малым $K_{вз}$ (применительно к ДКТ ПТМ), которая учитывает: - тепловыделение на фрикционном контакте и распределение тепла между накладкой и диском; - неравенство средних поверхностных температур накладки и диска (и как следствие этого, обменный тепловой поток между ними); термическое сопротивление контакта, которое зависит от температуры и изменяется в процессе торможения.

Так как при торможении в каждый момент времени под накладкой находится только часть поверхности трения диска ДКТ, автором проведено условное разбиение поверхности трения диска на кольцевые сектора, площадь трения каждого из которых равна площади трения накладки. Это позволило обоснованно использовать для случая тепловыделения на фрикционном контакте и распределения этого тепла между элементами пары трения ДКТ с $K_{вз} \leq 0,2$ известное решение А.В. Чичинадзе, полученное им для тормозных устройств с $K_{вз} \rightarrow 1$. В этом случае при расчете средних температур поверхностей трения элементов фрикционной пары (λ_2^*) коэффициент распределения тепловых потоков $\alpha_{т.п.}$ первоначально определяется по формуле Шаррона Ф. (в зависимости от теплофизических характеристик материалов фрикционной пары). С учетом этого условия в результате расчета имеем неравенство средних температур поверхностей трения накладки и каждого кольцевого сектора диска в течение времени их контакта t_k . Этот результат принимается в качестве исходного данного для окончательного определения средних поверхностных температур накладки и диска ДКТ с учетом особенностей контактного теплообмена (характерного для тормозных устройств с малым $K_{вз}$). Такой подход является новым и рассматривается для ДКТ ПТМ впервые.

Сформулирована и решена в общем виде задача определения температурного поля в элементах фрикционных пар ДКТ ПТМ для случая, когда на фрикционном контакте происходит теплопередача из накладки в диск (вызванная неравенством средних поверхностных температур) и имеет место R_k . Эти особенности созданной автором тепловой модели контакта учтены в начальных и граничных условиях задачи. Математически данная задача представляет собой систему уравнений теплопроводности Фурье, решение которой получено

методом интегрального преобразования Лапласа. Для средних температур поверхностей трения и накладки диска ДКТ это решение имеет вид:

$$\vartheta_1 = \vartheta_1^* + \frac{\vartheta_2^* - \vartheta_1^*}{1 + K_E} [1 - \exp(B^2 t_k) \operatorname{erfc}(B \sqrt{t_k})] ; \quad (2)$$

$$\vartheta_2 = \vartheta_2^* - \frac{\vartheta_2^* - \vartheta_1^*}{1 + K_E} K_E [1 - \exp(B^2 t_k) \operatorname{erfc}(B \sqrt{t_k})] ; \quad (3)$$

$$K_E = \lambda_1 \sqrt{a_2} / \lambda_2 \sqrt{a_1} ; \quad B = (1 + K_E) \sqrt{a_1} / \lambda_1 R_k , \quad (4)$$

где: индекс "1" относится к диску, а индекс "2" - к накладке;

$\lambda_{1,2}$ и $a_{1,2}$ - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов пары трения.

Анализ уравнений (2-4) показывает, что при $R_k \rightarrow \infty$ $B \rightarrow 0$. В этом случае выражение в квадратных скобках обращается в нуль, а результирующие температуры тел будут равны первоначальным и останутся постоянными на протяжении всего процесса теплообмена. При $R_k \rightarrow 0$ $B \rightarrow \infty$, и выражение в квадратных скобках становится равным 1. В этом случае результирующие температуры тел будут равны, а величина установившейся температуры, которая достигается сразу после соприкосновения тел, будет определяться только коэффициентом K_E .

Полученное аналитическое решение положено в основу методики расчета нагрева ДКТ ШМ и является главной отличительной чертой разработанной методики от имеющихся в настоящее время методик теплового расчета тормозных устройств. Расчет по формулам (2) и (3) предполагает перераспределение тепла между накладкой и диском в процессе торможения, которое возникает вследствие неравенства средних поверхностных температур элементов пары трения, обусловленного конструктивными особенностями ДКТ и R_k .

Для расчета на ЭВМ по предлагаемой методике создана программа на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV, блок-схема которой приведена в приложении к диссертации.

В четвертой главе приведено описание экспериментальных установок, методики и результатов экспериментальных исследований и расчетного определения нагрева элементов фрикционных пар ДКТ ШМ.

Экспериментальные исследования нагрева ДКТ проводились на испытательной машине трения МТ-84 и на инерционном стенде кафедр

ри "Подъемно-транспортные машины" МВТУ им. Н.Э. Баумана, позволяющих испытывать натурные тормозные устройства и варьировать: работу торможения, начальную частоту вращения тормозного диска, продолжительность и частоту включений, давление, $K_{вз}$. В процессе эксперимента основным определяемым параметром была температура поверхностей трения накладок и диска ДКТ при работе в повторно-кратковременном режиме. Испытания проводились со оплошным и вентилируемыми дисками из чугуна СЧ 15 и стали Ст.3; с накладками из ФАПМ 145-40-69, 242-9-71 и Т-266.

Для измерения температуры на поверхности трения применялись термопары без заранее подготовленного спая - ленточные. С целью обоснования методики экспериментального определения поверхностных температур элементов фрикционных пар ДКТ ПТМ с помощью ленточных термопар автором были проведены специальные экспериментальные исследования и расчеты тепловой инерционности этих термопар, определены геометрические характеристики и проанализированы особенности работы ленточных термопар при трении. Было установлено, что инерционность ленточных термопар на три-четыре порядка меньше, чем у широко используемых в настоящее время термопар с заранее подготовленным спаем и имеет порядок 10^{-4} с. Опыт эксплуатации и анализ полученных результатов показал, что износ ленточной термопары не влияет на ее надежную и непрерывную работу, так как рабочий термоспай у этих термопар образуется только при торможении вследствие деформации поверхности трения и наволакивания металла с одного электрода на другой. Размер спая по нормали к поверхности трения у ленточных термопар не превышает толщины слоя материала, деформируемого при трении и составляет, например, для чугунного тормозного диска 15-20 мкм. Именно температура в тонких поверхностных слоях элементов фрикционной пары представляет наибольший интерес и может быть принята в качестве средней температуры поверхности трения.

Для измерения поверхностных температур в накладку заделывалось шесть ленточных термопар, а в диск - две. Так как нас интересовала в первую очередь средняя температура поверхности трения накладок, то выбор числа термопар для регистрации температур производился с учетом вероятностного контакта термопары с тормозным диском. Проведенный автором расчет показал, что вероятность измерения средней температуры поверхности трения накладок шестью термопарами равна 0,83. При обработке результатов экспериментов среднюю температуру поверхностей трения элементов фрикционной пары ДКТ определяли как среднее значение показаний поверхностных

термопар, установленных в них.

По результатам проведенных автором экспериментальных исследований была установлена и измерена разность средних температур поверхностей трения накладки и диска. Получены зависимости изменения разности средних поверхностных температур от параметров режимов работы и конструктивного исполнения диска. Установлено, что с увеличением давления, начальной частоты вращения тормозного диска и уменьшением $K_{вз}$ разность средних поверхностных температур элементов пары трения возрастает и для среднего режима работы тормоза составляет 50–150°C. Увеличение разности средних поверхностных температур происходит в основном за счет увеличения средней температуры поверхности трения накладки при незначительном изменении средней температуры поверхности трения диска. Замена сплошного диска вентилируемым увеличивает разность средних температур поверхностей трения накладки и диска в процессе торможения в среднем на 35–40%. Однако в этом случае увеличение разности температур происходит в основном за счет снижения температуры поверхности трения тормозного вентилируемого диска. Эксперименты полностью подтвердили теоретические выводы и правильность разработанной автором методики расчета нагрева ДКТ ПТМ.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и расчетов средней температуры поверхностей трения накладки и диска ДКТ по методике, разработанной автором, показал, что: расчетные значения установившейся средней температуры поверхности трения тормозной накладки находятся в достаточно удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными. Погрешность расчета средней поверхностной температуры накладки по этой методике составляет в среднем 10%, что значительно ниже, чем по имеющимся в настоящее время методикам теплового расчета тормозных устройств, погрешность расчета по которым доходит до 150%; для расчета средней температуры поверхности трения тормозного диска возможно использование известных решений, полученных другими авторами (например, Чичинадзе А.В. или Ромашко А.М.). Так, расчет по формуле (2) дает завышенные результаты по сравнению с расчетом по методике Чичинадзе А.В. не более чем на 5–10%, что для температур диска порядка 150–250°C составляет не более 25°C.

В приложении приведены методика расчета нагрева дисково-колодочных тормозов подъемно-транспортных машин с учетом термического сопротивления контакта и пример расчета по предлагаемой методике.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.

1. Анализ особенностей работы ДКТ показал, что вследствие ряда преимуществ по сравнению с тормозами других типов, перспективными для применения в ПТМ являются дисково-колодочные тормоза.

2. Впервые экспериментально установлена разность между средними температурами поверхностей трения накладки и диска ДКТ ПТМ, причем температура накладки выше температуры диска. Это неравенство средних поверхностных температур является причиной возникновения контактного теплообмена между элементами фрикционной пары в процессе торможения.

3. Анализ имеющихся в литературе сведений о работе тормозных устройств показал, что наиболее "слабым" к термическому воздействию элементом фрикционной пары является тормозная накладка из ФАИМ, температурное поле и температура поверхности которой оказывают основное влияние на фрикционно-износные показатели материалов пары трения.

4. Из обзора существующих аналитических методов теплового расчета тормозов ПТМ следует, что эти методы не позволяют достаточно точно проводить тепловой расчет элементов фрикционной пары ДКТ и в особенности тормозных накладок. Рассмотренные методики предполагают равенство средних поверхностных температур фрикционных элементов узлов трения, что неприемлемо для ДКТ ПТМ.

5. Систематизированы имеющиеся в литературе сведения по определению коэффициента распределения тепловых потоков. Проведен анализ предлагаемых различными исследователями формул для расчета $\alpha_{т.п.}$ и сделаны выводы о границах применения их в тепловых расчетах тормозных устройств.

6. Анализ исследований по контактному теплообмену показал, что дискретность контакта реальных поверхностей является причиной возникновения контактного термического сопротивления, которое необходимо учитывать при оценке распределения тепла между элементами фрикционной пары в процессе торможения.

7. Для экспериментального определения количественных и качественных зависимостей термического сопротивления от давления, температуры и шероховатости контактных поверхностей для материалов фрикционных пар ДКТ ПТМ была разработана и создана экспериментальная установка стержневого типа.

8. Установлено, что при расчете термического сопротивления контакта материалов металл-ФАИМ в диапазоне температур, давле-

ний и частоты обработки контактирующих поверхностей, характерных для ДКТ ПТМ, можно использовать формулы, аналогичные тем, которые применяются для определения термического сопротивления контакта металлических поверхностей. Сравнительный анализ экспериментальных результатов и аналитических расчетов термического сопротивления контакта показал пригодность этих расчетных формул для оценки его величины в тепловых расчетах пар трения различных фрикционных устройств.

9. В результате рассмотрения тепловых процессов, происходящих на фрикционном контакте элементов пары трения ДКТ, разработана методика комплексного (теоретического и экспериментального) исследования их нагрева. Новыми в этой методике являются положения о том, что:

- теоретическое и экспериментальное исследования температуры поверхностей трения элементов фрикционной пары ДКТ необходимо проводить и для накладки, и для диска;

- на величину температуры поверхностей трения накладки и диска влияет термическое сопротивление фрикционного контакта;

- при расчете температурного поля фрикционной накладки необходимо учитывать перераспределение тепла между накладкой и диском в процессе торможения (обменный тепловой поток);

- экспериментальное исследование быстроизменяющихся температур на поверхностях трения накладки и диска с помощью термопар можно проводить малоинерционными термопарами, измеряющими температуру в тонком поверхностном слое материала, непосредственно участвующего и деформирующегося в процессе трения.

10. Сформулирована задача определения температурного поля в элементах пары трения ДКТ ПТМ для случая, когда на фрикционном контакте происходит теплопередача из накладки в диск, и имеет место термическое сопротивление контакта, которое изменяется в процессе торможения. Как расчетная схема, так и математическая формулировка поставленной задачи для теоретического исследования тормозных устройств с малым $K_{\text{вз}}$, а именно к таким узлам трения относятся ДКТ, являются новыми.

Впервые получено аналитическое решение этой задачи, и на основе его анализа показана правильность расчетных формул для определения температуры на поверхностях трения элементов фрикционных пар с учетом величины и характера изменения термического сопротивления контакта.

Полученное аналитическое решение этой задачи положено в осно-

ву методики расчета нагрева дисково-колодочных тормозов подъемно-транспортных машин с учетом термического сопротивления контакта и является отличительной чертой данной методики от имеющихся в настоящее время методик теплового расчета тормозных устройств.

Сравнение расчетных значений средних температур поверхностей трения элементов фрикционной пары с экспериментально измеренными подтвердило возможность использования разработанной методики для расчета нагрева ДКТ и правильность теоретических выводов.

Алгоритм расчета по предлагаемой методике реализован в программе, написанной на алгоритмическом языке ФОРТРАН-IV, для вычисления на ЭВМ.

II. Для экспериментального исследования нагрева дисково-колодочных тормозов создан экспериментальный стенд, который позволяет производить испытания натуральных образцов ДКТ в режимах, характерных для работы тормозов ПТМ.

В экспериментах использована методика определения поверхностных температур с помощью малоинерционных ленточных термопар без заранее подготовленного опая.

12. Разработанная в данной диссертационной работе методика расчета нагрева ДКТ позволяет:

- значительно повысить точность расчета средних поверхностных температур элементов фрикционных пар тормозных устройств на стадии проектирования;
- давать обоснованные рекомендации по выбору материалов фрикционной пары и сократить сроки испытаний;
- уменьшить трудовые и энергетические затраты при проведении испытаний;
- более точно оценить работоспособность тормоза.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. К вопросу измерения температуры поверхности трения тормозов ПТМ /М.П.Александров, А.М. Ромашко, О.К. Чиналиев, А.Л. Носко - Труды/МЕТУ им. Н.Э. Бауман, 1982, № 371, с.23-41.

2. Носко А.Л., Ромашко А.М., Кожемякина В.Д. Исследование температуры поверхности трения пары металл-ФАИМ термопарами различных типов. - Трение и износ, 1982, № 6, с.1086-1093.

3. Исследование динамических характеристик термопар, применяемых для определения температуры поверхности трения тормозов ПТМ / А.Л.Носко, А.М.Ромашко, О.К.Чиналиев, А.И.Смоляков - Известия ВУЗов. Машиностроение, 1984, № 3, с. III-II5.

4. Теоретическое и экспериментальное исследование узлов трения/ М.Г.Чиковани, А.Л.Носко, В.А.Потапов и др. - Рукопись представлена Ин-том Машиноведения. - Деп.рук. ВИНТИ, 1985, № 8635-В. - 232 с.

5. Носко А.Л., Ромашко А.М. Распределение тепла в элементах фрикционной пары тормозных устройств ПТМ. - Новое в подъемно-транспортной технике: Тез.докл. Всесовзн. конф. - М., 1985, с. 77.

Носко:

Объем I п.л. Тираж 100 экз. Типография МВТУ им.Н.Э.Баумана
Л 62512 Зак. 3 . Подписано к печати 06.01.86 г.

