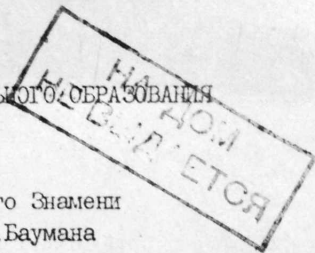


М 355987

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана



РОМАШКО Александр Мефодиевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ДИСКОВЫХ КОЛОДОЧНЫХ
ТОРМОЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Специальность 05.05.05. - Подъемно-транспортные машины

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1979

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

РОМАШКО Александр Мефодиевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ДИСКОВЫХ КОЛОДОЧНЫХ
ТОРМОЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Специальность 05.05.05. - Подъемно-транспортные машины

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1355987

Ромашко А. М. Исследование

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1979

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
им. М.Э.Баумана.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор АЛЕКСАНДРОВ М.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник
ОСТАПЕНКО В.И.,

доктор технических наук ИМОЗЕМЦЕВ В.Г.

Ведущее предприятие – ВНИИАТИ.

Защита диссертации состоится "3" декабря 1979 г.
на заседании специализированного Совета К 053.15.10 МВТУ
им. М.Э.Баумана по транспортному машиностроению по адресу:
107005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. М.Э.Баумана.

Автореферат разослан " " 1979 г.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба
высылать по указанному адресу.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ДОЦЕНТ


Д.КОЛОБОВ

Л №73979 от 22.10.79г. Объем 1,0.

Тираж 100 экз.

Типография МВТУ им. Баумана

Заказ № 1154

М В Т У
им. Н. Э. Баумана

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Решениями XXIV и XXV съездов КПСС одним из основных направлений научно-технического прогресса в производстве орудий труда предусматривается создание более производительных, более надежных и обладающих большей единичной мощностью машин и агрегатов. В связи с этим к отдельным узлам подъемно-транспортных машин (ПТМ), и в частности к тормозам, предъявляются повышенные требования. Существующие тормоза оказываются недостаточно долговечными, особенно при тяжелом и весьма тяжелом режимах работы. В последние годы, в автомобилях, на железнодорожном транспорте, а за рубежом и в ПТМ, все более широко применяются тормоза новой прогрессивной конструкции, — дисковые колодочные тормоза (ДКТ). Они имеют повышенную теплоотдачу, компактны, для таких тормозов в нашей стране разработаны износостойкие фрикционные материалы. Однако внедрение ДКТ в отечественное подъемно-транспортное машиностроение сдерживается из-за отсутствия опыта эксплуатации таких тормозов, рекомендаций по их конструированию и методов расчета.

Так как работоспособность и долговечность тормоза в значительной мере определяются степенью нагрева элементов фрикционной пары во время торможения, то для правильного проектирования и эффективной эксплуатации ДКТ необходимо иметь методику теплового расчета ДКТ и знать, как конструктивные параметры и режим работы тормоза влияют на его нагрев.

Цель работы. Целью диссертационной работы являлось исследование нагрева ДКТ, работающих в повторно-кратковременном режиме, изучение влияния конструктивных параметров и режимов работы ДКТ на их нагрев, а также разработка методики теплового расчета дисковых колодочных тормозов ПТМ.

Методы исследования. Для теоретического и экспериментального исследования использовались методы аппарата математической физики, теории подобия и моделирования, теории вероятности и математической статистики. Проводились расчеты на ЭЦМ. Для исследования температур на поверхности трения ДКТ использовались малоинерционные ленточные термометры.

Научная новизна. В работе впервые проведено комплексное, — теоретическое и экспериментальное исследование температуры поверхности трения дисковых колодочных тормозов, в результате которого установлено, что поверхности трения ДКТ подвергаются интенсивному импульсному тепловому нагружению, обусловленному малым коэффициентом взаимного перекрытия ($K_{вз}$).

Обоснованы и сформулированы новые уточненные математические модели теплового нагружения тормозных дисков ДКТ. Получены новые аналитические решения задач о распространении тепла: 1. в кольцевом диске с движущимися источниками тепла на боковых поверхностях и теплообменом с окружающей средой на открытых поверхностях; 2. в диске с осесимметричными импульсными источниками тепла переменной мощности на боковых поверхностях; 3. в неограниченной пластине с импульсным источником тепла переменной мощности на одной стороне и тепловой изоляцией на другой.

Впервые экспериментально зафиксированы и измерены пульсации температур на поверхности трения дисков ДКТ, возникающие при прохождении участка поверхности диска под накладкой.

Практическая ценность. Исследовано влияние конструкции и режимов работы ДКТ на температуры и градиенты температур вблизи поверхности трения и на объемную температуру диска. Получены формулы и графики для расчета температур в ДКТ, работающих в повторно-кратковременном режиме. Составлены программы для вычисления температур в ДКТ на ЭЦВМ БЭСМ-3М и И5ВСМ-5. Создана методика теплового расчета дисковых колодочных тормозов ИТМ.

Разработана методика измерения малоинерционными термопарами температур на поверхности трения ДКТ.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены на машиностроительном предприятии, они явились основой для разработки унифицированного ряда дисковых колодочных тормозов ИТМ и транспортных машин.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждались на международных и всесоюзных симпозиумах, конференциях и семинарах.

1. Трение, износ и методы испытаний абсорбционных материалов. Ярославль, 1973г.

2. Новое в подъемно-транспортной технике. Москва, 1975г.
3. Моделирование трения и износа в машинах, аппаратах и приборах. Москва, 1976г.
4. Повышение эффективности эксплуатации и совершенствование конструкций подъемно-транспортных машин. Алма-Ата, 1978г.
5. На II-ом Международном симпозиуме по прикладной механике. Москва, 1976г.
6. На У-ой Международной конференции по подъемно-транспортной технике. Дрезден, ГДР, 1976г.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 10 статей, в которых изложены основные положения диссертации, получено 2 положительных решения по заявкам на изобретение.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов, списка литературы, иллюстраций к тексту и четырех приложений. Она содержит 150 страниц машинописного текста, 12 таблиц, 89 рисунков, 16 страниц приложения, список литературы из 151 наименования.

Содержание работы

Во введении к диссертации обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы следующие задачи исследования.

1. Анализ существующих конструкций ДКТ, с точки зрения целесообразности их применения в ПТМ.
2. Выбор и обоснование методики теоретического и экспериментального исследования нагрева ДКТ, на основе анализа их теплового нагружения при работе в механизмах ПТМ.
3. Теоретическое исследование процесса нагрева ДКТ.
4. Разработка инженерной методики теплового расчета дисковых колодочных тормозов подъемно-транспортных машин.
5. Создание экспериментальной установки и средств измерения для исследования температур в ДКТ, проверки теоретических выводов и методики теплового расчета.

В первом разделе дана общая характеристика ДКТ. Показано, что ДКТ очень удобны для унификации, так как одни и те же тормозные зажимы могут использоваться с дисками различного диаметра, также может варьироваться количество тормозных зажимов.

Рассмотрены типовые конструкции тормозов. Выделены две группы тормозных зажимов: зажимы рычажного типа и зажимы со скобой. Зажимы со скобой обычно содержат меньше подвижных элементов, шарниров. Могут быть весьма компактными и простыми по конструкции, хорошо сочетаются с гидравлическим или пневматическим приводом. Зажимы рычажного типа обычно сложнее зажимов со скобой, но в них конструктивно удобно использовать любой тип привода. Проведено сравнение сплошных и вентилируемых дисков. Вентилируемые диски более интенсивно отдают тепло в окружающую среду, однако тепловые деформации и напряжения в них больше, чем в сплошных, вследствие более сложной конфигурации.

В отличие от тормозов других типов ДКТ обычно имеют малый коэффициент взаимного перекрытия: $0,05 \leq K_{вз} \leq 0,2$. В.С. Щедров и А.В. Чичинадзе показали, что уменьшение $K_{вз}$ может приводить к улучшению фрикционно-износных характеристик пары трения вследствие увеличения градиента температур по нормали к поверхности трения.

Большая часть поверхности трения диска у ДКТ открыта и непосредственно охлаждается окружающим воздухом, поэтому применение ДКТ особенно целесообразно в механизмах ПТМ, работающих в повторно-кратковременном режиме. Так как тепловое расширение дисков по толщине незначительно, то зазор между диском и накладками в разомкнутом состоянии можно принимать весьма малым, при этом требуется и малый ход привода, что позволяет применять для размыкания тормозов электромагниты меньшей мощности. Однако, в этом случае необходимо в конструкции зажима предусматривать компенсаторы износа накладок и диска, а также резервировать часть хода привода на компенсацию упругих деформаций и потерь в зазорах подвижных соединений.

По сравнению со шкивами тормозные диски имеют меньшие собственные моменты инерции (особенно в тормозах больших размеров), так как у них масса распределена более равномерно вдоль радиуса. Поэтому применение ДКТ особенно целесообразно в тех механизмах, где момент инерции вращающихся деталей тормоза составляет значительную часть момента инерции затормаживаемых масс, например в механизмах подъема.

В работе приведен анализ влияния схемы установки колодок

на распределение номинального удельного давления вдоль радиуса поверхности трения. Рассмотрены две схемы установки колодок: в направляющих и шарнирная.

При установке колодок в направляющих, распределение давления вдоль радиуса поверхности трения определяется характером износа накладки и диска. Рассмотрены два случая:

1. Износ диска и накладки пропорционален удельному давлению и пути трения, — в этом случае удельное давление обратно пропорционально радиусу трения;

2. Износ пропорционален пути трения, удельному давлению и скорости скольжения, при этом номинальное удельное давление обратно пропорционально квадрату радиуса трения.

Для тормозов с шарнирной установкой колодок получены зависимости (в виде формул и графиков) распределения удельного давления вдоль радиуса поверхности трения от смещения оси шарнира колодки (или точки приложения нормальной нагрузки) относительно среднего радиуса поверхности трения.

Во втором разделе проведен анализ: влияния нагрева на фрикционно-износные характеристики пары трения; существующих методов решения тепловой задачи трения для фрикционных устройств; допущений, принимаемых при разработке математических моделей; процессов выделения и распространения тепла в тормозах. Рассмотрены режимы работы тормозов ПТМ.

Аналитические методы определения температур в тормозах предполагают решение следующих трех задач.

1. Определение количества тепла, поступающего в каждый элемент пары трения. Так как в тормозах практически вся работа трения переходит в тепло, то задача сводится к определению коэффициента распределения тепловых потоков $\alpha_{гп}$.

2. Решение задачи о распространении тепла в элементах пары трения тормоза.

3. Определение способности элементов пары трения тормоза отдавать тепло в окружающую среду. Для тормозных дисков или шкивов, работающих на открытом воздухе задача обычно сводится к определению коэффициентов теплоотдачи.

Существующие методы определения коэффициента распределения тепловых потоков разработаны для пар трения с $K_{вз} \approx 1$ или очень

малым $K_{ВЗ}$ (при трении по свежему следу), для ДКТ эти методы неприемлемы.

Т.П. Ньюкомб показал, что в существующих конструкциях ДКТ с металлическим диском и асбосмоляными накладками около 99% тепла, выделяющегося при торможении, поступает в диск и лишь 1% — в накладку. При таком характере распределения тепла в ДКТ одинаковые по абсолютной величине ошибки в определении $\alpha_{тн}$ приводят к различным ошибкам в определении интенсивности теплового потока на поверхности трения диска и накладки. Для того, чтобы уменьшить влияние ошибки в определении $\alpha_{тн}$ на расчет температур на поверхности трения, следует определять эту температуру, решая задачу о распространении тепла в диске.

В работе показано, что в граничных условиях задачи о распространении тепла в диске ДКТ, вследствие малого $K_{ВЗ}$, необходимо учитывать движение источника тепла (накладки) относительно диска.

Так как в диск поступает большая часть тепла, выделяющегося при торможении, то способность ДКТ рассеивать тепло определяется в основном характеристиками диска, поэтому был проведен анализ и систематизация имеющихся в литературе зависимостей для расчета коэффициентов теплоотдачи вращающихся дисков. Сравнение с результатами наших экспериментальных исследований, приведенное в разделе 4, позволило выделить зависимости пригодные для расчетов коэффициентов теплоотдачи дисков ДКТ.

В результате анализа экспериментальных методов измерения температур при торможении обоснована целесообразность проведения экспериментального исследования температур в ДКТ с помощью термпар, причем показано, что для измерения температуры поверхности трения ДКТ необходимо использовать малоинерционные термпары со спаем, толщина которого не превышает толщины поверхностного слоя материала, деформирующегося при трении.

В третьем разделе на основе анализа режимов работы и характера теплового нагружения дисковых колодочных тормозов ПТМ, сделанного в I-ом и 2-ом разделах, сформулирована в общем виде задача о распространении тепла в тормозном диске ДКТ. Математическая модель процесса выделения и распространения тепла в диске представляет собой уравнение теплопроводности Фурье

в цилиндрических координатах. На кольцевых поверхностях диска заданы граничные условия III-го рода. На боковых поверхностях заданы комбинированные граничные условия II-го и III-го рода, физический смысл которых, — выделение тепла на поверхности трения накладке, перемещающейся относительно поверхности трения диска и теплоотдача на открытой поверхности диска. С целью упрощения задачи путем сокращения переменных и представления решения в виде удобном для анализа, исходная система уравнений преобразована к безразмерной форме. Полученная осесимметричная задача решена с помощью конечных интегральных преобразований. Были построены прямые и обратные преобразования по угловой, радиальной и осевой координатам. Анализ решения показал следующее.

1. Температура в каждой точке поверхности трения диска резко повышается при прохождении под накладкой и снижается после выхода из-под накладки, то-есть, поверхность трения диска подвергается интенсивному теплоимпульсному нагружению;

2. Исходную задачу можно представить как сумму решений двух задач о распространении тепла в диске:

- с заданным начальным распределением температуры, но без источников тепла;
- с нулевой начальной температурой и источниками тепла на поверхности трения.

3. Математически корректно задачу определения температуры в диске тормоза, работающего в повторно-кратковременном режиме свести к следующим двум задачам:

- задаче определения температуры диска перед началом торможения (или задаче определения объемной температуры);
- задаче определения повышения температуры во время единичного торможения.

Показано, что задача определения повышения температуры во время единичного торможения может быть упрощена путем замены задачи с движущимися источниками тепла, осесимметричной задачей о распространении тепла в диске с импульсным источником тепла на боковой поверхности. Сформулированы и решены методами интегральных преобразований две задачи распространения тепла в диске, нагреваемом осесимметричным импульсным источником: с учетом распространения тепла вдоль радиуса диска и без учета

распространения тепла вдоль радиуса. Анализ показал, что второе (более простое) решение может без большой погрешности использоваться для расчетов температур в тормозных дисках. Формулы для вычисления повышения температуры во время единичного торможения получены в форме удобной для вычислений при малом времени торможения и имеют вид:

с учетом распространения тепла вдоль радиуса диска

$$\theta = K_i \sum \Phi \cdot S$$

без учета распространения тепла вдоль радиуса диска

$$\theta = K_i \cdot S$$

здесь $\theta = \frac{T - T_{cp}}{T_{cp}}$ — относительная температура; T — повышение температуры во время единичного торможения; T_{cp} — температура окружающей среды; $K_i = \frac{q_0 \cdot \ell}{\lambda \cdot T_{cp}}$ — критерий Кирпичева;

q_0 — максимальное значение интенсивности теплового потока на поверхности трения; ℓ — половина расчетной толщины диска;

λ — коэффициент теплопроводности материала диска; Φ — множитель, зависящий от интенсивности тепловыделения вдоль радиуса поверхности трения и ширины дорожки трения; ρ — корень уравнения $J_1(\rho) = 0$, где $J_1(\rho)$ — функция Бесселя первого рода;

S — множитель, зависящий от изменения интенсивности источника тепла, глубины расчетной точки от поверхности трения, чисел Фурье $Fo = \frac{a t}{\ell^2}$ и $Fo_r = \frac{a t_r}{\ell^2}$, соответствующих расчетному времени t и времени торможения t_r ; a — коэффициент теплопроводности материала диска. По результатам расчетов множителей Φ и S на ЭЦМ БЭСМ-3м и ИБСМ-5 составлены таблицы и построены графики, позволяющие значительно упростить расчет максимального повышения температуры на поверхности трения во время единичного торможения.

Так как диск имеет малую толщину, а период охлаждения между отдельными единичными торможениями достаточно велик, то расчеты средней объемной температуры можно вести по зависимостям теории регулярного режима. В работе получены формулы для определения объемной температуры диска с учетом продолжительности включения механизма, в котором установлен тормоз.

На основании полученных зависимостей проведен теоретический анализ влияния конструктивных параметров и режима работы ДКТ на его нагрев. Влияние начальной частоты вращения ω_0 оценивалось по зависимостям множителя S от числа Пекле $Pe_0 = \frac{\omega_0 \ell^2}{a}$.

Меньшим значениям P_{e0} соответствуют максимальные пульсации температуры на поверхности трения во время единичного торможения. С увеличением P_{e0} частота пульсаций увеличивается, а амплитуда уменьшается (при постоянном F_{0r}). Отсюда следует, что поверхность трения тормоза, установленного на тихоходном валу механизма будет испытывать меньшее число тепловых ударов, по сравнению с тормозом, установленным на быстроходном валу, однако максимальные значения температур на поверхности трения и амплитуда пульсаций температуры в тормозе смонтированном на быстроходном валу, будет меньше.

Анализ изменения температуры по толщине диска и по дуге окружности показал, что максимальные градиенты температуры на поверхности трения возникают во время первого оборота диска. В конце каждого оборота градиент температуры у поверхности трения снижается практически до нуля. Уменьшение $K_{вз}$ от 0,2 до 0,05 (при сохранении постоянного тормозного момента) приводит к увеличению градиентов температуры в 3 + 6 раз. Установка двух тормозных зажимов вместо одного, при сохранении постоянным $K_{вз}$, приводит к уменьшению амплитуды пульсаций примерно в 1,5 раза и снижению температуры поверхности трения, однако градиенты температур, для этих двух случаев, отличаются незначительно. Анализ изменения температуры по дуге окружности диска показал, что при измерении температуры на поверхности трения с помощью термопары установленной за накладкой, погрешность измерения намного выше, чем при измерении термопарами, установленными в зоне трения.

Анализ изменения температуры вдоль радиуса поверхности трения показал, что для расчетов температуры поверхности трения можно пользоваться решением задачи о распространении тепла в диске без учета радиального теплового потока...

Влияние конструкции и режима работы тормоза на среднюю объемную температуру оценивалось на примере ДКТ унифицированного ряда. Применение вентилируемых дисков вместо сплошных позволяет снизить температуру поверхности трения тормоза на 20 + 30%.

На основе теоретических исследований была разработана инженерная методика расчета дисковых колодочных тормозов ПТМ, приведенная в приложении к диссертации.

В четвертом разделе приведено описание экспериментальной установки, а также результаты экспериментальных исследований. Для измерения температур на поверхности трения применялись ленточные термодатчики, со смазом, формирующимся в процессе трения, позволившие зарегистрировать и измерить пульсации температур на поверхности трения тормозного диска. В связи с тем, что сопротивление таких термодатчиков изменяется в процессе торможения, был проведен вероятностно-статистический анализ погрешности измерения, а также применена специальная схема измерения температуры и тарировки термодатчиков. Объемные температуры измерялись обычными термодатчиками с шаровой головкой. В процессе эксперимента определялись поверхностные и объемные температуры в дисках и накладках ДКТ, при работе в повторно-кратковременном режиме. Испытания проводились со сплошными и вентилируемыми дисками из чугуна СЧ-15-32 и накладками из асбестфрикционного материала И45-40-69 и металлокерамики ФМК-II. В процессе эксперимента варьировались: работа торможения, начальная скорость вращения диска, продолжительность включений, частота включения, удельное давление, $K_{вз}$; было записано и обработано около 1000 осциллограмм с записями температур и параметров режима работы во время единичных торможений. Определены коэффициенты теплоотдачи испытываемых дисков.

Эксперименты полностью подтвердили теоретические выводы и правильность разработанной методики расчета температур, — относительная ошибка расчета не превышает 16%. Было установлено, что максимальные температуры на поверхности трения накладки и диска одинаковы при $K_{вз} \geq 0,1$ и $K_{вз} \leq 0,2$ и на 20 + 30% больше в накладке, при $K_{вз} = 0,05$. С увеличением $K_{вз}$ увеличивается неравномерность температур на поверхности трения, вследствие неравномерного распределения удельного давления.

Пара трения СЧ 15-32 — И45-40-69 при работе в повторно-кратковременном режиме с удельными давлениями до 4 МПа, скоростями скольжения до 25 м/с, $K_{вз} = 0,1 + 0,05$ и температуре поверхности трения до 350°C, имеет хорошие фрикционно-износные характеристики и может быть рекомендована к применению в ДКТ ПТМ. Металлокерамика ФМК-II, в паре с чугуном СЧ 15-32 имеет низкий коэффициент трения ($\mu \approx 0,2$) и интенсивно изнашивает диск.

В приложении приведены тепмодинамические характеристики некоторых фрикционных материалов, методика расчета температур в ДКТ при повторно-кратковременном режиме работы, программа для ЭЦВМ ИВСМ-5 вычисления повышения температуры во время единичного торможения, а также таблицы вероятностно-статистического анализа погрешности измерения температур малоинерционными ленточными термомпарами.

Общие выводы и рекомендации

1. В ПТМ целесообразно применение ДКТ взамен существующих тормозов, особенно в механизмах большой мощности, работающих в тяжелом и весьма тяжелом режимах работы. В тормозах замыкаемых пружинами, с целью уменьшения мощности привода размыкания и затрат на обслуживание тормоза следует предусматривать компенсаторы износа.

2. Получены формулы и расчетные графики, позволяющие определить оптимальное положение оси шарнира колодки и описывающие зависимости распределения давления вдоль радиуса поверхности трения от износа.

3. Разработана методика комплексного, — теоретического и экспериментального, — исследования нагрева ДКТ. Новыми в этой методике являются положения о том, что:

- теоретическое исследование температуры поверхности трения дисковых колодочных тормозов целесообразно вести на основе решения задачи о распространении тепла в диске;

- при расчете нагрева поверхностей трения дисков ДКТ необходимо учитывать пульсации температур, вызванные движением накладок относительно диска;

- экспериментальное исследование температур на поверхности трения тормозного диска, должно проводиться с помощью малоинерционных термпар, у которых размер спая по нормали к поверхности трения не превышает толщины слоя материала, деформируемого при трении.

4. Сформулирована и решена общая задача определения температурного поля в диске, открытые поверхности которого охлаждаются окружающей средой, а на боковых поверхностях действуют движущиеся источники тепла переменной мощности. Математически доказана корректность представления температуры поверхности трения

тормоза в виде суммы объемной температуры и повышения температуры во время единичного торможения. Обоснована возможность упрощения задачи об определении температурного поля в тормозном диске.

Полученное решение пригодно для расчета температур на отдельных пятнах контурной площади контакта в дисковых тормозах любого типа, если известны размеры и координаты (возможно и переменные) этих пятен, и интенсивность выделения тепла на них.

5. Показано, что искомое описание температурного поля в тормозном диске можно получить из решения более простых задач о нагреве диска осесимметричным импульсным источником тепла, действующим на всей поверхности трения диска. Сформулированы и решены две таких задачи: с учетом распространения тепла вдоль радиуса диска, и без учета распространения тепла вдоль радиуса.

6. Получены формулы для расчета средних объемных температур в тормозах, работающих в повторно-кратковременном режиме, позволяющие учитывать продолжительность включения механизма, в котором установлен тормоз.

7. Разработана инженерная методика теплового расчета ДКТ, работающих в повторно-кратковременном режиме. Составлены программы для вычисления на ЭЦВМ БЭСМ-3м и 15ВСМ-5 температурных полей в тормозных дисках. По результатам вычислений на ЭЦВМ построены графики и составлены таблицы, позволяющие значительно упростить расчеты максимальных значений температур на поверхности трения тормозов при $0,05 \leq K_{вз} \leq 0,2$.

8. Проведен анализ влияния параметров режима работы и конструкции тормоза на его нагрев, который показал, что в ДКТ поверхность трения диска подвергается интенсивному импульсному тепловому нагружению. Колебания температуры на поверхности диска в основном зависят от интенсивности теплового источника, частоты вращения диска, коэффициента взаимного перекрытия, количества тормозных зажимов и, в меньшей степени, от продолжительности торможения. Для уменьшения тепловой нагруженности элементов фрикционной пары тормоза, его следует устанавливать на быстроходном валу механизма.

Увеличение количества тормозных зажимов при сохранении

постоянного $K_{вз}$ приводит к снижению как максимальных температур, так и амплитуды колебаний температуры на поверхности трения.

При прочих равных условиях в тормозе с меньшим $K_{вз}$ будет более высокий градиент температуры у поверхности трения, что способствует улучшению фрикционных характеристик.

9. Теоретическое и экспериментальное сравнение нагрева сплошных и вентилируемых дисков показало, что применение вентилируемых дисков вместо сплошных позволяет снизить температуру поверхности трения на 20 + 30%.

10. Для экспериментального исследования нагрева дисковых колодочных тормозов разработана и создана установка, в которой применена новая схема измерения сил трения, позволяющая регистрировать силу и момент трения, действующие на каждую накладку. Разработана методика определения температур с помощью специальных малоинерционных термпар, позволившая впервые зарегистрировать и измерить импульсное изменение температуры поверхности трения тормозного диска ДКТ.

11. Проведены экспериментальные исследования ДКТ. Опытным путем определены коэффициенты теплоотдачи тормозных дисков.

Сравнение расчетных значений температур с экспериментально измеренными подтвердило применимость предлагаемой методики для расчета нагрева дисковых колодочных тормозов, а также подтвердило правильность теоретических выводов.

12. На основе результатов, полученных в настоящей работе разработан унифицированный ряд дисковых колодочных тормозов для подъемно-транспортных машин, в частности: выбраны основные конструктивные параметры тормозов, материалы фрикционной пары, разработаны методы испытания этих тормозов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. К вопросу определения объемных температур при повторно-кратковременном торможении. Известия ВУЗов. Машиностроение, 1973, №12.

2. К вопросу о применении дисковых колодочных тормозов в подъемно-транспортных машинах. В сб. "Подъемно-транспортные машины". Тула, изд-во ТПИ, 1974.

3. Расчет температуры дисковых колодочных тормозов подъемно-транспортных машин. Труды МВТУ № 255, М., 1977.

4. Расчет температурного режима дискового железнодорожного тормоза. В сб. "Расчет и моделирование режима работы тормозных и фрикционных устройств". М., Наука, 1974 (в соавторстве).

5. Решение задачи повышения надежности и долговечности тормозов подъемно-транспортных машин методами подобия и моделирования. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара "Моделирование трения и износа в машинах, приборах и аппаратах". Москва, 1976 (в соавторстве).

6. Оценка теплового режима и моделирование износо-фрикционных свойств фрикционных пар тормозов подъемно-транспортных машин. Труды МВТУ № 230, М., 1976 (в соавторстве).

7. Об оптимальном использовании материалов фрикционных пар тормозных устройств подъемно-транспортных машин. В сб. "Материалы II-го международного симпозиума по прикладной механике". Москва, 1978 (в соавторстве).

8. Тепловые расчеты тормозов ПТМ. Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Вопросы повышения эффективности эксплуатации и совершенствования конструкций подъемно-транспортных машин". Алма-Ата, 1978 (в соавторстве).

9. Untersuchung der Temperatur der Oberflächenreibung von Bremsen mit geringer Gegenprofilüberdeckung. Тезисы докладов V международной конференции по ПТМ. Дрезден, ГДР, 1976 (в соавторстве).

10. Untersuchung der Reibflächentemperatur von Teilbelag-Scheibenbremsen. Hebezeuge und Fördermittel, 1979, №2 (в соавторстве).

Получены положительные решения от ЗИ.У. 1978 г. на две заявки (в соавторстве) на изобретения:

1. Дисковый колодочный тормоз. Заявка 2547095/25-27/144611 от 22.II.1977 г.

2. Дисковый колодочный тормоз. Заявка 2550869/25-27/144602 от 22.II.1977 г.