

М 255546

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

ФЕДОСЕЕВ Вячеслав Николаевич

На правах рукописи

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ
ФРИКЦИОННЫХ ПАР ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ
ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН**

(05.02.04 — Трение и износ в машинах)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

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

Официальные оппоненты —
доктор технических наук, профессор И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ,
кандидат технических наук, ст. науч. сотр. Р. Г. САВЧЕНКО

Ведущее предприятие: Всесоюзный научно-исследователь-
ский и конструкторско-технологический институт асбестовых и

1975 г.

1975 г.

анического факульте-
07005, г. Москва, Б-5,

я в библиотеке МВТУ

M 255546

кземплярах, заверен-
анному адресу.

КОЛОБОВ Л. Н.



1255546

Федосеев В. Н. Моделирование

- I -

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Фрикционные тормозные устройства являются основным средством обеспечения безопасной работы грузоподъемных машин циклического действия. Развитие подъемно-транспортной техники неуклонно ведет к росту рабочих скоростей, увеличению масс и габаритов машин и, как следствие, значительному повышению энергонагруженности фрикционных тормозов. В связи с этим, применяемые в настоящее время материалы фрикционных пар, например, асбофрикционная композиция 6КВ-10 в контакте со стальным контртелом, перестают удовлетворять требованиям промышленности по долговечности и безопасности эксплуатации подъемно-транспортных машин.

Внедрение в отрасль ПТМ новых, прогрессивных фрикционных материалов невозможно без широкой экспериментальной проверки их работоспособности в условиях эксплуатации тормозных устройств. Сдерживающим фактором при внедрении новых фрикционных материалов является то обстоятельство, что принятые в настоящее время в ряде ГОСТов и РТМ методы испытаний или продолжительны и дороги, или не дают полной и объективной оценки поведения материалов в конкретном тормозном узле. Поэтому одной из важных задач повышения надежности и долговечности тормозных устройств ПТМ является создание методики оценки возможностей и установления области применения фрикционных материалов на базе разработанных методов системных исследований.

Цель работы

С учетом требований теории подобия разработать методику моделирования изнашивания фрикционных пар тормозных устройств ПТМ, работающих в повторно-кратковременном режиме торможений, с переносом результатов модельного опыта на натурные объекты.

Методы исследований

Вследствие того, что процесс изнашивания характеризуется сложным комплексом физических явлений и эффектов, обуславливающих протекание процесса, многие из которых не имеют законченного математического описания, единственно возможным теоретическим методом исследований является совместное применение теории подобия и анализа размерностей. В основу экспериментального изучения процесса изнашивания положены методы физического моделирования.

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

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

Официальные оппоненты —
доктор технических наук, профессор И. В. КРАГЕЛЬСКИЙ,
кандидат технических наук, ст. науч. сотр. Р. Г. САВЧЕНКО

Ведущее предприятие: Всесоюзный научно-исследователь-
ский и конструкторско-технологический институт асбестовых и

1975 г.

1975 г.

анического факульте-
07005, г. Москва, Б-5,

я в библиотеке МВТУ

кземплярах, заверен-
анному адресу.

M 255546

КОЛОБОВ Л. Н.



1255546

Федосеев В.Н. Моделирование

- 1 -

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Фрикционные тормозные устройства являются основным средством обеспечения безопасной работы грузоподъемных машин циклического действия. Развитие подъемно-транспортной техники неуклонно ведет к росту рабочих скоростей, увеличению масс и габаритов машин и, как следствие, значительному повышению энергонагруженности фрикционных тормозов. В связи с этим, применяемые в настоящее время материалы фрикционных пар, например, асбофрикционная композиция 6КВ-Ю в контакте со стальным контртелом, перестают удовлетворять требованиям промышленности по долговечности и безопасности эксплуатации подъемно-транспортных машин.

Внедрение в отрасль ПТМ новых, прогрессивных фрикционных материалов невозможно без широкой экспериментальной проверки их работоспособности в условиях эксплуатации тормозных устройств. Сдерживающим фактором при внедрении новых фрикционных материалов является то обстоятельство, что принятые в настоящее время в ряде ГОСТов и РТМ методы испытаний или продолжительны и дороги, или не дают полной и объективной оценки поведения материалов в конкретном тормозном узле. Поэтому одной из важных задач повышения надежности и долговечности тормозных устройств ПТМ является создание методики оценки возможностей и установления области применения фрикционных материалов на базе разработанных методов системных исследований.

Цель работы

С учетом требований теории подобия разработать методику моделирования изнашивания фрикционных пар тормозных устройств ПТМ, работающих в повторно-кратковременном режиме торможений, с переносом результатов модельного опыта на натурные объекты.

Методы исследований

Вследствие того, что процесс изнашивания характеризуется сложным комплексом физических явлений и эффектов, обуславливающих протекание процесса, многие из которых не имеют законченного математического описания, единственно возможным теоретическим методом исследований является совместное применение теории подобия и анализа размерностей. В основу экспериментального изучения процесса изнашивания положены методы физического моделирования.

В.А. Веникова, Г.М. Шеренкова, Р.Г. Савченко, А.К. Погосяна, Е.В. Зиновьева, Г.А. Георгиевского, Б.И. Костецкого, Г.М. Харача и других авторов, в которых рассмотрены вопросы эксплуатации тормозов ПТМ, проблемы трения и изнашивания, методы подбора и физического моделирования и современные фрикционные материалы, позволили сделать следующие основные выводы: многообразие условий эксплуатации подъемно-транспортных машин требует создания расширенной физической модели процесса изнашивания фрикционных пар тормозных устройств ПТМ; существующие фрикционные материалы на основе асбеста с каучуковым, смоляным или комбинированным связующим удовлетворяют температурной области эксплуатации тормозов ПТМ, но необходим дифференцированный подход к их выбору для различных условий работы, хотя методика экспериментальной оценки работоспособности материалов может оставаться единой; методы оценки износно-фрикционных свойств материалов, рекомендованные в ГОСТ 15960-70, РТМ 6-60, не дают полной и объективной оценки показателей качества фрикционных материалов, а разработанные методы физического моделирования процессов, протекающих при торможении ПТМ, посвящены в своей основе лишь фрикционно-температурным задачам.

На основании материалов литературного обзора установлено, что для разработки инженерной методики моделирования процесса изнашивания при внешнем нестационарном трении фрикционных пар тормозов ПТМ необходимо было решить ряд теоретических и экспериментальных задач, основные из которых следующие:

- провести анализ процесса изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ; выявить факторы, оказывающие существенное влияние на процесс, и разработать физическую модель процесса изнашивания,
- разработать расчетный алгоритм определения масштабов моделирования, включающий в себя: получение математического описания процесса в критериальной форме, анализ краевых условий, проверку совместности системы уравнений подобия и расчет масштабных коэффициентов перехода от параметров натурн к параметрам модели и наоборот,
- создать программу расчета масштабов моделирования на ЦВМ,
- разработать конструкцию универсальной, автоматизированной лабораторной машины трения для модельных испытаний тормозных устройств ПТМ в режиме повторно-кратковременных торможений,
- доказать экспериментально корректность предложенной физической модели и правильность расчета масштабных коэффициентов

перехода от параметров природы к параметрам модели и наоборот. Оценить точность моделирования.

Эти задачи последовательно решаются в следующих главах работы.

ВТОРАЯ ГЛАВА "Алгоритм расчета масштабных коэффициентов для моделирования изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ" посвящена подробному рассмотрению факторов, определяющих протекание процессов при внешнем трении, составлению физической модели и математического описания процесса изнашивания в критериальной форме, разработке расчетного алгоритма и программы расчета масштабных коэффициентов перехода от параметров природы к параметрам модели на ЦВМ и изложению результатов расчета масштабов моделирования.

Рассматривая процесс изнашивания при внешнем трении с позиций молекулярно-механической теории трения по И.В. Крагельскому, в основу физической модели процесса положена известная модель процесса внешнего трения для повторно-кратковременного режима торможений. Введение параметров, определяющих протекание процесса изнашивания как в нормальных, так и в экстремальных условиях эксплуатации тормозов ПТМ, позволило создать обобщенную модель процесса. Структурно модель состоит из шести подсистем первого порядка и включает в себя 54 параметра пары трения, режима работы, микро- и макроконтрактивования, теплообразования и теплопередачи, механо-химического взаимодействия с окружающей средой. На основании полученной физической модели составлено параметрическое уравнение процесса изнашивания фрикционных пар тормозов подъемно-транспортных машин при повторно-кратковременном режиме работы.

Задача получения обобщенных переменных, описывающих процесс изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ, решена на базе π -теоремы анализа размерностей. С целью получения совместной системы уравнений базисные параметры для всех подсистем приняты одинаковыми.

Целью составления критериального описания является воспроизведение в дальнейшем процесса изнашивания на физических моделях. Для такого воспроизведения необходимо рассчитать масштабные коэффициенты перехода от параметров природы к параметрам модели.

Задача расчета масштабных коэффициентов заключается в решении системы уравнений подобия относительно одного из параметров процесса, принятого за известный.

С этой целью критериальное уравнение подобия представим

в симплексной форме. Отношение (симплекс) каждого критерия модели к соответствующему критерию природы равно единице при подобии модели и природы. Далее уравнения линейризуются; вводятся краевые условия с целью получения замкнутой системы линейных уравнений; выясняется определенность системы. Согласно правилу Крамера, такая система линейных уравнений имеет единственное решение (при условии, что ее определитель не равен нулю).

Любую матрицу, образованную из коэффициентов при членах линейных уравнений, можно представить как квазидиагональную матрицу, у которой по диагонали расположены единицы в столбцах, соответствующие параметрам, не включенным в число базисных и краевых условий. В общем случае, при 4-х базисных (в системе основных единиц измерения: M (масса), L (длина), T (время), Θ (температура)) 4 независимых один от другого параметра, с которыми устанавливается связь остальных параметров процесса) параметрах имеем $n-4$ уравнений процесса при n неизвестных, где n число параметров, предусмотренных физической моделью. Например, при базисных параметрах: V - скорость скольжения, P - нагрузка на пару трения, ΔT_{12} - перепад температур между температурой нагретого элемента и температурой окружающей среды, $K_{r,12}$ - комплекс геометрических размеров элементов пары трения, матрица системы уравнений подобия процесса изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ имеет вид:

$e_n C_1$	$e_n C_{nm}$	$e_n C_n$	$e_n C_4$		$e_n C_m$	$e_n C_v$	$e_n C_p$	$e_n C_{\Delta T}$	$e_n C_r$
I	0	0	0		0	I	0	0	I/6
0	I	0	0		0	0	-I	0	I/6
0	0	I	0		0	-I	-I	0	0
0	0	0	I		0	0	0	0	I/6
-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
0	0	0	0		I	4	-2	0	I/3
0	0	0	0		0	α_{11}	α_{12}	α_{13}	K_1
0	0	0	0		0	α_{21}	α_{22}	α_{23}	K_2
0	0	0	0		0	α_{31}	α_{32}	α_{33}	K_3

Как видно, для получения замкнутой системы уравнений необходимо ввести в систему 3 краевых условия в виде симплексов ряда параметров процесса, условно равных единице. Вид краевых условий во многом определяет численные значения масштабов моделирования и зависит от специфики эксплуатационного режима и возможностей лабораторного экспериментального оборудования.

По условию подобия натурный и модельный процессы принадлежат к одному классу явлений и описываются одинаковыми уравнениями подобия. Однако при физическом моделировании процесса изнашивания при внешнем трении имеет место приближенное подобие вследствие естественного разброса параметров системы и отсутствия технических возможностей соблюдения масштабов ряда параметров моделируемого процесса. Так, например, воспроизведение на моделях расчетных значений параметров физико-механических свойств материалов пары трения (плотности ρ , модуля упругости E , коэффициента линейного расширения α , удельной теплоемкости C , теплопроводности λ) требует проведения модельных экспериментов не на натуральных, а на "эквивалентных" материалах с наперед заданными, рассчитанными в соответствии с масштабными коэффициентами перехода, плотностью, модулем упругости и т.д., создание которых представляет самостоятельную задачу. По этой причине модельные эксперименты обычно проводят не на эквивалентных, а на натуральных материалах, что приводит к искажению подобия.

Если же ввести в число краевых условий симплексы всех параметров, характеризующих физические свойства материалов: $C_\rho = 1$, $C_E = 1$, $C_\alpha = 1$, $C_C = 1$, $C_\lambda = 1$, то число неизвестных станет на два меньше числа уравнений и система уравнений подобия будет неопределенной.

В диссертации рекомендовано с целью снижения искажения подобия и соблюдения условия определенности системы уравнений подобия вводить в условие задачи комбинированное краевое условие, полученное путем объединения критериев, характеризующих физико-механические свойства материалов $K_y = K_\rho \cdot K_E \cdot K_\alpha \cdot K_C \cdot K_\lambda$. Причем, чтобы не нарушать K - теоремы анализа размерностей, так как в этом случае число уравнений стало на 4 меньше числа неизвестных, в систему уравнений подобия введен ряд условных уравнений в виде бинарной комбинации членов комплексного критерия K_y с критериями параметров режима испытаний.

Однако в этом случае условие совместности системы уравнений

подобия иногда может нарушаться. Проверку совместности системы в реферируемой работе рекомендовано вести методами линейной алгебры с помощью определителя Грама по величине:

$$\delta^2 = \frac{\begin{vmatrix} a_1 a_1 & a_1 a_2 & a_1 a_3 & a_1 K \\ a_2 a_1 & a_2 a_2 & a_2 a_3 & a_2 K \\ a_3 a_1 & a_3 a_2 & a_3 a_3 & a_3 K \\ K a_1 & K a_2 & K a_3 & K K \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 a_1 & a_1 a_2 & a_1 a_3 \\ a_2 a_1 & a_2 a_2 & a_2 a_3 \\ a_3 a_1 & a_3 a_2 & a_3 a_3 \end{vmatrix}}$$

где a_1, a_2, a_3, K - вектора, компоненты которых вписаны в столбцы матрицы (стр. 5): $a_1 = (\alpha_{11}, \alpha_{21}, \alpha_{31})$, $a_2 = (\alpha_{12}, \alpha_{22}, \alpha_{32})$, $a_3 = (\alpha_{13}, \alpha_{23}, \alpha_{33})$, $K = (K_1, K_2, K_3)$.

Раскрывая определитель системы для варианта расчета масштабов моделирования: базисные параметры - $U, \rho, \Delta \vartheta, \alpha, \kappa, \lambda$, краевые условия - $C_M = C_t = C_\gamma = 1$, где $C_\gamma = \frac{C_{\Delta \vartheta} C_\rho}{C_\gamma C_\rho}$, получим, что $\delta^2 = 0$. Отсюда следует, что систе-

ма уравнений подобия, описывающая процесс изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ при данных базисных параметрах и краевых условиях, в случае использования на натуре и модели одинаковых материалов трущихся пар совместна, что доказывает правомерность применения в данном случае на модели материалов натуральных фрикционных пар. Однако обязательным условием расчета масштабов моделирования при этом должно быть введение комплексного критерия

C_γ в число краевых условий и проверка системы уравнений на совместность.

В качестве известного по условию задачи параметра принят комплекс геометрических размеров элементов пары трения:

$$C_r = \frac{S_1 S_2}{S'_1 S'_2} \cdot \frac{A'_a, A'_a}{A_a, A_a}$$

где A_a - номинальная площадь трения, $S = \frac{A_6}{V}$ - характерный размер (A_6 - площадь свободной, теплоотдающей поверхности эле-

ментов пары трения, V - объем элементов). Параметр со штрихом относится к модели, без штриха - к натуре.

С целью снижения трудоемкости расчета предложена программа расчета масштабов моделирования на ЦВМ "Минск-32", условно названная "РАКФИ". По этой программе были определены масштабные коэффициенты перехода для ряда вариантов базисных параметров и краевых условий. Вид масштабов моделирования параметров режима испытаний для двух вариантов приведен в таблице I.

Таблица I

Вариант расчета	Масштабные коэффициенты	C_v	C_p	C_t	$C_{w_{тн}}$	C_γ
I	Базисные параметры $W_{тн}, C_{1,2,3}, E_{1,2}, K_{r,1,2}$	$C_T^{2/II}$	$C_T^{5/33}$	$C_T^{I/66}$	$C_T^{7/22}$	$C_T^{I/II}$
	Краевые условия $C_{Na} = C_{\Delta\delta} = C_\gamma = 1$					
II	Базисные параметры $W_{тн}, C_{1,2,3}, E_{1,2}, K_{r,1,2}$	$C_T^{I/6}$	$C_T^{I/6}$	C_T^0	$C_T^{I/3}$	$C_T^{I/6}$
	Краевые условия $C_{Na} = C_t = C_\gamma = 1$					

ТРЕТЬЯ ГЛАВА "Объекты испытаний, испытательное оборудование и средства контроля параметров процесса изнашивания" посвящена рассмотрению экспериментальной базы для оценки корректности принятой физической модели и правильности расчета масштабов моделирования.

В качестве объектов испытаний приняты: натура - крановые двухколесные тормоза типа ТКП и ТТ применительно к механизмам передвижения и подъема груза ПТМ, модель - кольцевые образцы с габаритами - $D = 75$ мм, $\alpha = 53$ мм, $K'_{вз} = K_{вз} = 0,39$, трущиеся торцами.

Анализ известных конструкций испытательных машин (ИМ-58, ИМ-66, МТТ, тормозные инерционные стенды) показал, что существующее экспериментальное оборудование не позволяет в полной мере с достаточной степенью точности имитировать работу тормоз-

ных устройств ПТМ.

Подъемно-транспортные машины обладают рядом специфических особенностей, в силу которых для лабораторных износных испытаний их фрикционных тормозных устройств необходимо специализированное испытательное оборудование. Это и повторно-кратковременный режим работы с числом торможений 300 и более в час, и различие в величинах реализуемой работы торможения в течение единичного цикла работы механизма подъема груза: подъем - спуск груза. Кроме того, применение в качестве привода автоматических стопорных тормозов электрогидравлических или электромеханических толкателей приводит к тому, что за время срабатывания тормоза тормозной вал успевает существенно изменить свою скорость.

В реферируемой работе отмечено, что с целью сохранения ойлловых, скоростных и энергетических характеристик в процессе имитации работы механизма, оборудованного стопорным тормозом со значительным временем срабатывания, необходимо сохранять характер изменения во времени скорости вращения тормозного вала натурального механизма. Существующие конструкции испытательных машин не удовлетворяют этому требованию.

Предложена новая автоматизированная испытательная машина трения МТТ-72 для модельных и натуральных испытаний тормозных устройств ПТМ в режиме единичных и повторно-кратковременных торможений. Испытуемые фрикционные узлы машины: кольцевые образцы с наружным диаметром до 75 мм, натурные тормозные устройства с диаметром контртела до 160 мм. Нагрузочное устройство - рычажного типа с внешней нагрузкой от пружины сжатия и размыканием от электрогидравлического толкателя ТТМ-50.

Машина МТТ-72 работает в автоматическом режиме. Приводной двигатель постоянного тока вращается постоянно в течение цикла испытаний, а повторно-кратковременный режим работы задается с помощью задатчика программы испытаний, выполненного на двух ре-

х/ В.Н. Федосеев, М.П. Александров, Э.Д. Браун "Способ модельных фрикционно-износных испытаний", Положительное решение ГК по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР от 27 марта 1974 года по заявке № 1807632/27-II.

ле времени ВЛ-17, и реализуется периодическим включением электромагнитной муфты передачи момента вращения с приводного на инерционный вал машины.

Электрическая схема машины МТТ-72 позволяет проводить испытания в режиме машин ИМ-58, ИММ-66 и в режиме испытаний тормозных устройств со значительным временем срабатывания как при единичных, так и повторно-кратковременных торможениях.

Машина снабжена контрольными и измерительными устройствами для контроля или регистрации скорости вращения приводного двигателя, скорости вращения инерционного вала, силы (момента) трения, пути трения, числа циклов испытаний, поверхностной и объемной температур. Запись регистрируемых параметров осуществляется на фотобумагу светолучевого осциллографа Н-105.

ЧЕТВЕРТАЯ ГЛАВА "Моделирование процесса изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ при повторно-кратковременном режиме работы" содержит результаты сравнительных исследований на натуре и модели износно-фрикционных свойств асбофрикционных материалов 6КВ-10 (ГОСТ 15960-70), 8-229-63 в контакте со стальным контртелом сталь 55 (ГОСТ 977-65), результаты сравнительных модельных испытаний асбофрикционных материалов 43-2-66 (каучуковое связующее), 43-618-67 (смоляное связующее), 242-9-71 (комбинированное связующее) применительно к работе тормозов механизмов передвижения ПТМ весьма тяжелого режима эксплуатации; оценку точности моделирования.

Сравнительные натурные и модельные испытания имели целью выявить корректность предложенной физической модели, оценить правильность расчета масштабных коэффициентов перехода от параметров природы к параметрам модели и наоборот, а также воспроизводимость численных значений износа фрикционных пар тормозов ПТМ на физических моделях.

Сравнительные испытания проводились в три этапа: 1. при идентичности температурных полей на натуре и модели (вариант I масштабов моделирования, см. табл. I); 2. при подобии температурных полей на натуре и модели, но отсутствии их идентичности (вариант II масштабов моделирования, см. табл. I). В качестве природы использован крановый двухколесный тормоз ТКТИ-300М применительно к механизму передвижения мульдоманитного крана $Q = 15/5$ тс, установленный на тормозной сцене для натурных испытаний; 3. при подобии температурных полей - натура крановый

двухколесный тормоз ТТ-160 применительно к механизму подъема груза мостового однобалочного крана $Q = 5$ тс.

В качестве модельного узла трения использовались кольцевые образцы с наружным диаметром 75 мм, внутренним - 53 мм при $K'_{вз} = K_{вз} = 0,39$, $A = 10$ мм. Материалы фрикционных пар: вальцованные асбофрикционные композиции 6КВ-10 и 8-229-63 по стали 55. Твердость поверхности трения контртела - 350НВ; чистота поверхности трения натурального контртела - $\nabla 7$, модельного - $\nabla 10$.

Сравнительные модельные испытания асбофрикционных материалов с различными связующими проводились с соблюдением подобия температурных полей применительно к тормозу ТКТТ-300М механизма передвижения мультимагнитного крана $Q = 15/5$ тс. Материал контртела - сталь 55 (ГОСТ 977-65); твердость поверхности трения - 350НВ, чистота поверхности - $\nabla 10$.

Численные значения параметров режима натуральных и модельных испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

	V (м/сек)	P (кг)	T_u (сек)	W_m (кгм)	J (кгмсек ²)
I. натура (тормоз ТКТТ-300М механизма передвижения мультимагнитного крана $Q = 15/5$ тс)	11,5	620	30	20300	2,73
			12		
модель I	1,5	112	33	510	0,95
модель II	1,85	99	30	510	0,35
			12		
II. натура (тормоз ТТ-160 механизма подъема груза мостового крана $Q = 5$ тс)	7,45	150	15	2680	0,25
	7,95		15	3100	
модель X/	2,23	50	15	240	0,075
	2,38		15	280	

х/ В числителе стоит значение параметра для торможения при подъеме груза, в знаменателе - для торможения при спуске груза.

Анализ результатов сравнительных натурных и модельных испытаний показал, что погрешность моделирования по оценке интенсивности линейного износа при идентичности температурных полей составила 18-20 %, при подобии температурных полей - 20-22 %. Считается, что это является достаточно высокой степенью воспроизводимости процесса изнашивания на физических моделях.

Сравнительные модельные испытания асбофрикционных материалов с различными связующими имели целью оценить качество этих материалов применительно к условиям эксплуатации тормозных устройств ПТМ. В результате испытаний выявлено, что для использования в тормозах ПТМ при весьма тяжелом режиме работы может быть рекомендован материал шифра 242-9-71, износостойкость которого примерно в два раза выше износостойкости серийноприменяемой композиции 6КВ-10 при достаточно высоком /0,35/ среднем значении коэффициента трения.

Работа имеет два приложения:

1. Программа расчета масштабов моделирования на ЦВМ "Минск-32";
2. Техничко-экономический анализ эффективности моделирования изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ.

Основные результаты и выводы

1. На основе анализа процесса изнашивания при внешнем трении фрикционных пар тормозов ПТМ, разработанного алгоритма расчета масштабов моделирования и созданного специализированного испытательного оборудования с учетом требований теории подобия, впервые обоснована и экспериментально подтверждена методика воспроизведения изнашивания фрикционных пар тормозов ПТМ на физических моделях с переносом результатов модельного опыта на натурные объекты.

2. Составлен алгоритм расчета масштабов моделирования, отличительной особенностью которого является введение в число краевых условий задачи комплексного критерия, образованного из критериев трудновоспроизводимых на моделях параметров, например, параметров физико-механических свойств материалов пары трения.

3. Создана программа "РАКТИ" расчета масштабов моделирования на ЦВМ "Минск-32".

4. Анализ процесса работы тормозов ПТМ позволил разработать требования к лабораторному испытательному оборудованию и создать автоматизированную машину трения МТТ-72 для модельных и натурных испытаний тормозных устройств ПТМ в режимах единичных и повторно-кратковременных торможений. Создана измерительная оснастка для контроля коэффициента трения и интенсивности линейного износа канатного колодочного тормоза.

5. Проведенные сравнительные натурные и модельные испытания показали корректность принятой физической модели и правильность расчета масштабов моделирования. Максимальная погрешность моделирования по оценке интенсивности линейного износа не превышает 20-22 %, что свидетельствует о достаточно высокой воспроизводимости изнашивания на физических моделях тормозов ПТМ.

6. Сравнительные модельные испытания асбофрикционных материалов с различными связующими показали, что для использования в колодочных тормозах ПТМ весьма тяжелого режима работы может найти применение материал шифра 242-9-71, износостойкость которого примерно в два раза выше износостойкости серийноприменяемой композиции 6КВ-10 при достаточно высоком /0,35/ среднем значении коэффициента трения.

7. Результаты работы использованы при создании по заказу Ленинградского завода ПТО имени С.М. Кирова методики моделирования изнашивания фрикционных пар канатных колодочных тормозов. Предварительный расчет экономической эффективности показал, что использование лишь одной машины трения МТТ-72 взамен тормозного инерционного стенда для натурных испытаний дает годовой экономический эффект свыше 12 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации отражено в следующих печатных работах:

1. Федосеев В.Н., Александров М.П. "Расчет канатных колодочных тормозов с электрогидравлическим приводом". "Вестник машиностроения", 1972, № II.
2. Федосеев В.Н. "Торможение канатного механизма подъема груза, оборудованного тормозом с электрогидравлическим приводом". "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1973, № II.
3. Федосеев В.Н., Александров М.П., Браун Э.Д. "Моделирование износа в тормозах подъемно-транспортных машин". Сборник "Подъемно-транспортные машины", вып. 2, Тула, 1973.

4. Александров М.П., Браун Э.Д., Федосеев В.Н. "О методике оптимизации фрикционных пар тормозов ПТМ по долговечности". Тезисы докладов III-го межведомственного семинара "Трение, износ и методы испытаний асбофрикционных материалов", ЦНИИЭнефтехим, 1973.
5. Александров М.П., Браун Э.Д., Федосеев В.Н. "Моделирование процесса износа фрикционных пар тормозов ПТМ". Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Физико-химическая механика контактного взаимодействия и фреттинг-коррозия", Киев, изво КИИТА, 1973.
6. Федосеев В.Н. Прогнозирование износа фрикционных пар тормозов ПТМ". Сборник материалов Всесоюзного совещания "Новые методы проектирования, расчета, испытаний и эксплуатации подъемно-транспортных машин и контейнеров", Ленинград, НПОмашпром, 1974.
7. Федосеев В.Н. "Устройство для контроля тормозного момента тормоза". Авторское свидетельство СССР № 320444.
8. Федосеев В.Н. "Устройство для измерения износа фрикционных накладок колодного тормоза". Авторское свидетельство СССР № 418360.