

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ УКРАИНЫ  
КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

*Белайд*

АИТ УАЛИ Белайд

АНДР

УДК 681.2.08-620.178.162

Исследование контрольно-испытательной  
аппаратуры и материалов пар трения  
в режиме безызносности.

Специальность 05.11.13

Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий.

Специальность 05.11.01

Приборы и методы измерения  
механических величин

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев - 1994

681.2: 59.021



00339952 (V)

Робота виконана в Київському політехнічному інституті

Научний керівитель - Кандидат технічних наук,  
доцент Р. М. Вдовин

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор  
Стрижак В. Я.  
кандидат технічних наук, доцент  
Лабунец В. Ф.

Ведуче підприємство - НІМ "Буран"

Захист состоится "13" липня 1994 года в 15 часов  
на засіданні спеціалізованого ради Д068.14.08  
по присудженню ученої ступені кандидата технічних  
наук в Київському політехнічному інституті (252056,  
г. Киев, пр. Победы, 37. Кор. I.).

Отзиви на автореферат в одному екземплярі, завереному печатком, просим направити в адресу Ради.

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розослан "11." *Маг* 1994г.

Учений секретар  
спеціалізованого ради  
Д 068.14.08 , кандидата  
технічних наук, доцент

*Бабак*

В. П. Бабак



## АННОТАЦИЯ

Цель работы. Диссертационная работа посвящена анализу существующей контрольно-испытательной аппаратуры по исследованию пар трения, разработке, созданию и исследованию новой малогабаритной установки для измерения коэффициентов трения с повышенной точностью, испытанию новых типов пластичных смазок предрасположенных к реализации эффекта безызносности, обработке результатов исследований с помощью соответствующего пакета прикладных программ.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Провести анализ существующих машин трения и контрольно-испытательной аппаратуры, используемой при исследовании эффекта безызносности.
2. Разработать и изготовить экспериментальную установку.
3. Исследовать характеристики созданной экспериментальной установки. Определить метрологическую и трибологическую оценки установки с учетом колебательных процессов и возмущающих эффектов при испытании триад материалов.
4. Подобрать материалы пар трения и создать для них смазки. Разработать план эксперимента и методику проведения опытов на созданной экспериментальной установке. Провести испытание различных пар трения из предложенных материалов и смазок согласно выбранному плану эксперимента.
5. Обработать результаты исследования с применением метода регрессионного анализа и получением математических моделей процесса трения в испытуемых парах.
6. Изучить закономерности влияния скоростей скольжения, нагрузки и времени на поведение пар трения и смазок с учетом изменения коэффициента трения.
7. Провести анализ работы по подбору пар трения и смазок с учетом изменения коэффициента трения, шероховатости поверхности трения, микроскопических снимков поверхностного слоя, химсостава поверхностей трения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие науки и техники на современном этапе неразрывно связано с разработкой и использованием методов направленных на сбережение энергии и ресурсов в технологических процессах, на увеличение КПД технических устройств, машин и приборов, на повышение точности и долговечности элементов приборов, машин и устройств.

Как известно одним из возможных путей повышения точности и долговечности элементов приборов при их эксплуатации является применение эффекта безызносности, при котором понижаются потери из-за трения, и, следовательно, увеличивается КПД технических узлов машин.

Актуальность настоящей работы выражается с одной стороны необходимостью создания новых исследовательских приборов, стэндов и установок для изучения комплекса величин процесса трения, с другой выражается необходимостью сократить потери энергии в механических системах из-за трения в трущихся узлах машин и оборудования. Последняя необходимость сопровождается требованием промышленности в обеспечении срока наработки до 100 тысяч часов при одноразовой закладке смазки в узел трения.

Общая методика выполнения работы. Объектами исследования являлись существующие машины трения, разработанная новая установка трения, пластичные смазочные материалы нового типа и материалы для испытываемых пар трения.

Установку изготавливали согласно разработанной схеме приняв во внимание основные требования к подобной машине трения. Исследовались технические характеристики установки, включая метрологическую оценку установки, ее схема замещения с анализом временной и частотной характеристики на ЭВМ с помощью пакета прикладных программ ПРАНС (Проектирование Автоматизированное Нелинейных систем).

На созданной установке трения исследовались три смазки нового типа в парах твердых материалов. Материалами для контртел и образцов служили стали 25Х13Н2, 14Х17Н2 и 40Х18Н2М и бронзы Брж9-4 и БрКМц3-4.

При испытании исследуемых пар трения с помощью созданной

установки измерялись значения коэффициентов трения. При исследовании поверхностных слоев образцов использовались профилограф-профилометр, электронные микроскопы "неорит 21" и ММТ-А и фотоэлектрическая система МТС-В для анализа состава слоя исследуемого материала.

При обработке результатов измерений коэффициентов трения использованы методы математического и физического моделирования. С помощью пакета прикладных программ ПРИАМ получены соответствующие модели процесса трения в данных парах трения, выявлены основные закономерности в каждой из них.

Научная новизна. Предложена новая установка трения, которая с одной стороны является объектом исследования приборостроения, а с другой стороны служит в качестве контрольно-испытательной аппаратуры для исследования явлений возникающих в триботехнике. Выявлены основные источники погрешности установки и разработана методика их расчета, изучено влияние колебательных процессов и помех на конечный результат, исходя из анализа схемы замещения установки; предложены материалы трения, которые позволяют работать в режиме безызносности, созданы математические модели изменения коэффициента трения с входными параметрами триботехнологической системы; исследованы поверхности трения испытываемых материалов, получена база данных о различных материалах пар трения.

Автор защищает:

- анализ существующей контрольно-испытательной аппаратуры по исследованию пар трения в режиме наименьшего трения;
- разработка, создание и исследование новой установки трения, позволяющей измерять малые коэффициенты трения с повышенной точностью;
- предложение трех типов смазочных материалов;
- методика и анализ результатов испытания материалов на установке с помощью пакета прикладных программ ПРИАМ на ПЭВМ.

Практическая ценность и реализация результатов исследований.

- Разработана новая установка трения, которая позволяет измерять силы трения с повышенной точностью и может служить моделью

для создания измерительной установки более мощной и менее реагирующей на помехи.

-Разработана схема замещения установки трения и получены временные и частотные характеристики на ЭЭМ с помощью ППП ПРАНС.

-Предложены новые типы пластичных смазок с хорошими показателями трения для дальнейших испытаний при больших нагрузочных и скоростных режимах трения и при низких температурах.

-Предложена методика исследования пар трения материалов на ЭЭМ с помощью пакета прикладных программ ПРИАМ.

-Изложенные в диссертации исследования методик и методов, исследования трения, разработанные математические модели проводились в соответствии с тематикой научно-исследовательских работ по повышению точности, надежности и долговечности приборов и установок с применением эффекта безызносности. Апробация результатов диссертационной работы выполнена на приводах бортовых метеорадиолокаторов разработанных совместно с НИИ "Буран".

Публикации : По теме диссертационной работы имеется 2 публикации.

Объем работы : Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и приложения. Содержит 130-страниц машинописного текста, 42 рисунков, 18 таблиц, библиографический список на 119 наименований литературных источников.

Введение включает обоснование актуальности работ и цели исследований.

Первая глава посвящена обзору исследований по теме диссертационной работы и постановке задач исследований. Она включает следующие пункты:

I. Существующие установки и машины трения: Были описаны как классические машины трения (МТ) так и новые установки трения, приведены основные характеристики МТ. Анализ МТ позволил выделить некоторые их недостатки: точный характер взаимодействия образцов, коррозионный процесс при возвратно-поступательном движении, не учитываются электрические процессы, большие габариты, узкий диапазон варьирования факторов, автоколебания, не учитываются допустимые погрешности и точность измерения параметров тра-

ния и др. Описаны различные контрольно-измерительные системы при исследовании трения.

2. Обзор литературы по эффекту безызносности, в котором говорится о большом объеме как теоретических так и практических работ по исследованию эффекта безызносности.

3. Результаты исследования: Перечислены лучшие результаты по обнаружению эффекта безызносности на практике при варьировании различных стимулирующих факторов. Изложены еще не изученные вопросы по теме безызносности. Изложены разные подходы к изучению эффекта безызносности, в именно, кинематический, термодинамический, физический и химический подходы и определен порядок дальнейшего исследования.

4. Сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию методики исследования разрабатываемой установки трения и новых смазочных материалов для выбранных материалов пар трения.

Для исследования трения и в особенности возможности появления эффекта безызносности выбраны пять различных материалов для образцов и контрол (3 стали и 2 бронзы) и 3 смазки нового типа.

Были выбраны следующие материалы:

сталь 25ХГЗН2, сталь 14ХГ7Н2, сталь 40ХГ8Н2М, бронза БрАж9-4, бронза БрКМц3-4. Выбранные материалы использовались с целью снижения потери энергии из-за трения при их эксплуатации в различных узлах трения приборов и установок приборостроения.

В качестве смазочного материала использовались три типа смазок, которые обозначали СУ1, СУ2 и СУ3. При изготовлении этих смазок к ним было поставлено требование включения в их состав известных компонентов (кислоты 12-оксистеариновой, фторопласта и т.д.), которые снижают силы трения в узлах трения.

Выбор режимных (скорости скольжения, нагрузки) параметров исследования осуществили с целью представления требований по обеспечению эффекта безызносности в современных устройствах точного приборостроения. Испытания проводились при скоростях 0.031м/с, 0.047м/с и 0.059м/с и при нагрузках 4.06Н, 6.34Н и 7.6Н.

Время испытания варьировалось от 20 минут до 60 часов. Программа испытаний включала два этапа: количественный (время испыта-

ний  $t = 20$  мин) и качественный (время испытаний от 4-х до 50-ти часов).

На основании результатов испытаний выявлены закономерности изменения коэффициента трения в зависимости от режимных параметров и от времени наработки пар трения.

Для исследования поверхностного слоя материалов образцов и контрол и с целью выявления наличия или отсутствия новообразований, а также характера их распределения по поверхности контактирования использовались электронные микроскопы Neophot 21 и ММР-4. Для исследования химсостава поверхностей использовали фотовольтрическую систему МЭС-8.

Параметры микрогеометрии поверхностей трения оценивали по профилограммам.

Третья глава состоит из следующих пунктов:

1. Постановка задачи на разработку новой установки трения. Описание установки и методики измерения сил трения с ее помощью. Схема установки представлена на рис.1. Для расчета коэффициента трения использовали схему расчета на рис.2. Используя принцип

возможных перемещений 
$$\sum_{k=1}^n dA_k = \sum_{k=1}^n F * dr_k = 0 \quad (I.I.)$$

находим значение момента трения  $M_{тр}$ :

т.е.:

$$\sum_{k=1}^n dA_k = M_{тр} * d\alpha + N_x * dx_a + N_y * dy_a + F_{пл_x} * dx_b + F_{пл_y} * dy_b + P_{ox} * dx_c + P_{oy} * dy_c = 0.$$

где:

$dA_k$  - элементарная работа;  $dr_k$  - элементарное перемещение;

$M_{тр}$  - момент трения;

$N$  - нагрузка (сила прижатия образца к контролу);

$N_x, N_y$  - проекция усилия прижатия образца  $N$  к контролу на оси  $x$  и  $y$

$F_{пл_x}, F_{пл_y}$  - проекция массы пластины и носителя образца  $F_{пл}$  на оси  $x$  и  $y$ .

$P_0$  - сила тяжести противовесов;

Найдя соотношение между проекциями возможных перемещений различных точек и сил и подставив полученные значения в исходное уравнение получим

$$M_{тр} = N * D * \cos \theta + (M_{пл} - P_0 * d) * \cos \alpha \quad (1.2.)$$

Где:

$D$  - расстояние от оси вращения рамки до точки действия нагрузки  $N$ .

$\rho_{пл}$  - расстояние от центра массы пластины и носителя образца до оси вращения рамки.

$\theta$  - угол отклонения нагрузки  $N$  от нормали  $N_{\perp}$ .

$M_{пл}$  - момент вращения пластины и носителя образца относительно оси вращения рамки.  $M_{пл} = P_{пл} * \rho_{пл}$

Силу трения находим:

$$F_{тр} = \frac{M_{тр}}{R}; \text{ где: } R - \text{ радиус контртела.}$$

Коэффициент трения находим:

$$f = \frac{F_{тр}}{N} = \frac{M_{тр}}{R * N} = \frac{D}{R} * \cos \theta + \frac{M_{пл} - P_0 * d}{R * N} * \cos \alpha \quad (1.3.)$$

Нормальную нагрузку находим:

$$N = \frac{P * l}{r} * \cos \varphi \quad (1.4.)$$

где:

$P$  - вес груза на рычаге;

$r$  - радиус ролика, передающего усилие;

$l$  - плечо груза на рычаге относительно его оси вращения;

$\varphi$  - угол отклонения рычага от горизонтали;

$N$  - усилие прижатия образца к контртелу.

Соотношение между углами  $\varphi$  и  $\alpha$ :

$$\Delta \varphi = \frac{D}{r} * \Delta \alpha \quad (1.5.)$$

Исходя из конструкции установки соотношение между  $\theta$  и  $\alpha$

$$\theta = \arctg \left( \frac{52 - 36 * \cos \alpha}{47.7 + 36 * \sin \alpha} \right) - \alpha \quad (1.6.)$$

2. Характеристики установки:

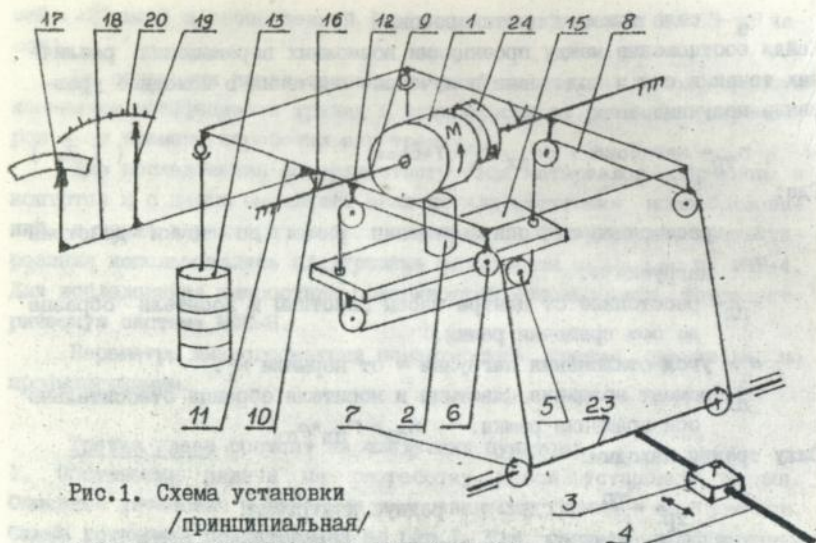


Рис.1. Схема установки  
/принципиальная/

1. Контртело. 2. Образец. 3. Груз. 4. Рычаг.
- 5, 6 и 7. Ролики. 8. Тросик. 9. Неподвижный вал. 10. Ножевые опоры.
11. Рамка. 12. Пластина. 13. Противовесы. 14. Не показан/цилиндрический стержень/. 15. Подвижная траверса. 16. Основание. Потенциометр.
18. Шток. 19. Стрелка. 20. Шкала. 21. Не показан/Двигатель/.
22. Не показан /редуктор/. 23. Подвижный вал. 24. Зубчатое колесо.

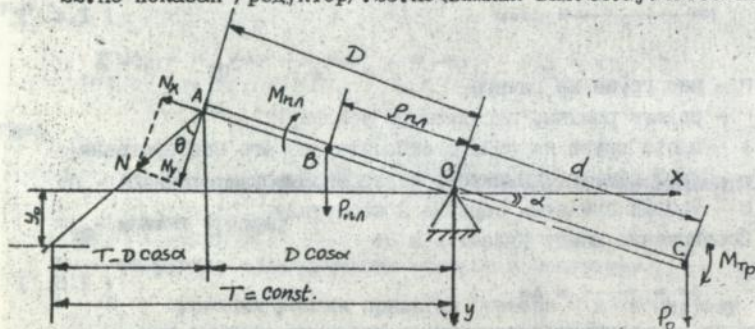


Рис.2. Схема расчета коэффициента трения.

Используемый двигатель ДПР-62Н1-03 имеет следующие технические характеристики:

- номинальная мощность  $N_{\text{ном}} = 10 \text{ Вт}$ ;
- номинальный момент  $M_{\text{ном}} = 200 \text{ гс} \cdot \text{см}$ ;
- номинальное число оборотов  $n_{\text{ном}} = 4500 \text{ об/мин}$ ;
- номинальное напряжение 27 В.

Редуктор состоит из 5-ти зубчатых пар и 5-ти подшипников. Его передаточное число равно  $i = 242$ .

Скорость скольжения  $v_{\text{ск}}$  контртела определяется:  $v_{\text{ск}} = 1,2981 \cdot 10 \cdot n_1$ , где:  $n_1$  - об/мин - число оборотов на двигателе.

Предлагаемая установка позволяет парам трения работать как в режиме одностороннего движения, так и в режиме реверсивного движения. Для этого нужно только перемещать диполи питания двигателя.

3. Анализ погрешности установки: При расчете погрешности установки использовалась формула вида:

$$\Delta f = \sum_{i=1}^k \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \quad (1.7.)$$

4. Для исследования автоколебаний, которые сопровождают режим трения и влияют на измеряемый коэффициент трения на установке была построена схема замещения установки (см. рис. 3).

Исследовалась частотная характеристика измерителя и определено время затухания переходного процесса. Проведен анализ установки по времени переходного процесса и частотным характеристикам (см. рис. 4 а, б, в).

Четвертая глава посвящена математическому и физическому моделированию процесса трения в испытуемых парах исходя из полученных экспериментальных данных, исследованию трущихся поверхностей образцов на профилографе-профилометре и на микроскопе и спектральному анализу состава поверхностного слоя поверхностей контртел.

С помощью пакета прикладных программ "Планирование, регрессия и анализ моделей" (ППП ПРИАМ) были получены математические модели процесса трения  $M_{\text{кУ}} = \Phi(N, v, \text{СМ})$  для испытуемых пар материалов и смазок. Проведен анализ качества каждой полученной модели (адекватность, информативность, описывающие и предсказывающие

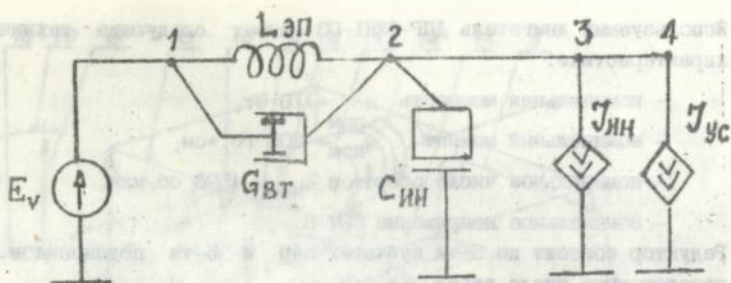


Рис. 3 .Схема замещения установки/общий вид/.

Обозначения:

$E_v$  - источник скорости ;

$L_{эп}$  -податливость электрической пружины;

$G_{вт}$  -демпфирование колебаний рамки ;

$C_{ин}$  -масса рамки ;

$J_{ин}$  -сила, момент инерции ;

$J_{ус}$  -сила усиления.

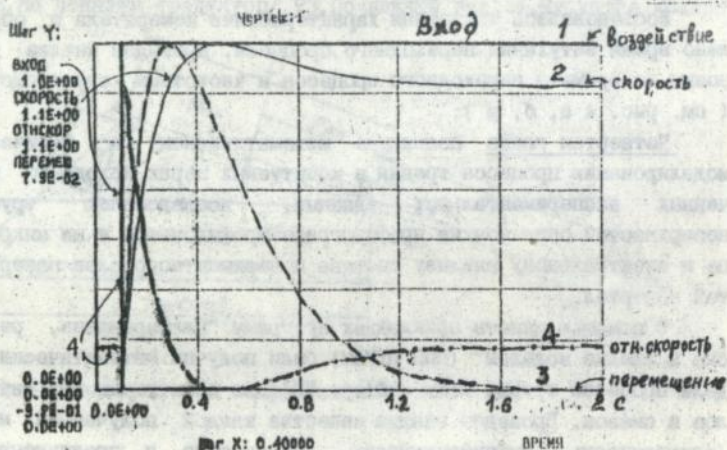


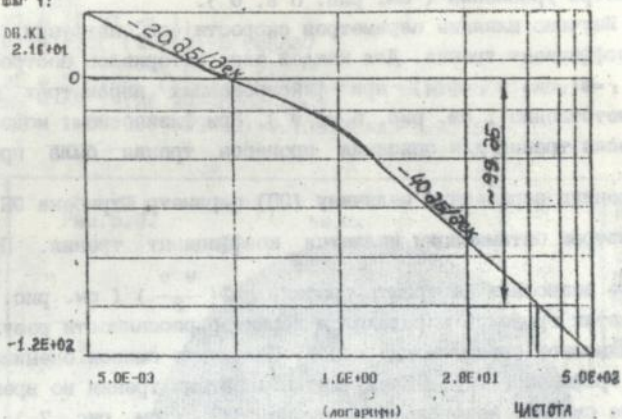
Рис. 4.а .Временные характеристики установки.

4. а)

Шар Y:

DB.K1  
2.1E+01

Чертеж: 1



4. б)

Шар Y:

PH.K1  
1.3E+01

Чертеж: 1

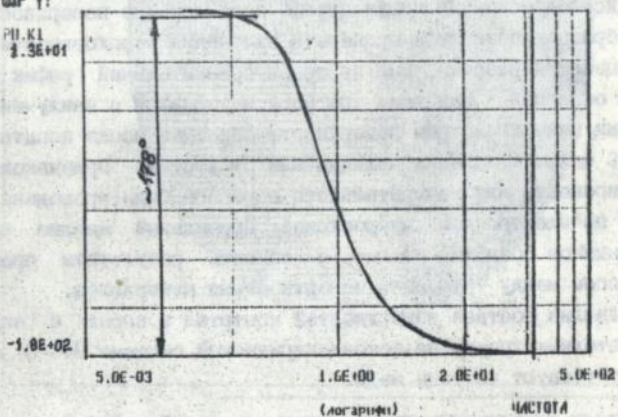


Рис. 4. а Фазочастотная характеристика установки

Рис. 4. б Амплитудно-частотная характеристика  
установки

свойства), получен расчет оценок коэффициентов регрессии и их статистических характеристик, построены графики взаимодействий параметров уравнений регрессии и графики по доли участия каждого параметра уравнения ( см. рис. 5 а, б ).

Изучено влияние параметров скорости  $v_{ск}$ , нагрузки  $n$ , смазки на коэффициент трения. Для каждой пары материалов построены графики  $\tau = \Phi(v_{ск})$  и  $\tau = \Phi(n)$  при фиксированных параметрах  $n$  и  $v_{ск}$  соответственно ( см. рис. 5 в, г ). При физическом моделировании процесса трения для описания процесса трения была принята за

обобщенную переменную величину (ОП) параметр Штрибека  $OP = \frac{v \cdot \eta}{P}$ . Параметром оптимизации является коэффициент трения. Полученные

данные позволили построить графики  $\tau = \Phi\left(\frac{v \cdot \eta}{P}\right)$  ( см. рис. 6 ). По виду этих графиков определялся характер рассеяности результатов и сравнивались смазки между собой. Поведение смазок оценивалось по виду графиков  $\tau = \Phi(L)$ . Наилучшие показатели трения во времени показала смазка, которая обозначена СВЗ ( см. рис. 7 ). Проведен опыт с технической смазкой цистим 221 для сравнения с имеющимися смазками СУ1, СУ2 и СУ3 ( см. рис. 7 ).

Исследования на профилографе-профилометре поверхностей трения образцов позволили проверить изменения шероховатости образцов в процессе наработки. Был построен сравнительный график шероховатости образцов и выделены три пары материалов с наилучшими параметрами микрогеометрии поверхности образцов после испытания.

С целью выявления наличия или отсутствия признаков явления безыаносности или избирательного переноса были проведены исследования на электронном микроскопе. Проведенный анализ полученных фотоснимков позволил оценить и описать результаты происходящих процессов между трущимися поверхностями материалов.

Анализ состава поверхностей контрол в парах с наилучшим показателем трения на фотоэлектрической системе МФС-8 показывал что отсутствуют частицы меди.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

I. Проанализированы существующие машины трения и определены основные требования для создания установки, которая должна рабо-

Рис. 5а). Цель: МОДЕЛЬ Пара :Контртело:БрАж9-4,Образец:14Х17Н2.

Получена модель:

$$Y = 0.0604568 - 0.0195432z_1 - 0.0165137x_3 - 0.0135464x_1x_2x_3 + 0.008751x_1x_3 + 0.00784617x_2x_3 + 0.00978386z_1x_2x_3 - 0.00438686x_2$$

где:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1( X_1 - 1 ); \\ z_1 &= 1.5( (x_1 \cdot x_2) - 0.666667 ); \\ x_2 &= 0.515464( X_2 - 8 ); \\ z_2 &= 2.0195( (x_2 \cdot x_2) + 0.253448 \cdot x_2 - 0.570305 ); \\ x_3 &= 68.1819( X_3 - 0.0456667 ); \\ z_3 &= 1.69199( (x_3 \cdot x_2) + 0.135135 \cdot x_3 - 0.61157 ); \end{aligned}$$

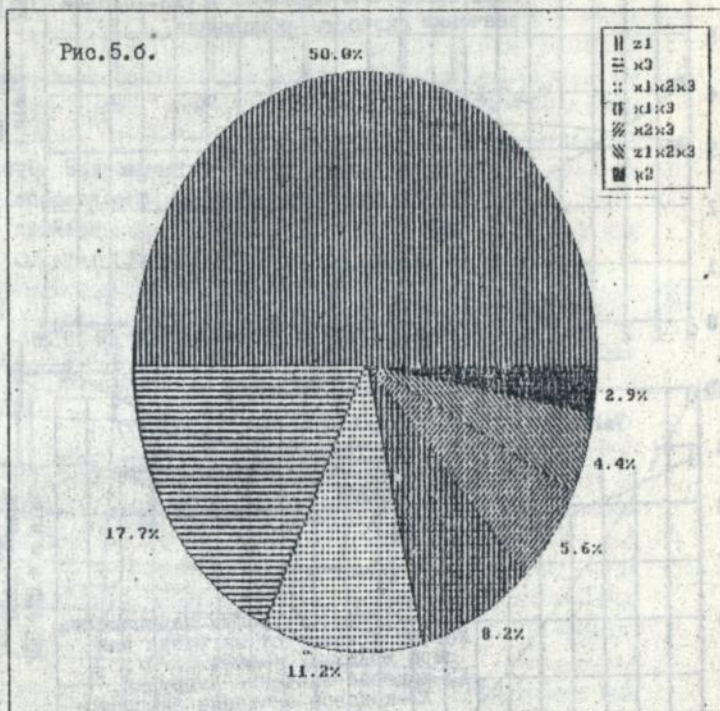
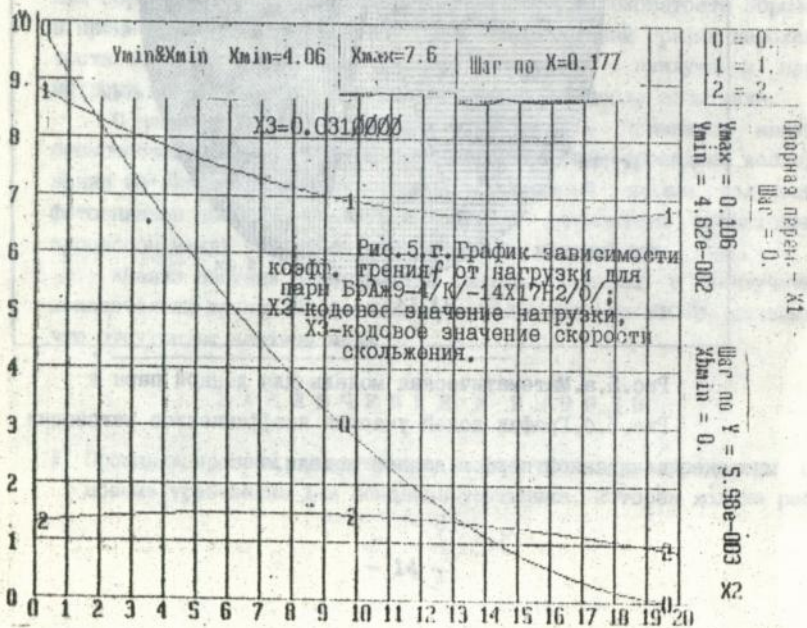
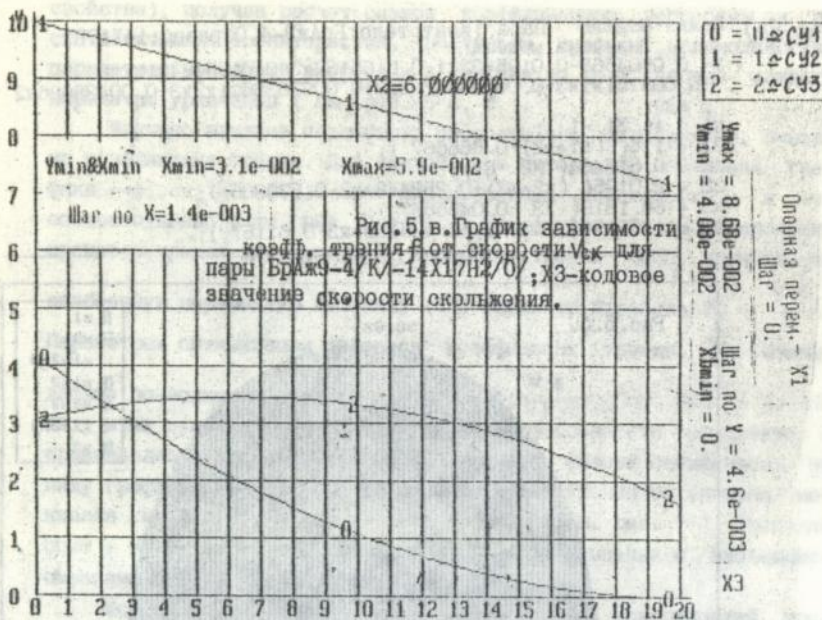


Рис. 5.а. Математическая модель для данной пары в

Рис. 5.б. График долей участия коэффициентов регрессии для данной пары в данной модели.



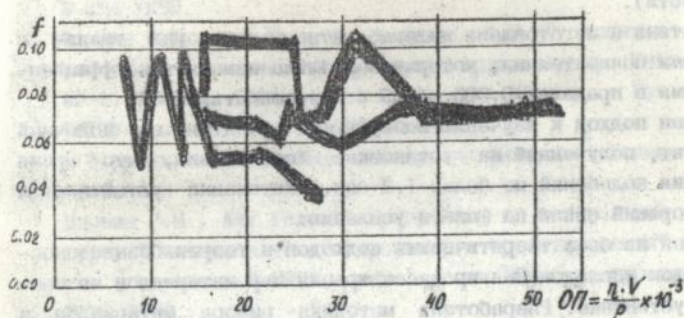


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от обобщенного параметра Штрибека ОП на примере пары БрАж9-4 /К/ - 40Х18Н2М. Смазки: СУ1/0/, СУ2/Δ/, СУ3 /+/.

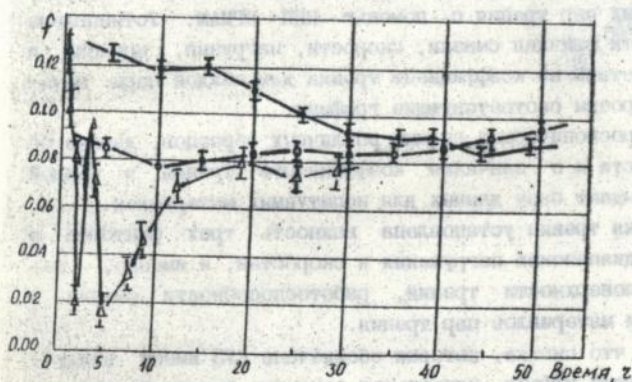


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от времени испытания на примере пары 14Х17Н2/К/ - БрАж9-4/0/ при нагрузке 6.93Н.

Смазка СУ3:  $V_{СК} = 0.059 \text{ /I/}$  и  $V_{СК} = 0.047 \text{ м/с/I/}$ .

Смазка Цитатим 221/Δ/ при  $V_{СК} = 0.059 \text{ м/с}$ .

тать в режиме наименьшего трения (в особенности в режиме безизносности).

2. Разработана и изготовлена малогабаритная установка трения с надежными показателями, которая позволила измерить коэффициент трения в пределах 0.005 - 0.5 с погрешностью 1.6%. Предложен подход к изучению возмущающих эффектов на конечный результат, полученный на установке. Установлено, что время затухания колебаний не более 1.3 сек. Установка устойчива и имеет хороший запас по фазе и усилению.
3. Предложен на базе теоритических подходов к теории безизносности порядок исследования процесса трения пар материалов на созданной установке. Разработана методика выбора материалов и смазок после их испытаний на трение.
4. Предложены три новые смазки, которые были заказаны в организации "МАСМА" с требованиями обеспечить необходимые условия для появления эффекта безизносности и с расчетом на то, что появится избирательный перенос.
5. Получены математические модели процесса трения  $M, U_f = \Phi(SM, v, n)$  для испытуемых пар трения с помощью ППП ПРИАМ. Установлены закономерности влияния смазки, скорости, нагрузки, времени и их взаимодействий на коэффициент трения для каждой пары материалов. Построены соответствующие графики.
6. Получены микроскопические снимки различных образцов, давшие об их шероховатости и о значения коэффициента трения в каждой паре, что создает базу данных для испытуемых материалов.
7. Для уменьшения трения установлена важность трех факторов в исследуемых диапазонах нагружения и скоростей, а именно, шероховатости поверхности трения, работоспособности смазки и совместимости материалов пар трения.
8. Установлено, что смазка, которая обозначена СУЗ имеет наилучший экранирующий эффект, наименьшее значение трения во времени и ряд других показателей трения, что позволяет рекомендовать ее для дальнейших исследований при более нагруженных и скоростных режимах испытаний а также при низких температурах.

Публикации по материалам диссертационной работы

1. Вдовин Р.М., Аит Уали Б. Установка для измерения малых значений коэффициента трения. Киев. политехн. ин-т. - Киев, 1992. - 5с.

Библиогр.: 4 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБУкр от 05.03.92, № 294-Ук92.

2. Вдовин Р.М., Аит Уали Б., Овдиенко О.Н. О влиянии пластичных смазок на состояние поверхностей трущихся пар. Киев. политехн. ин-т. - Киев, 1992. - 7с. Библиогр.: 4 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБУкр от 05.03.92, № 295-Ук92.

В рамках индивидуальной нагрузки были составлены методические указания :

Вдовин Р.М., Аит Уали Б. Программа и контрольные работы по курсу "Системы автоматизированного проектирования" для студентов и слушателей МИПК специальности "Приборостроение". - Киев.: КПИ, 1992. - 44с. - Рус.

*Вдовин*







KIII 29.04.94.3am.252-100.

278056

AB 30.149