

УДК 621.891

UDC 621.891

05.00.00. Технические науки

Technical Sciences and Engineering

**МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ  
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА  
ТРЕНИЯ В ТРИБОСИСТЕМЕ И  
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ В ЛАБОРАТОРНЫХ  
УСЛОВИЯХ****MULTIPLE FACTOR ANALYSIS OF DYNAMIC  
FRICTION COEFFICIENT OF FRICTION  
UNITS IN TRIBOSYSTEM AND TRIBOUNITS  
UNDER LABORATORY CONDITIONS**

Красин Петр Сергеевич  
аспирант

*Кубанский государственный технологический  
университет, г. Краснодар, Россия*

Krasin Petr Sergeevich  
postgraduate student

*Kuban State Technological University, Krasnodar,  
Russia*

Рассмотрен вопрос многофакторного анализа закономерности изменения динамического коэффициента трения в трибосистеме и трибосопряжениях в лабораторных условиях. В качестве трибосистемы выступает модельный ленточно-колодочный тормоз с режимными параметрами усилия на рукоятке управления тормозом и работы торможения. С применением метода математического планирования экстремальных экспериментов получены функциональные зависимости динамического коэффициента трения от варьируемых параметров в виде полиномов второго порядка, адекватно описывающие исследуемые процессы. На микро- и наноразмерах рассмотрено эталонное изменение динамического коэффициента трения пары «Ретинакс ФК-24А–сталь 35ХНЛ» в функции от поверхностной температуры, величина которой отвечает определенным законам с учетом возрастающей и ниспадающей характеристик динамического коэффициента трения. Оценка последнего произведена по принципу суперпозиции с использованием многофакторного анализа параметров следующих процессов: вынужденного охлаждения и нагревания; поляризационных и деполяризационных на пятнах контактов микровыступов пары трения; формирования типа контактов микровыступов в зависимости от работы выхода электронов и ионов из их материалов; образования первичных и вторичных структур на поверхностях фрикционного взаимодействия; разрушения и восстановления пленок на поверхностях и т.д. Проанализированы результаты исследований на макро-, микро- и наноразмерах изменения динамического коэффициента трения и выделены основные факторы, влияющие на его величины

We have illustrated multiple factor analysis of the dynamic friction coefficient of the friction units in tribosystem and tribounits under laboratory conditions. As the tribosystem we had a model band-block brake with regime parameters of the control handle tension of the brake and brake work. By using the method of the mathematical planning of the extreme experiments, we have obtained functional dependence of the dynamic friction coefficient of the variable parameters in the form of a second-order polynomial, which adequately describe the processes under study. As tribounit at the micro- and nanoscale there was the reference change of the dynamic friction coefficient of the pair "Retinax FC-24A – Steel 35HNL" as a function of surface temperature, the values of which correspond to certain laws, based on the rise and fall of the characteristics of the dynamic friction coefficient. We have made the evaluation of the dynamic friction coefficient on the principle of the superposition with the multiple factor analysis of the following parameters: the process of forced cooling and heating; the processes of the polarization and depolarization in the contact patch of the micropoints of friction pairs; the type of the contacts of the micropoints depending on the work function of the electrons and ions from materials; the formation of primary and secondary structures on the surfaces of frictional contact; the destruction and restoration of the pellicles on surfaces, etc. We have analyzed the results of the studies of changes of the dynamic friction coefficient on the macro-, micro- and nanoscale and we have found the basic factors affecting its value

Ключевые слова: ТРИБОСИСТЕМА,  
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЕ, ПАРА ТРЕНИЯ,  
ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫЙ ТОРМОЗ,  
ДИНАМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ,  
МЕТОД ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ  
ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Keywords: TRIBOSYSTEM, TRIBOUNITS,  
FRICTION PAIR, BAND-BLOCK BRAKE,  
DYNAMIC FRICTION COEFFICIENT, METHOD  
OF MATHEMATICAL PLANNING OF EXTREME  
EXPERIMENTS

**Введение.** Фрикционные свойства пары трения зависят в равной мере от природы ее материалов, от конструкции узла трения и режима его работы. Наличие большого количества факторов, возникающих при электротермомеханическом трении в едином поле взаимодействия, приводит к необходимости проведения многочисленных экспериментов применительно к парам трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. Это обстоятельство послужило причиной поиска путей получения надежной информации о ресурсе узлов трения за более короткие сроки и, по возможности, на меньшем количестве испытуемых образцов. В этом смысле теория планирования экстремальных экспериментов занимает важное место [1].

**Состояние проблемы.** Величина динамического коэффициента трения в трибосопряжениях фрикционных узлов ленточно-колодочного тормоза при электротермомеханическом трении носит импульсный характер. Это связано с импульсным подводом нормальных усилий к пятнам контактов микровыступов пар трения тормоза и возникновением на их номинальных сопряженных поверхностях импульсных сил трения.

Динамический коэффициент трения в трибосистеме и в трибосопряжении необходимо оценивать на макро- микро- и наноуровнях. На макроуровне необходимо поэтапно определить влияние основных режимных факторов (нагрузку на рукоятке управления тормозом ( $F_p$ ) и работу торможения ( $W$ )). На микро- и наноуровнях необходимо установить тип контакта, работу выхода электронов и ионов из материалов трущихся деталей, оценить: поляризационные и деполяризационные процессы, генерируемую и аккумулируемую энергии, соответственно, электрических и тепловых токов, а также влияние тепловой нагруженности номинальных площадей контакта на динамический коэффициент трения в трибосопряжении. Для детального исследования на макроуровне закономерностей изменения динамического коэффициента трения в

трибосистеме предлагается его рассмотрение на четырех этапах (подблоках).

**Постановка задачи.** В данной публикации рассмотрены следующие вопросы освещаемой проблемы:

- конструкция и работа модельного ленточно-колодочного тормоза;
- проверка адекватности модели трибосистемы;
- оценка энергонагруженности дискретных контактов металлополимерных пар трения трибосопряжения.

**Цель работы.** Оценить закономерности изменения динамических коэффициентов трения под воздействием внешних и внутренних факторов в трибосистеме и трибосопряжении в лабораторных условиях.

**Конструкция и работа модельного ленточно-колодочного тормоза.** Основные узлы тормозного стенда смонтированы на двух двутавровых балках 4 (рис. 1 *а, б, в*), которые, в свою очередь, анкерными болтами прикреплены к бетонному основанию. Модельный тормоз имеет тормозную ленту 2. При этом один конец тормозной ленты 2 закреплен неподвижно, а на втором ее конце находится нагрузочное устройство 11. С нерабочими поверхностями полимерных накладок 3 взаимодействует внутренняя поверхность ленты 2. Накладки 3 крепятся к ленте 2. Тормозной шкив 4 установлен на валу 5 с подшипниками, находящимися в опорах 6. Вал 5 через упругую пальцевую муфту 10 связан с валом 12 двигателя 7 постоянного тока. При этом использован двигатель постоянного тока марки 2ПН225МУ4 мощностью 15,0 кВт. Применение двигателя этой марки позволило плавно регулировать вращательный момент на приводном валу 12 и поддерживать его стабильным при изменении частоты вращения вала 5. Усилие прижатия нерабочих и рабочих поверхностей фрикционных накладок 3, соответственно, к внутренней поверхности тормозной ленты 2 и рабочей поверхности тормозного шкива 4 регулировалось нагрузочным устройством 11.

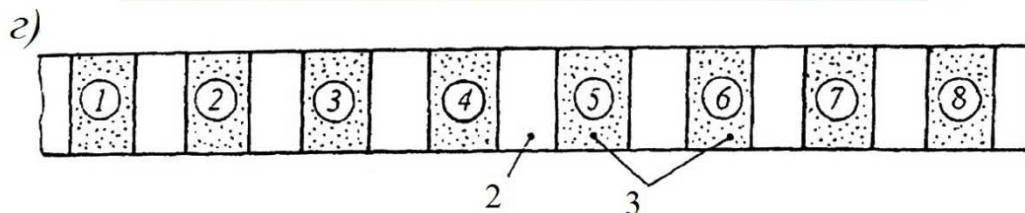
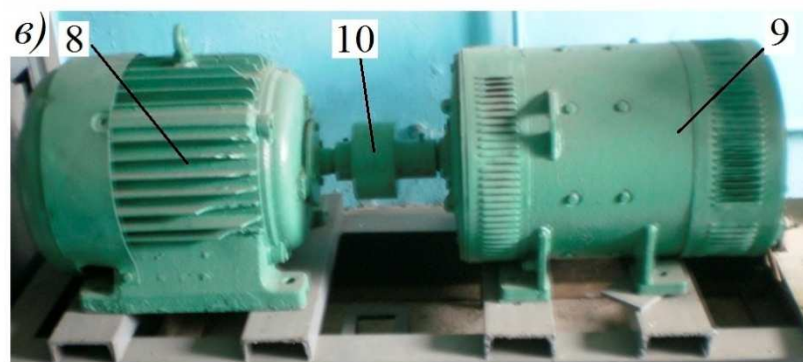
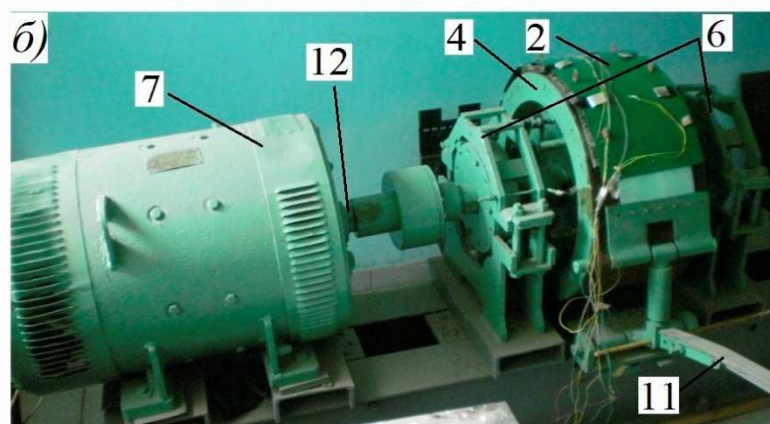
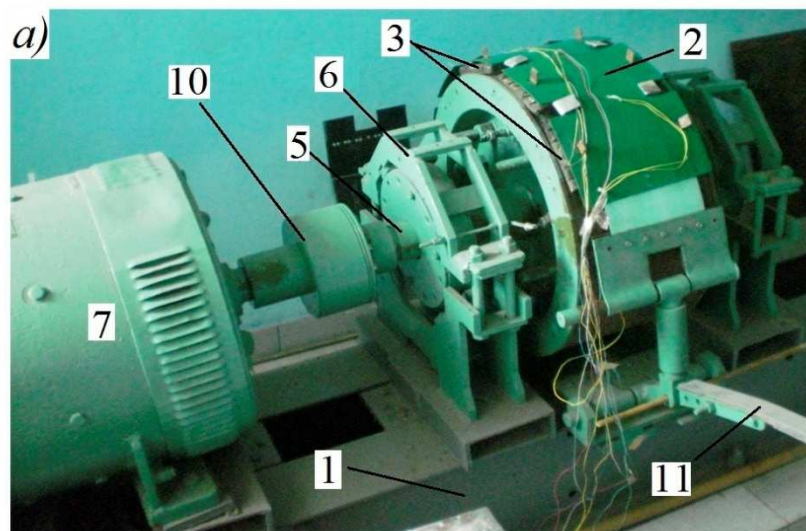


Рисунок 1 а, б, в, г – Общий вид стенда с модельным ленточно-колодочным тормозом (а), нагрузочным устройством (б), двигателем постоянного и переменного тока (в) и тормозной лентой с фрикционными накладками (г)

Тяговый двигатель 7 тормозного шкива 4 питается постоянным током с номинальным напряжением обмотки якоря 110 В. В качестве источника ее питания был использован аналогичный двигатель постоянного тока 8, который работал в генераторном режиме. Вал 10 генератора вращался асинхронным трехфазным двигателем переменного тока 9. На обмотки возбуждения генератора и двигателя подавались постоянные токи, которые предварительно выпрямлялись на диодных мостах, составленных из диодов VD1...VD4 и VD5...VD8, и регулировались лабораторными автотрансформаторами ЛАТР-1М и ЛАТР-2М.

По дуге обхвата тормозной лентой шкива устанавливаются фрикционные накладки с постоянным и переменным шагом. При монтаже на ленте накладок с постоянным шагом их количество всегда четное (12; 16; 18; 20; 22; 26) (см. рис. 1 г). При переменном шаге это число может быть и нечетным.

Общее количество фрикционных накладок на тормозной ленте зависит от их геометрических параметров, а также от угла охвата тормозной лентой рабочей поверхности тормозного шкива.

В табл. 1 приведены основные конструктивные параметры пар трения модельного ленточно-колодочного тормоза.

Задачи исследования, условия проведения испытаний и реальные возможности определили объект испытаний - физическую модель ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки с масштабom:

- геометрического подобия для ее основного размерного параметра - радиуса тормозного шкива

$$m_l = \frac{l_H}{l_m}, \quad (1)$$

$m_l=2,0, 2,45$  и  $2,9$  для  $R_m=500,0, 612,5$  и  $725,0$  мм, соответственно,

где  $l_H$  и  $l_M$  - радиусы тормозного шкива натуре и модели ( $l_H = R_{ш}$ ,  $l_M = 250,0$  мм);

Таблица 1 – Конструктивные параметры и теплофизические свойства материалов основных элементов модельного ленточно-колодочного тормоза

<b>Тормозная лента</b>	
материал.....	сталь 50
модуль упругости, МПа.....	$2 \cdot 10^5$
коэффициент Пуассона, $\nu$ .....	0,30
толщина, мм.....	5,0
ширина, мм.....	220,0
дуга охвата тормозного шкива, град.....	270,0
<b>Фрикционная накладка</b>	
материал.....	ретинакс марки ФК-24А
удельный вес, $\cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup> .....	2,3
теплоемкость, кДж/(кг $\cdot$ °С).....	1,02
теплопроводность, Вт/(м $\cdot$ °С).....	0,75
температуропроводность, $\cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с.....	0,32
твердость, Н/мм <sup>2</sup> .....	470,0
модуль упругости $E_n$ , МПа.....	$6,9 \cdot 10^3$
коэффициент Пуассона, $\nu_n$ .....	0,37
длина, мм.....	120,0
ширина, мм.....	230,0
толщина, мм.....	30,0
количество накладок на дуге охвата ленты .....	8
угол охвата накладкой шкива, град.....	6,75
угол между накладками, град.....	2,207
<b>Тормозной шкив</b>	
Радиус рабочей поверхности $R_{ш}$ , мм.....	250,0
материал.....	сталь 20
удельный вес, кг/м <sup>3</sup> $\cdot 10^{-3}$ .....	7,8
теплоемкость, кДж/(кг $\cdot$ °С).....	0,5
теплопроводность, Вт/(м $\cdot$ °С).....	45,4
температуропроводность, $\cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с.....	10,3
твердость, Н/мм <sup>2</sup> .....	4300,0

- динамического сходства

$$m_s = \frac{S_H}{S_M} = \frac{160}{8} = 20,0,$$

где  $S_H$  и  $S_M$  - силы натяжения набегающих участков тормозной ленты природы и модели, кН.

Заметим, что масштабы сходства изменяются, если изменяются динамические параметры природы или модели, например, натяжения ленты.

Для проведения испытаний модель оснащалась:

- тормозными лентами из стали 50 шириной 200 мм ( $m_s = \frac{220}{200} = 1,1$ ), толщиной  $\delta_m = 2,0, 3,0$  и  $3,7$  мм ( $m_\delta = 2,0, 1,67$  и  $1,62$  при толщине ленты природы  $4,0, 5,0$  и  $6,0$  мм, соответственно), с длиной промежутка  $2L$  участка ленты между накладками ( $L=30-90$  мм,  $m_L=1,0$ );

- фрикционными накладками из ретинакса ФК-24А толщиной  $\delta_H = 15,0$  мм ( $m_H = \frac{30}{15} = 2,0$ ), шириной  $Z=230,0$  мм ( $m_Z = \frac{230}{230} = 1,0$ ) и длиной  $L=120,0$  мм ( $m_L = \frac{120}{120} = 1,0$ );

- тормозной шкив вращался с наибольшей частотой  $200,0$  мин<sup>-1</sup>, которая обеспечивала линейную скорость перемещения точек поверхности

трения шкива относительно накладок  $V_{ш}=5,236$  м/с ( $m_V = \frac{V_H}{V_{ш}} = 3,82$  при  $V_H=20,0$  м/с; для каждого конкретного значения скорости тормозных шкивов натуральных тормозов буровых лебедок  $m_V$  уточняется).

**Проверка адекватности модели трибосистемы.** В практике машиностроения широко применяется проведение поэтапных испытаний [2]. Лабораторные испытания позволяют полностью выявить влияние конструктивных особенностей и ряда других характеристик узла трения на его изнoso-фрикционные свойства. В связи с этим проведены стендовые испытания пар трения модельного ленточно-колодочного тормоза,

отвечающего серийным фрикционным узлам. Приведем результаты исследований влияния основных режимных факторов (нагрузки на рукоятке управления тормоза ( $F_p$ ) и работы торможения ( $W$ )) на динамический коэффициент трения ( $f$ ). В качестве материалов пары трения были выбраны «ФК-24А – сталь 35ХНЛ». Значения натуральных и кодовых уровней факторов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Натуральные значения уровней факторов

Уровни факторов	Кодовые значения		Подблоки							
			I-ый		II-ой		III-ий		IV-ый	
			$F_p$ , Н	$W$ , кДж	$F_p$ , Н	$W$ , кДж	$F_p$ , Н	$W$ , кДж	$F_p$ , Н	$W$ , кДж
Основной уровень	0	0	250	7,355	350	20,775	450	41,775	550	70,275
Интервал варьирования	1	1	50	4,815	50	8,575	50	12,375	50	16,125
Верхний уровень	+1	+1	300	12,150	400	29,400	500	54,150	600	86,400
Нижний уровень	-1	-1	200	2,520	300	12,150	400	29,400	500	54,150
«Звездные точки»	+R	+R	300	12,150	400	29,400	500	54,150	600	86,400
«Звездные точки»	-R	-R	200	2,520	300	12,150	400	29,400	500	54,150

Согласно принятому плану полного факторного эксперимента должно быть проведено 9 опытов, каждый из которых должен повторяться трижды в случайном порядке для исключения систематических ошибок. Для получения математической модели объекта был использован метод группового учета аргументов, основанный на некоторых принципах теории обучения и самоорганизации. Рассмотрены различные сочетания входных и промежуточных переменных, для каждого сочетания строится модель, причем при построении рядов селекции используются самые регулярные переменные.

Ряды строятся до тех пор, пока снижается ошибка. Таким образом, из всей совокупности моделей выбирается та, которая является оптимальной



с точки зрения выбранного критерия [3].

Согласно плану эксперимента в каждом подблоке было проведено 9 опытов. Для уменьшения систематических погрешностей опыты повторены трижды в случайном порядке. На основании экспериментальных данных рассчитано среднее значение выходного параметра  $y$  (динамический коэффициент трения).

Матрицы плана и результаты опытов представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Матрица плана и результаты опытов

№ опыта	Матрица плана		Результаты опытов по подблокам, $y$			
	$x_1$	$x_2$	I	II	III	IV
1	-1	-1	0,284	0,301	0,323	0,330
2	+1	-1	0,314	0,308	0,331	0,320
3	-1	+1	0,277	0,279	0,307	0,304
4	+1	+1	0,323	0,332	0,326	0,280
5	+R	0	0,252	0,309	0,308	0,345
6	-R	0	0,280	0,323	0,307	0,335
7	0	+R	0,282	0,267	0,298	0,314
8	0	-R	0,285	0,284	0,290	0,300
9	0	0	0,258	0,286	0,272	0,340

После обработки результатов экспериментов, выполненных с помощью компьютерных технологий, получены следующие модели объекта для каждого подблока:

$$y_1 = 0,65 - 2,627 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 2,365 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 + 1,642 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2 + 5,333 \cdot 10^{-6} \cdot x_1^2 + 1,33 \cdot 10^{-9} x_2^2; \quad (2)$$

$$y_2 = 1,823 - 8,707 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 3,572 \cdot 10^{-6} \cdot x_2 + 2,667 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,187 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 - 1,456 \cdot 10^{-10} x_2^2; \quad (3)$$

$$y_3 = 2,973 - 0,011 \cdot x_1 - 1,136 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 + 4,444 \cdot 10^{-9} \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,213 \cdot 10^{-5} \cdot x_1^2 + 1,099 \cdot 10^{-10} x_2^2; \quad (4)$$

$$y_4 = 0,884 - 1,958 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 1,202 \cdot 10^{-7} \cdot x_2 + 1,446 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2 + 8,023 \cdot 10^{-7} \cdot x_1^2 - 5,508 \cdot 10^{-11} x_2^2. \quad (5)$$

Полученные математические модели для наглядности дальнейшего анализа можно представить графически в виде поверхности отклика. Так

как число факторов равно двум, полученные математические модели представляются поверхностью в трехмерном пространстве. По координатным осям откладываем факторы  $F_p$  и  $W$  и выходную функцию  $f$ .

Анализ полученных математических моделей по I подблоку (рис. 2 а) показывает, что на начальных глубинах спуска бурильного инструмента в скважину динамический коэффициент трения при прирабатываемых рабочих поверхностях фрикционных накладок с плавным увеличением нагрузки на рычаг управления тормозом и работы торможения увеличивается и проходит через минимум. Это объясняется увеличением площади пятен контактов микровыступов пар трения, а также тем, что на начальных глубинах спуска температура на рабочих поверхностях тормозного шкива увеличивается, но еще не достигает допустимой температуры для материалов фрикционной накладки.

При оценке адекватности математической модели II подблока установлено, что характер нагрузки на рукоятке управления тормозом и работа торможения влияют на величину динамического коэффициента трения в пределах выбранного режима. Количественно больше влияет на выходной параметр нагрузка, прикладываемая бурильщиком. Сначала динамический коэффициент трения уменьшается, а затем возрастает, проходя через минимум (рис. 2 б). Поверхность отклика представляет собой эллиптический параболоид.

Характер влияния режимных параметров на динамический коэффициент трения по III подблоку представлен на рис. 2 в. Поверхность отклика имеет седлообразную форму. С увеличением нагрузки на рукоятке управления тормозом динамический коэффициент трения сначала уменьшается, затем возрастает. Работа торможения действует двояко. При меньших нагрузках с увеличением работы торможения выходная функции уменьшается, при больших нагрузках – увеличивается.

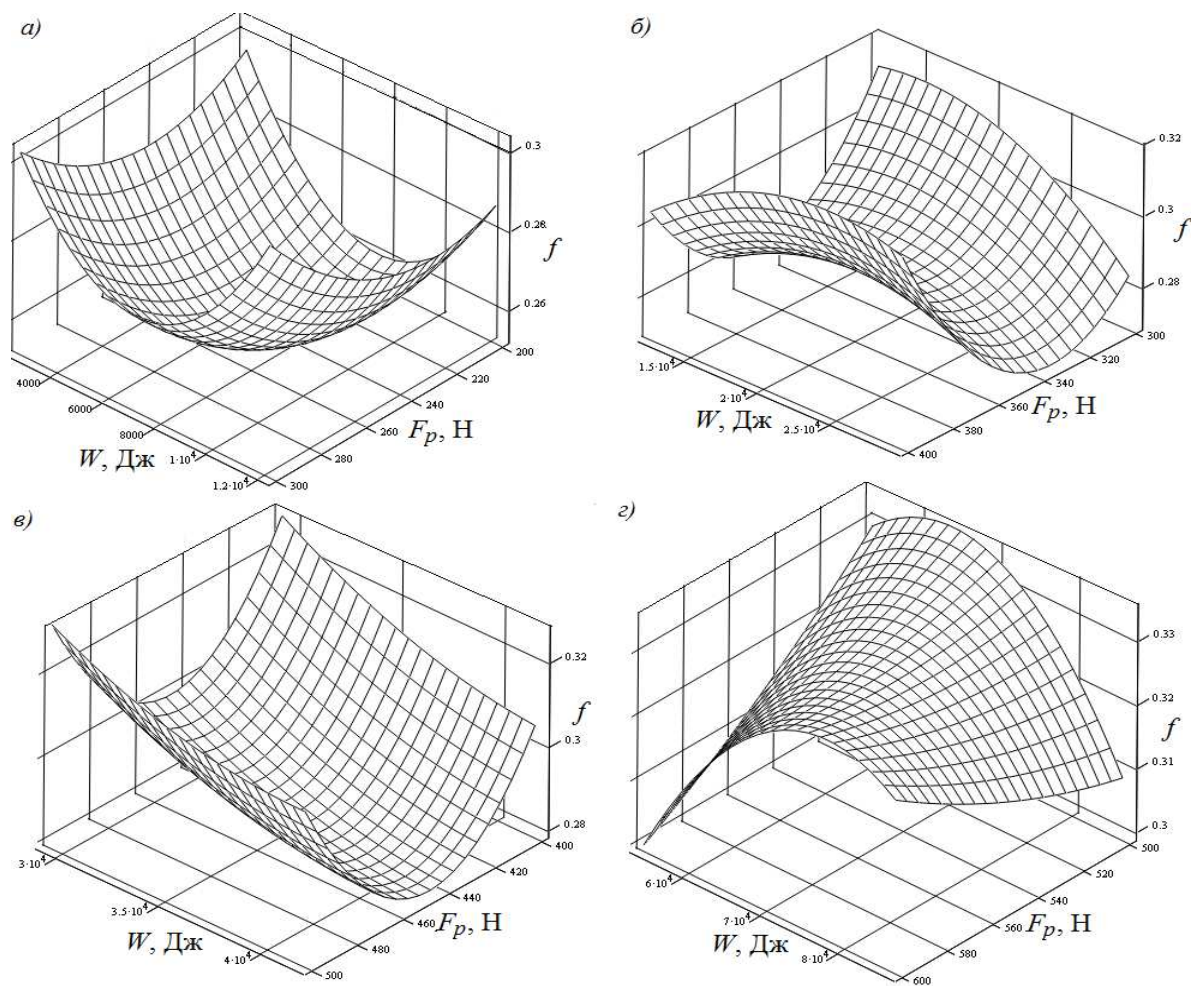


Рисунок 2 – Закономерности изменения динамического коэффициента трения от нагрузки на рычаге управления тормозом и работы торможения на различных этапах исследования (подблоках): а – I-ый; б – II-ой; в – III-ий; г – IV-ый

Зависимость функции отклика от режимных факторов (нагрузки на рукоятке и работы торможения) по IV подблоку представлена на рис. 2 г. Как видно из последнего получили криволинейную поверхность отклика. С резким изменением (уменьшением или увеличением) работы торможения динамический коэффициент трения стремительно уменьшается, проходя через минимум по краям экспериментов, в центре эксперимента он резко возрастает. Это свидетельствует о том, что рабочая поверхность фрикционной накладки попала в зону допустимой температуры для ее материала. На этом этапе необходимый тормозной момент создается за счет увеличения нагрузки на рукоятке управления тормозом. При этом динамический коэффициент трения незначительно увеличивается, что приводит к росту тормозного момента.

Полученные математические модели позволяют оценить влияние факторов на динамический коэффициент трения и их взаимодействие, адекватно воспроизводят исследуемый процесс трения при торможении. Их погрешность по данным исходной выборки находится в допустимых пределах 7,5 %, [4], поэтому они могут быть использованы при анализе и синтезе фрикционных узлов и подборе новых материалов трибосопряжения.

**Оценка энергонагруженности дискретных контактов металлополимерных пар трения трибосопряжения.** Оценка внешних параметров трибосистемы позволила перейти к рассмотрению энергонагруженности дискретного контакта микровыступов металлополимерных пар трения трибосопряжения (табл. 4). За основу принято эталонное изменение динамического коэффициента трения материала «Ретинакс» ФК-24А в функции температуры поверхности трения при фрикционном взаимодействии (рис. 3). При этом учитывается процентное соотношение компонентов газовой смеси, образуемой в межконтактном пространстве при трении фрикционной пары (табл. 5) [5].

Таблица 4 – Энергонагруженность дискретного контакта микровыступов металлополимерных пар трения трибосистем

Состояние поверхностного и подповерхностного слоя накладки		Описание характеристик фрикционного взаимодействия:				
		Состояние межконтактной среды	Наличие двойных электрических слоев	Циркуляция токов		
				электрических	тепловых	омывающей среды
		поверхностного и подповерхностного слоев металлополимерных пар трения				
1	2	3	4	5	6	7
Поверхностная температура	Ниже допустимой для материала фрикционной накладки	<p>При электротермомеханическом трении микровыступов металлополимерных пар трения под действием импульсных нормальных усилий на поверхностях пятен контактов различных типов генерируются импульсные электрические токи, прошивающие тончайшие окисные пленки и способствующие их разрушению. Под действием возрастающих импульсных удельных нагрузок происходит активная деформация микровыступов, т.е. поверхностных слоев полимерных накладок, и упрочнение пятен контактов металлического элемента трения. На этой стадии происходит подготовка поверхностных слоев к образованию достаточного количества активных центров, определяющих их последующее развитие вследствие ползучести металла. При этом имеет место инжектирующий контакт. При повышении температуры пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения трибосопряжения от 100 до 200 °С наблюдается увеличение среднего динамического коэффициента трения (от 0,39 до 0,42) [рис. 3]. При этом электрические поля в трибосопряжении ослабевают, а тепловые поля усиливаются. Характеристика фрикционной теплостойкости на этом участке определяется, в основном, упругопластическими свойствами материала (переход от упругого к пластическому контакту). На участке от 200 до 350 °С динамический коэффициент трения зависит от интенсивности развития пластических деформаций, возникает постепенное (по мере повышения температуры) дымление связующего (смолы) полимерного материала. Микроконтакты по энергетическим характеристикам приближаются к нейтральным.</p>	<p>Возникает двойной электрический слой, охватывающий выступы и впадины микронеровностей металлического элемента трения. При этом пятна контактов микровыступов выполняют функции термоэлектрогенератора, а приповерхностные слои полимерных накладок – термоэлектрохолодильников. Боковые поверхности микровыступов и их впадины являются накопителями зарядов, т.е. микроконденсаторами. Интенсивно проходят на</p>	<p>Ток электризации направлен от пятен контактов микровыступов полимерной накладки к пятнам контактов микровыступов металлического элемента трения.</p>	<p>Генерируемая электрическая энергия превращается в тепловую, тело металлического элемента трения и подповерхностные слои полимерных накладок нагреваются.</p>	<p>Микровыступы пар трения омываются воздухом окружающей среды</p>

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
		Количество поступившего на площадки пятен контактов микровыступов кислорода воздуха определяет интенсивность термоокислительных деструкционных процессов. Омывающий воздух является окислительной средой, способствующей развитию адсорбционного и щелевого эффектов в трибосопряжении.	пятнах контактов поляризационные процессы.			
Поверхностная температура	При достижении допустимой материалом полимерной накладки	<p>Электротермомеханическое трение протекает при повышенных и пониженных импульсных удельных нагрузках на пятнах контактов микровыступов трибосопряжения. При этом проявляются законы неустановившейся ползучести в условиях постоянного изменения (обычно уменьшения) термонапряжений в поверхностном слое металлического элемента трения (см. рис. 3, стадия III). На участке от 450 до 600 °С повышение динамического коэффициента трения объясняется образованием коксообразных продуктов деструкции связующего, что обуславливает формирование рабочего слоя. Последний способствует возникновению блокирующих контактов микровыступов трибосопряжения. При температурах 600...800 °С динамический коэффициент трения вновь стабилизируется и достигает значения 0,32 (см. рис. 3). Интенсифицируются деполяризационные процессы на пятнах контактов микровыступов трибосопряжения. Азот и углекислый газ (табл. 5) являются нейтральными средами, в которых адсорбционный и щелевой эффекты вырождаются. При этом наблюдается увеличение <math>H_2</math> до 0,171 % в массовых долях и появление CO (0,43 % в массовых долях).</p>	<p>Возникает и развивается двойной электрический слой с высоким потенциалом в приповерхностных слоях полимерных накладок и слабый двойной электрический слой на микровыступах металлического элемента трения из-за их нагревания. Приповерхностный слой накладки выполняет функции термоэлектрогенератора, а микровыступы металлического элемента трения – термоэлектрохолодильника.</p>	<p>Преобладает инверсия электрических токов от пятен контакта микровыступов металлического элемента трения в приповерхностные слои полимерных накладок. Слабая инверсия прямых токов обусловлена зарождением обратных токов.</p>	<p>На поверхности полимерной накладки возникают островки жидкости, являющейся электролитом. При этом начинается формирование сильного двойного электрического слоя на рабочей поверхности накладки.</p>	<p>Микровыступы пар трения омываются воздухом окружающей среды и компонентами деструкционных процессов, происходящих в подповерхностных слоях накладки.</p>

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
Поверхностная температура	При превышении допустимой материалом полимерной накладки	<p>Электротермомеханическое трение пятен контактов микровыступов трибосопряжения обусловлено ползучестью поверхностных слоев пары трения «полимер-металл». При этом с ростом температуры процесс развития физического контакта интенсифицируется и может переходить на другие энергетические уровни, меняя тем самым тип контакта. Физический контакт омического типа способен вызвать процессы релаксации внутренних термонапряжений в поверхностном слое металлического элемента трения за счет поверхностного пластического трения (см. рис. 3, стадия II). Динамический коэффициент трения стабилизируется и имеет минимальное значение (0,18) (см. рис. 3); данная зона является областью депрессии из-за протекающих в ней деполяризационных процессов. В этой зоне фрикционные характеристики целиком определяются смазывающим действием жидких продуктов деструкции связующего компонента (смолы). Наблюдается резкое уменьшение содержания CO<sub>2</sub> до 0,13 % в массовых долях и появление H<sub>2</sub> (0,13 % в массовых долях) [см. табл. 5].</p>	<p>Присутствует сильный двойной электрический слой, сформированный в приповерхностном слое полимерных накладок. Двойной электрический слой возле рабочей поверхности металлического элемента трения слабый. При этом металлический элемент трения выполняет функции термоэлектрогенератора, а приповерхностные слои накладок – термоэлектрохолодильников.</p>	<p>Преобладает инверсия электрических токов от рабочих поверхностей полимерных накладок в рабочую поверхность металлического элемента трения (обратный ток). В то же время наблюдаются слабые прямые токи.</p>	<p>Циркулирующие тепловые токи в элементах фрикционного узла способствуют термостабилизации состоянию обода.</p>	<p>Микровыступы трибосопряжения омываются компонентами выгоревших веществ с поверхностных и подповерхностных слоев полимерных накладок.</p>

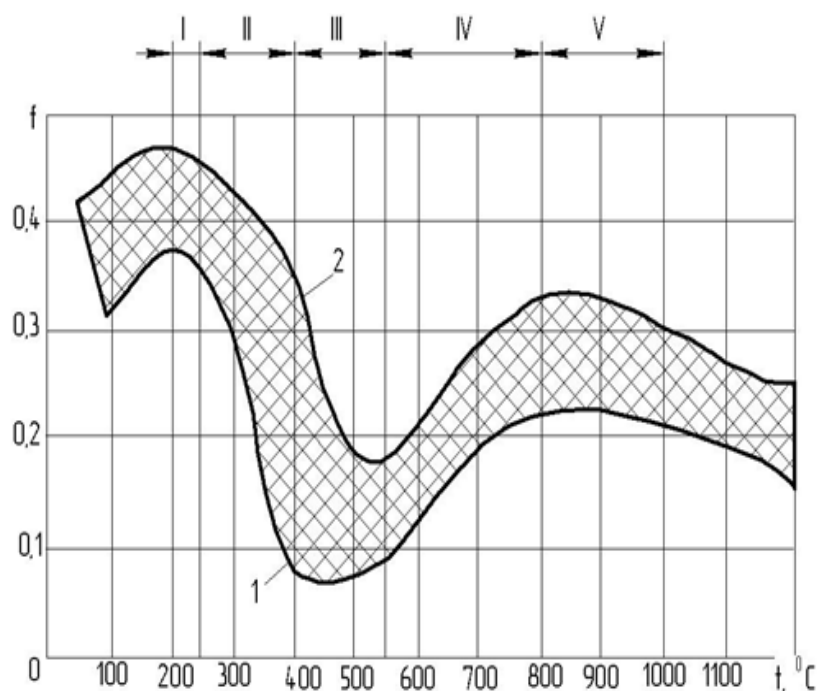


Рисунок 3 – Эталонное изменение динамического коэффициента трения материала «Ретинакс» ФК-24А в функции температуры поверхности трения по зонам: I – 200...250 °С; II – 250...400 °С; III – 400...550 °С; IV– 550...800 °С; V–800...1000 °С

Таблица 5 – Процентное соотношение компонентов газовой смеси, образованной в межконтактном пространстве при трении фрикционной пары [5]

Номер пробы	Фрикционный материал	Температура, °С	Содержание газа, мас. доля, %						
			H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	ΣC <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	другие газы***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	Остальное
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	
4**	-	500	0,171	16,3	81,6	0,24	0,43	0,24	
5	-	730	0,308	9,8	81,2	0,08	6,51	1,06	

**Примечание:**

\*Наличие следов указанных газов.

\*\*Отбор проб осуществлялся из четырех зон (точек) одновременно.

\*\*\*Под другими газами подразумевается: Ar, Ne, He, Kr, N<sub>2</sub>O, Xe, O<sub>2</sub>, Rn

Выполнен анализ и синтез закономерностей изменения динамического коэффициента трения на макро-, микро- и наноуровнях в трибосистеме и в ее трибосопряжениях.



**Выводы.** Выполнен многофакторный анализ закономерностей изменения основной характеристики трибосопряжений – динамического коэффициента трения, влияющего на импульсные тормозные моменты, развивающиеся в трибосистеме, которой является ленточно-колодочный тормоз буровой лебедки.

#### Список литературы

1. Джанахмедов А.Х. Физико-стохастическое трибомоделирование / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм. – 151 с.
2. Трибология (электротермомеханические основы, анализ и синтез на нано-, микро- и миллиуровнях и технические приложения): учебн. пособ. [А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, П.С. Красин и др.]. – Киев – Краснодар, 2015. – 371 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. редакцией А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
4. Джанахмедов А.Х. Синергетика и фракталы в трибологии / А.Х. Джанахмедов, О.А. Дышин, М.Я. Джавадов // Баку: Апостроф, 2014. – 504 с.
5. Чичинадзе А.В. Износостойкость фрикционных полимерных материалов / Чичинадзе А.В., Белоусов В.Я., Богатчук И.М. / Львов. – Высшая школа, 1989. – 114 с.

#### References

1. Dzhanaahmedov A.H. Fiziko-stohasticheskoe tribomodelirovanie / A.H. Dzhanaahmedov. – Baku: Jelm. – 151s.
2. Tribologija (jelektrotermomehanicheskie osnovy, analiz i sintez na nano-, mikro- i milliurovnjah i tehniicheskie prilozhenija): uchebn. posob. [A.I. Vol'chenko, M.V. Kindrachuk, P.S. Krasin i dr.]. – Kiev – Krasnodar, 2015. – 371 s.
3. Trenie, iznos i smazka (tribologija i tribotehnika) / Pod obshh. redakciej A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 575s.
4. Dzhanaahmedov A.H. Sinergetika i fraktaly v tribologii / A.H. Dzhanaahmedov, O.A. Dyshin, M.Ja. Dzhavadov // Baku: Apostrof, 2014. – 504s.
5. Chichinadze A.V. Iznosostojkost' frikcionnyh polimernyh materialov / Chichinadze A.V., Belousov V.Ja., Bogatchuk I.M. / L'vov. – Vysshaja shkola, 1989. – 114s.