

Physical Methods for Assessing the Load of Friction Pairs of Braking Devices (Part II)

**D.Yu. Zhuravlev¹, M.Y. Javadov², V.S. Skrypnyk¹,
N.A. Volchenko³, P.S. Krasin³, A.S. Evchenko³**

¹ *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)*

² *Azerbaijan Engineering Academy (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)*

³ *Kuban State Technological University (International Activities Support Department, Room A-523, 2, Moskovskaya st., Bld. A, Krasnodar, 350072, Russia)*

For correspondence:

Skrypnyk Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Abstract

In the first part of the paper, the attention is given to the main principles of the physical methods, as well as the "mechanical-thermal" loading of friction pairs of braking devices. In the second part of the paper, the analysis of principles is conducted and their impact on the energy fields of the brake friction pairs are illustrated. Based on the operation of the principles, the following energy fields are distinguished in pairs: "electric-heat," "chemical-thermal", and "electromagnetic". The "electric heat field" is based on the contact-pulse interaction of micro-protrusions of friction surfaces with various gradients of electrical potential and temperature under given boundary conditions. The "chemical-thermal" field rests on the model of a double electric layer in a pair of brake friction. The "electromagnetic" field is associated with a harmonic variable external electric field. Let us give an analysis of all energy fields.

Keywords: physical methods, braking devices, friction pair, methallic friction element, joint action of energy fields: "electric heat", "chemical-thermal", and "electromagnetic."

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_31_47

Received 27.03.2022
Revised 17.06.2022
Accepted 21.06.2022

For citation:

Zhuravlev D.Yu., Javadov M.Y., Skrypnyk V.S., Volchenko N.A., Krasin P.S., Evchenko A.S.
[Physical methods for assessing the load of friction pairs of braking devices (Part II)]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2022, vol. 14, no. 2, pp.31-47 (in Russian)

Əyləc qurğularının friksion cütlərindəki gərginliklərin qiymətləndirilməsinin fiziki metodları (II hissə)

D.Y. Juravlev¹, M.Y. Cavadov², V.S. Skripnik¹,
N.A. Volçenko³, P.S. Krasin³, A.S. Yevçenko³

¹İvano-Frankivsk Milli Texniki Neft və Qaz Universiteti (Karpatska küç. 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine)

²Azərbaycan Mühəndislik Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

³Kuban Dövlət Texnologiya Universiteti (Moskovskaya küç. 2, Krasnodar, 350072, Rusiya)

Yazışma üçün:

Skripnik Vasiliy / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Xülasə

Məqalənin birinci hissəsində fiziki metodların ümumi prinsiplərinə, həmçinin əyləc qurğularının “mexano-termiki” gərginliyinə diqqət yetirilib. Məqalənin ikinci hissəsində prinsiplərin təhlili aparılıb və onların əyləcin sürünmə cütünün enerji sahələrinə təsirləri qiymətləndirilib. Prinsiplərin təsirinə əsasən, aşağıdakı enerji sahələri cüt-cüt ayırd edilir: “elektro-termiki”, “kimyəvi-istilik”, “elektromaqnit”. “Elektro-termiki sahə” verilmiş sərhəd şərtlərində müxtəlif elektrik potensialı qradientinə və temperatura malik sürünmə səthinin mikroçixıntılarının təmas-impuls qarşılıqlı təsirinə əsaslanır. “Kimyəvi-istilik” sahəsi əyləcin sürünmə cütündə ikiqat elektrik təbəqəsi modelinə əsaslanır. “Elektromaqnit” sahəsi harmonik dəyişən xarici elektrik sahəsi ilə əlaqələndirilir. İşdə bütün enerji sahələrinin təhlili təqdim edilib.

Açar sözlər: fiziki metodlar, əyləc qurğuları, sürünmə cütü, metal friksion elementlər, enerji sahələrinin birgə təsiri: “elektro-termiki”, “kimyəvi-istilik”, “elektromaqnit”.

DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_02_31_47

УДК: 541.11/123(075.8)

Физические методы оценки нагруженности пар трения тормозных устройств (часть II)

Д. Ю. Журавлев¹, М.Я. Джавадов², В. С. Скрыпных¹,
Н.А. Вольченко³, П. С. Красин³, А.С. Евченко³

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа (ул. Карпатская, 15, Ивано-Франковск, 76019, Украина)

²Азербайджанская Инженерная академия (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

³Кубанский государственный технологический университет (ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия)

Для переписки:

Скрыпных Василий / e-mail: skripnik-vs07@ukr.net

Аннотация

В первой части статьи было уделено внимание общим принципам физических методов, а также «механо-тепловой» нагруженности пар трения тормозных устройств. Во второй части статьи выполнен анализ принципов и проиллюстрировано их влияние на энергетические поля пар трения тормозов. Исходя из действия принципов, выделены попарно следующие энергетические поля: «электротепловое», «химико-тепловое», и «электромагнитное». «Электротепловое поле» базируется на контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях. «Химико-тепловое» поле опирается на модель двойного электрического слоя в паре трения тормоза. «Электромагнитное» поле связано с гармоническим переменным внешним электрическим полем. Приводится анализ всех энергетических полей.

Ключевые слова: физические методы, тормозные устройства, пара трения, металлический фрикционный элемент, совместное действие энергетических полей: «электротеплового», «химико-теплового», и «электромагнитного».

Введение

Применение различных общезначимых принципов открывает широкие возможности для расчета и анализа динамического и теплового режима металлических фрикционных элементов дисково-, барабанно- и ленточно-колодочных тормозных устройств и становится качественно новым методом решения динамических и тепловых задач.

Материалы статьи в значительной мере направлены на оценку «электротеплового», «химико-теплового» и «электромагнитного» энергетических полей пар трения тормозных устройств.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Остановимся кратко на применении физических принципов в динамических и тепловых задачах по оценке нагруженности пар трения тормозных устройств.

Принцип причинности нашел применение в ленточно-колодочных тормозах буровых лебедок [1]. Смысл принципа заключается в очередности рассмотрения эксплуатационных параметров: натяжения набегающей и сбегавшей ветви, сила трения, нормальное усилие, удельная нагрузка, динамический коэффициент трения, тормозной момент, температуры (поверхностная, вспышки, объемная), механические и термические напряжения, износ.

Перечисление методов (аналитического, численного, аналогового, графического и экспериментального) и их анализ по определению поверхностных температур рабочих деталей тормозных устройств нашли отражение в работе [2].

Однако при анализе методов теплового расчета пар трения тормозов не были

рассмотрены методы физических принципов.

Эквивалентные электрические схемы использовались при моделировании на РС-моделях теплового режима элементов тормозного барабана транспортного средства. В данных исследованиях применен принцип взаимности между конструктивными параметрами обода барабана и его фланцем [3, 4].

Изучение электродинамики поверхностного слоя полимерной накладки показало, что в ее приповерхностном слое протекают активный I_a и реактивный I_r токи. Последние заменены эквивалентной электрической схемой с идеальным электрическим сопротивлением R и емкостью C [1].

В работе [5] для системы с электромагнитным полем выдерживались законы сохранения: массы, импульса и энергии. При этом не было уделено внимание ни одному физическому принципу оценки нагруженности системы.

Физические принципы могут применяться в различного рода соотношениях. Так, например, в соотношении взаимности Онсагера, когда речь идет о частицах, находящихся в поступательно и вращательно движущихся системах в тепловом, электрическом и электромагнитных полях [6]. Разрозненные данные по электрическим полям пар трения тормозных устройств заставили искать новый подход к их обобщению.

Постановка задачи

Следует решить проблему использования физических принципов применительно к парам трения тормозных устройств и рассмотреть фрикционное взаимодействие их следующих энергетиче-

ских полей: «электротеплового», «химикотеплового» и «электромагнитного», а также оценить особенности нагруженности пар трения тормозных устройств в этих энергетических полях.

Цель работы – обосновать применение физических методов к оценке нагруженности пар трения тормозных устройств.

Электрического с тепловым

Градиентная теория твердых тел и на границах межфазных слоев в интервале поверхностных температур ниже и выше допустимой для материала полимерной наклейки позволит дать ответ на вопрос обеспечения положительного градиента механических свойств в поверхностных слоях металлополимерных пар трения тормозных устройств. Однако при этом существенное влияние оказывают градиенты электрического потенциала и температуры на взаимодействующих поверхностях пятен контактов микровыступов пар трения «полимер-металл» и по их глубине.

В табл.1 показано шесть случаев контактно-импульсного взаимодействия микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях. Кратко проанализируем каждый из случаев.

Первый случай. Асимметрия наблюдается в отдельных зонах там, где расстояние r от контакта велико по сравнению с радиусом a_n контактного пятна микровыступов A_k , которое в данном случае имеет форму круга.

Установлено, что градиент потенциала в зоне стягивания уменьшается по мере увеличения расстояния от контакта, при-

мерно как $1/a_n^2$. При этом общий пространственный заряд в отдельных зонах стягивания по величине почти такой же, как и заряды в непосредственной близости от пятна контакта. Следовательно, влияние удельных зарядов на электрическое поле в зоне стягивания пренебрежимо мало. Аналогичные рассуждения справедливы и в отношении теплового поля.

Таким образом, асимметрия не нарушает закона зависимости вида $\varphi_{\varepsilon} - \mathcal{J}$ в наиболее узких частях стягивания, так как градиенты температуры и напряжения в них велики, а асимметрия в отдельных зонах не отражается на общем напряжении стягивания и на разности температур θ контактной поверхности пятна взаимодействия.

Второй случай характерен для металлополимерных пар трения. При нагревании микровыступов поверхности контакта условия $(d\varphi_{\varepsilon}/dn)_{\varepsilon}=0$ и $(dt/dn)_{\varepsilon}=0$ не соблюдаются, поскольку имеется разность температур между взаимодействующими пятнами контактов. При этом тепловой поток делится на две части: продольную (часть X) и поперечную (часть Y). Тепловой поток вдоль Y вызовет отклонение результатов расчета по зависимости (3) (см. табл. 1) примерно на величину $(W_x/W_y)100, \%$. Составляющие уравнения (3) определяются по зависимостям (1) и (2). После выполненных расчетов на основе значений параметров получили величину отклонения теплового потока $W_x/W_y < 0,05$, которой можно пренебрегать.

Третий случай характерен для интенсивного массопереноса от микровыступов контактирующих поверхностей по схеме «полимер-металл» и наоборот. Он определяет энергетические уровни взаимодействия микровыступов пятен контактов согласно зависимостям (4) и (5).

Таблица 1 – Контактно-импульсное взаимодействие микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях

Table 1 - Contact-pulse interaction of microprotrusions of friction surfaces with different gradients of electric potential and temperature under specified boundary conditions

№ п/п	Случаи взаимодействия пятен контакта	Зависимости для оценки электрических и тепловых полей
1.	Положение электрического поля на пятне контакта: асимметричное;	$\frac{d\varphi_3}{dn}$ уменьшается как $1/r^2$; каждый q_n влияет как q_n/r ; не нарушается зависимость вида $\varphi_3 - \vartheta$.
2.	симметричное с проводимостями, которые отличаются: существенно (пара «полимер-металл»)	$(d\varphi_3/dn)_3 = 0, (dt/dn)_3 = 0; \int_t^T \rho \kappa dt = 0,5\varphi_3^2. \quad (1)$ $W_X = 0,125a_n \lambda_n; \quad (2)$ $W_Y = \frac{S}{1,7a_n^2 \lambda_3} + \frac{1}{2\pi a_n \lambda_n}. \quad (3)$
3.	незначительно (пары: «металл-металл»; «полимер-полимер»).	$\left(\frac{d\varphi_3}{dn}\right)_3 = 0; \left(\frac{dt}{dn}\right)_3 = 0 \cdot \int_t^T \frac{\lambda}{\chi} dt = 0,5\varphi_3^2; \quad (4)$ $\int_0^T \rho \lambda_n dt = 0,125u^2. \quad (5)$
4.	Биметаллические пятна контакта	$\int_t^T \frac{\lambda}{\chi} dt = 0,5\varphi_3^2; \quad (6)$ $(grad\varphi_3)_{A_{\psi_1}} \text{ отличается от } (grad\varphi_3)_{A_{\psi_2}}$
5.	Взаимодействие электрических и тепловых потоков: одинаковой плотности на пятне контакта;	$\left(\frac{d\varphi_3}{dn}\right)_3 = 0; \left(\frac{dt}{dn}\right)_3 = 0 \cdot \left(\frac{d\varphi_3}{dn}\right)_{A_{\psi_0}} \neq 0 \quad (7)$ $(dT/d\varphi_3)_{A_{\psi_0}} = 0 \text{ заменяется эквивалентным условием}$ $\frac{\lambda}{\chi} \left(\frac{dt}{d\varphi_3}\right)_{A_{\psi_0}} = Y. \quad \frac{\lambda}{\chi} \frac{dt}{d\varphi} = -\varphi; \quad \int_t^T \rho \lambda dt = 0,5\varphi_3^2 + Y\varphi_3. \quad (8)$ $\int_t^T \rho \lambda dt = 0,5u^2 + \Pi_1 u. \quad (9)$
6.	При переносе теплоносителями электрического тока с поверхностным градиентом температуры	$Q = I\sigma_t d\vartheta; \quad (10)$ $d\left(\frac{\lambda}{\chi} \frac{dT}{d\varphi}\right) = -d\varphi; \quad \left(\frac{dt}{d\varphi}\right)_{A_0} = 0; \quad \frac{\lambda}{\chi} \frac{dT}{d\varphi} = -\varphi; \quad (11)$ $\int_t^T \rho \lambda_n dt = 0,5\varphi_3^2 - \int_0^\varphi d\varphi_3 \int_t^T \sigma_t dt. \quad (12)$ $\sigma_t = \gamma_n \vartheta; \quad (13)$ $\int_t^T \rho \lambda_n dt = 0,5\varphi_3 \left\{ \varphi_3 - \gamma_n \left[(t_0 + T)^2 - t_0^2 \right] \right\}. \quad (14)$

Четвертый случай отличается от третьего градиентами $(grad\varphi_3)_{A\varphi 1}$ и $(grad\varphi_3)_{A\varphi 2}$, так как энергетические уровни металлов, входящих в биметалл, различны.

Пятый случай. Поверхность пятна контакта микровыступов $A_{\varphi 0}$ удовлетворяет граничным условиям, но не удовлетворяет условию $(d\varphi_3/dn)_{A\varphi 0}$, так как $A_{\varphi 0}$ пересекается тепловым потоком, плотность которого пропорциональна плотности электрического тока j . Вследствие этого получаем Yj , где Y имеет единицу измерения напряжения. Поскольку тепловой поток пропорционален j , он не вносит изменений в систему элементарных линий тока.

В результате преобразований ряда зависимостей получили выражение (8) для оценки теплового потока в интервале температур $0 - t$ и при изменении температур от t до T [выражение (9)]. Часть теплоты Пельтье (Π_1) уходит в исследуемое пятно контакта и составляет тепловой поток $\Pi_1 j$, а u является напряжением зоны стягивания на нем.

Анализ зависимости (9) показывает, что при небольших величинах u , характерных для металлополимерных пар трения, эффект Пельтье вызывает заметное отклонение u от зависимости вида $\varphi_3 - t$.

Шестой случай характеризуется переносом теплоносителями электрического тока из более в менее нагретую зону пятна контакта, лежащую на пути его движения. Это осуществляется посредством эффекта Томпсона, интенсивность которого зависит от коэффициента Томпсона (σ_t). Записав количество теплоты (10), поступающей от сечения микровыступа с температурой $t + dt$ к соседнему сечению с температурой t с учетом граничных условий, и используя зависимость вида (12), после оконча-

тельного интегрирования получили выражение (13).

В дальнейшем применив условие, что при больших температурах металлического элемента трения σ_t пропорционален T , в окончательном виде получаем зависимость (14). Последняя связывает между собой параметры электрического и теплового полей, токи которых пронизывают пятна контакта микровыступов трущихся поверхностей.

При кратковременных торможениях при отсутствии теплоотдачи от матовых поверхностей шкива происходит интенсивное аккумулялирование теплоты, которое может привести его к предельному тепловому состоянию его обода. Для упрощенного рассмотрения задачи теплопроводности пренебрегаем теплоотдачей в окружающую среду.

Химического с тепловым

Теоретические исследования нестационарных физико-химических процессов в контактном зазоре между микровыступами металлополимерных пар трения тормозных устройств при условии, что $K_{\text{вз}} \leq 1$ (коэффициент взаимного перекрытия пар трения), базируется на использовании основных положений теории: нестационарной диффузии; газовой динамики; химической кинетики и электротермомеханического трения.

При этом маловажная роль отводится процессам нестационарной доставки и потребления активного компонента среды в межконтактный зазор микровыступов металлополимерных пар трения. Общую роль занимают адсорбционные процессы, происходящие на металлическом фрикционном элементе.

Адсорбционные процессы сильно изменяют работу выхода электронов в процессе образования адсорбционной связи между свободным атомом или молекулой и поверхностным дипольным слоем. Изменение работы выхода электронов металлической поверхности фрикционного элемента адсорбированными атомами или молекулами прямо пропорционально их эффективному дипольному моменту и степени заполнения поверхности. При адсорбции возникает поверхностный двойной электрический слой, влияющий на изменения и распределения электронных зарядов в нем. Более того, работа, совершаемая электроном, находящимся в адсорбированном слое, зависит от того, как диполь (рис.1) расположен относительно (воображаемой) электро-

нейтральной плоскости. При этом электрон совершает работу по преодолению только полного или половины потенциала адсорбированного слоя. При этом необходимо учитывать тот факт, что в поверхностном слое фрикционной накладки при выгорании связующих компонентов ее материалов при достижении допустимой температуры и выше ее молекулы образовавшегося растворителя сильно ориентированы, в результате чего их эффективный дипольный момент увеличивается по отношению к дипольному моменту поверхности металлического фрикционного элемента. Это обстоятельство и является одним из основных условий инверсии множества микротоков от рабочей поверхности накладок в рабочую поверхность металлического фрикционного элемента.

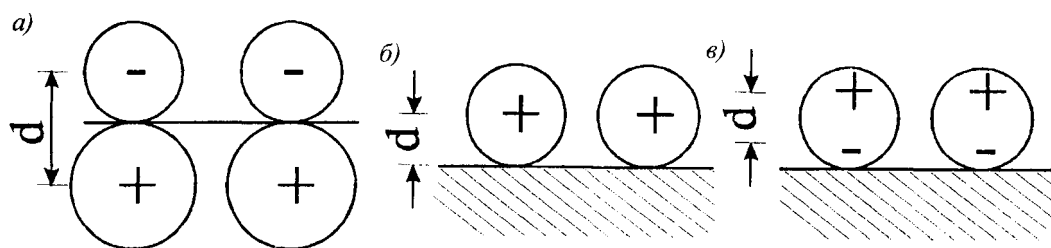


Рисунок 1 – Диполи, которые возникают при адсорбции на поверхности металла:
 а, б – хемосорбция: ковалентная; ионная; в – физическая сорбция (d – расстояние между центрами зарядов)
Figure 1 - Dipoli, which occur during adsorption on the metal surface:
 a, b - chemisorption: sow-tape; ionic; c - physical sorption (d - distance between charge centers)

Из вышеизложенного следует, что трибохимия занимает важное место в трибологии пар трения тормозных устройств.

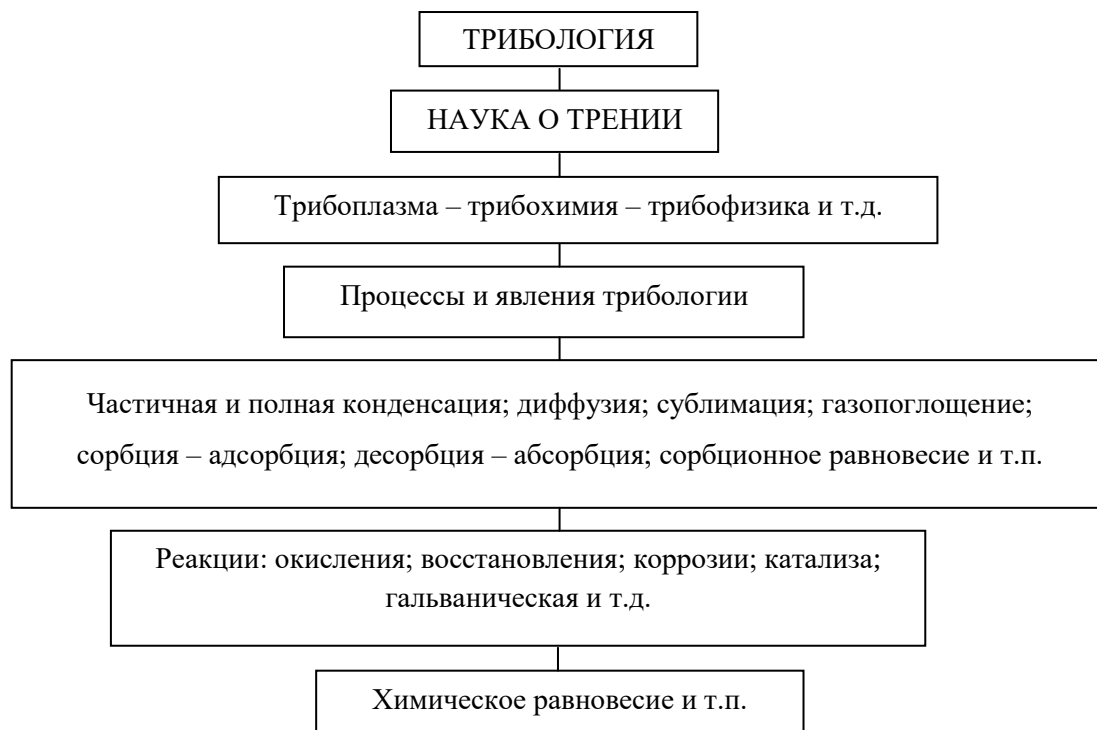
В табл. 2 приведено место трибохимии в трибологии пар трения тормозных устройств. Остановимся на некоторых из процессов.

Перейдем к оценке трибокинетической модели взаимодействия металличе-

ского фрикционного элемента при трении с газовой фазой.

Трибокинетическая модель предложена для различных процессов, которые происходят в слое микронеровностей металлического фрикционного элемента под действием упругих или пластических деформаций при торможении в присутствии газовой среды (рис. 2).

Таблица 2 – Иерархические уровни трибологии
Table 2 – Hierararchic levels of tribology



На рис. 2 использованы следующие обозначения: I – химическая реакция $CO_2 + M \rightleftharpoons MO + CO$; II – химическая реакция $CO + M \rightleftharpoons C + MO$; III – каналы в микровыступах. Заштрихован поверхностный слой, нарушенный путем трения скольжения. Стрелкой вверх на границе

раздела обозначена трибодесорбция, стрелкой вниз – трибоабсорбция, двойные стрелки – трибодиффузия. Газовая фаза достигает рабочей поверхности металлического фрикционного элемента путем диффузии, а потом адсорбируется.

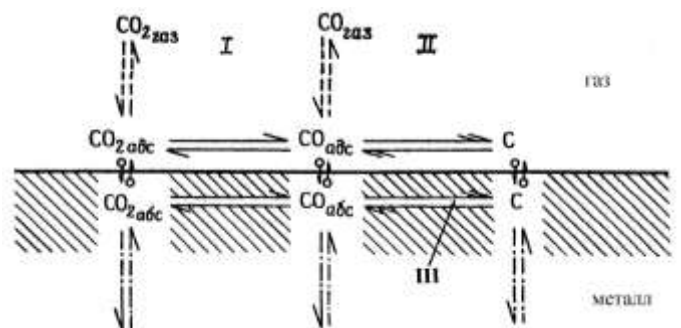


Рисунок 2 – Трибкинетическая модель трибосорбции и трибореакции в системе CO_2 - металл: $CO_{2газ} - CO_2$ в газовой фазе; $CO_{2адс} - CO_2$ в адсорбированном состоянии; $CO_{2абс} - CO_2$ в абсорбированной форме, те же индексы для CO_2

Figure 2 - Tribokinetic model of tribosorption and triboreaction in the system CO_2 - metal: $CO_{2газ} - CO_2$ in the gas phase; $CO_{2адс} - CO_2$ in an adsorbed state; $CO_{2абс} - CO_2$ in absorbed form, same indices for CO_2

Трибоабсорбция происходит по точкам, которые попали под действие сил трения. В зависимости от условий контактирования пар трения тормозного устройства и их теплового состояния непосредственно в процессе торможения происходит трибоабсорбция в трибоплазме из газовой фазы наряду с трибохимической реакцией или с адсорбцией и реакцией газа на рабочей поверхности металлического фрикционного элемента.

Кроме того, трибоадсорбированный газ адсорбируется металлом, и только после этого происходят с ним химические превращения. Наряду с этим трибоабсорбированный газ на микроучастках контактирования переносится в их приповерхностные слои (трибодиффузия), в которых химическая реакция в значительной степени определяется процессами трибосорбции и диффузии [7].

В случае, когда скорость трибосорбции и трибореакции одного порядка, реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического фрикционного элемента. При этом необходимо обратить внимание на то, что трибоиндукционные процессы очень часто существенно отличаются от соответствующих термоиндукционных процессов, и поэтому константы, которые характеризуют абсорбцию и диффузию при термоактивации, нельзя использовать для описания трибокинетических закономерностей.

Представление пар трения тормозных устройств в виде конденсатора позволяет констатировать, что дифференциальные емкости дают ответы на многие эффекты, возникающие возле заряженной поверхности раздела. Особенности структуры двой-

ного слоя представлены на рис. 3. На поверхности раздела могут присутствовать химические адсорбированные ионы, в данном случае анионы, которые имеют тот же знак, что и рабочая поверхность металлического фрикционного элемента тормозного устройства. Данные анионы дегидратированы, и через их центры проходит внутренняя плоскость Гельмгольца. Слой Штерна образовывается главным образом электростатически адсорбированными катионами, через центры которых проходит внешняя плоскость Гемгольца. При этом большая часть поверхности раздела занята молекулами воды. Кроме того, на сильно заряженной поверхности раздела концентрация адсорбированных ионов весьма мала, поскольку один ион приходится на $\sim 10 \text{ \AA}^2$.

Представленная на рис. 3 схема очень наглядно все иллюстрирует для того случая, когда металлический фрикционный элемент находится в статике. Иначе все происходит в динамике. При торможении дискретное множество микроконтактного взаимодействия поверхностей "вращающийся металлический элемент – фрикционная накладку" при различных их тепловых состояниях будет вносить существенные изменения в рассмотренную ранее схему: переполяризация ионов и катионов, изменение положения плоскостей, когда внутренняя плоскость станет внешней, и наоборот, их существенным изменением усредненных электрических свойств; поверхность жидкости становится неоднородной в том понимании, что ее структуру нарушают адсорбированные частицы материалов накладки и другие составляющие вносят изменения в процессы и явления.

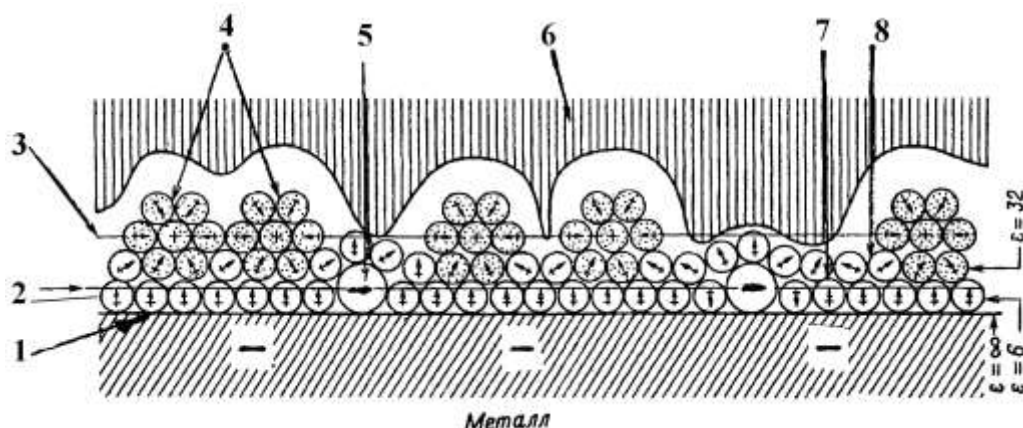


Рисунок 3 – Детальная модель двойного слоя в паре "металл-вода"; 1 – поверхность металла с потенциалом φ_M ; 2, 3 – плоскости Гемгольца и Гуи с потенциалами φ_1 и φ_2 ; 4 – сольватированные катионы; 5 – специфические адсорбированные анионы; 6 – нормальная структура воды ($\epsilon=78,5$); 7, 8 – слои воды: первый ($\epsilon=6$); второй ($\epsilon=32$); ϵ – диэлектрическая постоянная воды

Figure 3 – Detailed model of the double layer in the metal-water pair; 1 - metal-to-metal surface with the potential φ_M ; 2, 3 - Gemgoltz's planes and Gui with potentials φ_1 and φ_2 ; 4 - salt-watated cations; 5 shows specific adsorbed anions; 6 - normal structure of water ($\epsilon=78.5$); 7, 8 - water layers: the first ($\epsilon = 6$); the second ($\epsilon = 32$); ϵ – a dielectric constant of water

Анализ процессов теплообмена в ободе тормозного барабана и во фрикционных накладках при взаимодействии их рабочих поверхностей с омывающими газовыми смесями, а также массопереноса от рабочих поверхностей накладок на рабочую поверхность обода барабана показал, что в интенсификации тепло- и массообменных процессов существенную роль играет уровень теплового состояния материалов приповерхностного слоя фрикционной накладки.

Различают следующие температурные перепады: между наружной поверхностью обода тормозного барабана и омывающим воздухом; между внутренней и наружной поверхностями обода тормозного барабана и омывающим воздухом; между рабочими поверхностями фрикционных накладок и омывающим воздухом (в интервале температур, ниже допустимой температуры); между рабочими поверхностями и уровнями приповерхностных слоев фрикционных накладок; между рабочими

поверхностями фрикционных накладок и омывающей газовой смеси; между внутренней поверхностью обода тормозного барабана и газовой смесью, омывающей внутреннюю и наружную поверхности обода.

Процессы и явления, происходящие в парах трения барабанно-колодочного тормоза транспортного средства, реализуются посредством теплопередачи.

На рис. 4 а, б использованы следующие обозначения: t_P , $t_{ф.р.}$, $t_{0Б}$, $t_{о.с.}$ - температуры: рабочей поверхности обода тормозного барабана; рабочей поверхности фрикционной накладки; обода тормозного барабана; окружающей среды.

При этом элементам фрикционного узла тормоза отвечают соответствующие координаты (x).

В интервале допустимых температур для материалов фрикционной накладки имеет место фазовый переход 1-го рода его компонентов.

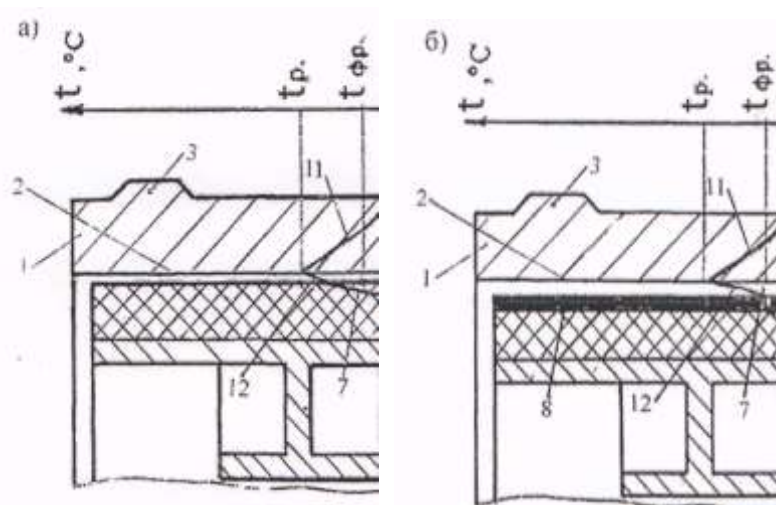


Рисунок 4 а, б – Теплопередача через элементы пар трения (а - до, б - после допустимой температуры материалов фрикционной накладки) барабанно-колодочного тормоза автомобиля: 1 - тормозной барабан; 2, 3, 4 - обод, подкрепляющее кольцо, боковая стенка барабана; 5 - фрикционная накладка; 6 - тормозная колодка; 7 - зазор между элементами трения; 8 - приповерхностный слой накладки; 9, 10, 11, 12,13 - закономерности изменения температур по толщине: приповерхностного слоя накладки, собственно накладки, обода тормозного барабана и слоя воздуха, омывающего его внутреннюю и наружную поверхности

Figure 4 a, b - Heat transfer through the elements of friction pairs (a - up to, b - after the permissible temperature of the friction lining materials) of the drum-shoe brake of the car: 1 - brake drum; 2, 3, 4 - rim, sub-fastening ring, side wall of drum; 5 - friction lining; 6 - brake shoe; 7 shows the clearance between the friction elements; 8 shows the near-surface layer of the patch; 9, 10, 11, 12,13 - patterns of temperature change in thickness: near-surface layer of lining, actual lining, brake drum rim and air layer washing its inner and outer surfaces

Рассмотрим процесс, который имеет место между парами трения барабанно-колодочного тормоза при условии, что поверхностный слой фрикционной накладки достиг температуры выше допустимой.

Вероятными источниками поступления окружающей среды в контактную зону пар трения тормоза является контактный зазор и открытые участки поверхности трения. На них происходит адсорбирование молекул газа (адсорбционный эффект) при неполном взаимном перекрытии пар трения.

При этом основной средой является омывающий воздух между парами трения тормоза. В то же время приповерхностный слой накладок тормозных колодок является либо источником компонентов газовой

среды вследствие протекания процессов испарения, сублимации, десорбции, и т.п., либо поверхностью их стоков при конденсации, адсорбции, абсорбции и т.п. По отношению к газовым смесям в целом поверхности раздела играют роль полупроницаемых перегородок. Компоненты непрерывно диффундируют в направлении, нормальном к рабочей поверхности обода тормозного барабана. Этот диффузионный поток компонентов сопровождается встречной диффузией основной среды, т.е. омывающим воздухом.

Но с другой стороны, совершенно очевидно, что основная среда, для которой поверхности пар трения непроницаемы, не должна перемещаться в направлении, нормальном к рабочей поверхности обода

тормозного барабана. Эти два взаимно противоположных требования удовлетворяются тем, что возникает течение смеси, направленное навстречу диффузионному потоку основной среды и компенсирующее его (эффект Стефана).

Итак, на явления диффузионной природы накладывается процесс, имеющий характер конвективного переноса вещества. Нейтрализуя диффузионный перенос основной среды, конвективный поток смеси, очевидно, усиливает перенос составляющих компонентов. Общая картина перераспределения газовой смеси в объеме зазора между парами трения тормоза изменяется, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 3.

Фрикционные материалы для тормозных устройств должны исследоваться с позиций физико-химической механики тре-

ния в режиме торможения с применением термогравиметрического и дифференциально-термического методов анализа [1].

Результаты указанных исследований для образца из материала ФК-24А представлены на рис. 5. Установлено, что деструкция образца ФК-24А начинается при температуре 300 °С. Рассчитанная энергия активации разложения образца ФК-24А составила 85,5. Доказано, что образец распадается в течение 15 минут при поддержании его температуры 400 °С.

Скорость уменьшения его массы при дальнейшем увеличении температуры возрастает. Необходимо отметить, что режимы исследования материала ФК-24А на термостойкость в виде образца не всегда отвечают реальным условиям работы при поверхностных слоях фрикционных накладок в парах трения тормозных устройств.

Таблица 3 – Процентное соотношение компонентов газовой смеси, образованной в межконтактном пространстве пары трения

Table 3 - Percentage of components of the gas mixture formed in the contact space of the friction pair

Номер пробы	Марка компонента	Температура, °С	Содержание газа, мас. доля, %						
			H ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	CO	ΣC _n H _m	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, N₂O, Xe, O₂, Rn [9].

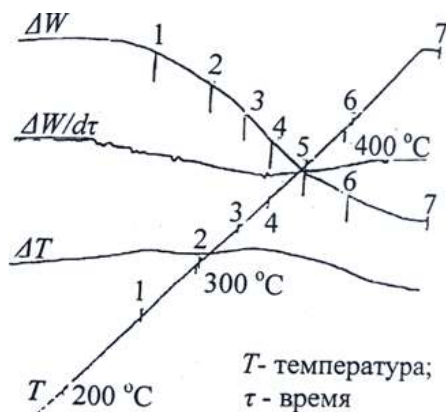


Рисунок 5 – Дериватограмма образца ФК-24А: ΔW -потери массы, определяемые по термогравиметрической кривой; $dW/d\tau$ - скорость изменения (дифференциально-термогравиметрическая кривая); ΔT -дифференциально-термическая кривая
Figure 5 - Derivatogram of sample FK-24A: ΔW -weight loss determined by thermogravimetric curve; $dW/d\tau$ - rate of change (differential-thermogravimetric curve); ΔT -differential and thermal curve

Деструкция фрикционных материалов сопровождается интенсивным дымлением, а затем образованием жидких фракций в порах их поверхностного слоя. При этом молекулы адсорбента весьма прочно удерживаются в микропорах поверхностного слоя материала вследствие того, что они окружены большим количеством атомов углерода.

Адсорбция газовой фазы – это процесс конденсации, который происходит в условиях, когда энергия адсорбции оказывается достаточной для конденсации пара. Сконденсировавшийся пар остается в пористой структуре углерода в виде жидкости.

Кроме того, экспериментальными исследованиями установлено [8], что состав газовой среды оказывает значительное влияние на процессы электротермомеханического трения и изнашивания. При работе в газовых средах, содержащих в своем составе O_2 , на пятнах контактов микровысту-

пов происходит интенсивное образование окисных пленок, обеспечивающих работу фрикционного сопряжения в режиме окислительного износа, что исключает схватывание.

Электрического с магнитным

При эксплуатации ленточно-колодочного тормоза важной практической задачей является ограничение температуры обода шкива при нагревании энергией электромагнитного поля. Определим ее и используем в дальнейшем это значение для оценки функции источника в уравнении теплопроводности.

Запишем уравнение Максвелла для однородной среды, которым является металлический обод шкива, при условии, что ток смещения в нем является незначительным в сравнении с током проводимости.

Ток смещения - это условное название локализованного переменного электрического поля, которое сопровождается появлением магнитного поля. В отличие от других токов (проводимости и конвекции) он не создается упорядоченным движением зарядов, поэтому при отсутствии диэлектрика (и его переполаризации) он не способствует нагреванию обода шкива.

Вместо тока проводимости (j) и магнитной индукции (B) подставим их значения из таких уравнений

$$j = \sigma E; \quad B = \mu H, \quad (15)$$

где σ - выработанная энтропия в единице объема; μ - магнитная проницаемость; E , H - напряженность электрического и магнитного полей

После этого получим систему уравнений:

$$\operatorname{rot} H = \sigma E; \quad (16)$$

$$\operatorname{div} H = 0; \quad (17)$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial \tau}; \quad (18)$$

$$\operatorname{div} E = 0; \quad (19)$$

Выполнив операцию rot к обоим частям уравнения и учтя формулу векторного анализа

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} H = \operatorname{grad} \operatorname{div} H - \Delta H,$$

получим для случая $\operatorname{div} H = 0$:

$$\Delta H = \mu \sigma \frac{\partial H}{\partial \tau}, \quad (20)$$

где τ - время, в течение которого происходит процесс.

Уравнение (20) относится к классу параболических уравнений, поэтому к нему можно применять все методы математической физики [9, 10]. В связи с тем, что векторы B , D , H , E для рассматриваемых задач связаны с гармонически переменным внешним полем (нагревание происходит синусоидальным током), их проще представить комплексным числом

$$\dot{H} = H_a \exp(i\omega\tau),$$

где H_a - амплитуда вектора; ω - круговая частота. Тогда получаем:

$$\frac{\partial \dot{H}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} [H_a \exp(i\omega\tau)] = i\omega \dot{H}, \quad (21)$$

или

$$\Delta \dot{H} = i\mu\sigma\omega \dot{H}. \quad (22)$$

Направляя вектор $\dot{H}$ перпендикулярно плоскости xOy , из (22) имеем:

$$\frac{\partial^2 \dot{H}}{\partial z^2} = i\mu\sigma\omega \dot{H} = k^2 \dot{H}. \quad (23)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\dot{H} = \dot{A} \exp(-kz) + \dot{B} \exp(kz). \quad (24)$$

Связь между электрическим и магнитным полем описывается с помощью выражения:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \sigma \dot{E}. \quad (25)$$

После подстановки в (25) выражение для вектора электрического поля приобретает вид:

$$\dot{E} = \dot{I}_x \frac{k}{\sigma} [\dot{A} \exp(-kz) + \dot{B} \exp(kz)], \quad (26)$$

где $\dot{I}_x$ - единичный орт.

Первый член выражения (26) описывает затухание электрической волны электромагнитного поля, которая падает на внешнюю поверхность обода тормозного шкива, второй - отраженную волну. Для полуограниченного участка шкива при $B = 0$ получаем:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \dot{A} \exp(-kz); \\ \dot{E} &= \dot{I}_x \frac{k}{\sigma} \dot{A} \exp(-kz). \end{aligned} \quad (27)$$

Постоянную интегрирования $\dot{A}$ определяем из граничных условий: на наружной поверхности обода шкива ($z = 0$) напряженность магнитного поля в воздухе $\dot{H} = \dot{H}_0$. Указанная величина не изменится при переходе через границу «воздух - металл», т.е. при $z = 0$ $\dot{H} = \dot{H}_0$ в металле.

Таким образом

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \exp(-kz). \quad (28)$$

Для практических расчетов электрических и магнитных полей, которые возникают в обode тормозного шкива, часто используется величина δ , которую называют «глубиной проникновения поля»:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}, \quad (29)$$

На глубине δ обода шкива амплитуда колебаний полей уменьшится в e раз, т.е.

$$H_\delta = H_0 e^{-1}; \quad (30)$$

$$E_\delta = E_0 e^{-1}; \quad (31)$$

где H_0 , E_0 - напряженность магнитного и электрического полей.

В полученных зависимостях (30), (31) учтем то, что коэффициент затухания волн $k = \sqrt{i\omega\mu\sigma} = 1 + i/(\delta)$,

тогда

$$\dot{H} = H_0 \exp\left(-\frac{1+i}{\delta} z\right); \quad (32)$$

$$\dot{E} = iH_0 \frac{1+i}{\sigma\delta} \exp\left(-\frac{1+i}{\delta} z\right), \quad (33)$$

где $\dot{H}$, $\dot{E}$ - текущие величины магнитного и электрического полей при наличии i -го количества слоев обода шкива с переменной координатой z_i в каждом из полей.

В дальнейшем определяем фазы H и E . Из выражений (32) и (33) после несложных преобразований получаем:

$$\varphi_H = \omega t - \frac{z}{\delta}; \quad \varphi_E = \omega t - \frac{z}{\delta} + \frac{\pi}{4};$$

$$\varphi_H - \varphi_E = \frac{\pi}{4}. \quad (34)$$

Таким образом, для плоской волны в обode шкива в любой момент времени в точке z фаза вектора электрического поля опережает фазу вектора магнитного поля на $1/8$ периода. На рис. 6 приведены графики мгновенных значений напряженностей электрического E и магнитного H полей в металле обода шкива. Во времени указанные векторы меняются синусоидально, а в пространстве их изменение носит аperiодический характер и быстро за-

тухает в направлении распространения электромагнитного поля.

Величина фазовой скорости распространения электромагнитного поля в обode шкива

$$v_\phi = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}}. \quad (35)$$

При этом длина волны равна:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}. \quad (36)$$

Из полученных зависимостей для фазовой скорости (35) и длины волны (36) в металле обода шкива видно, что они зависят от параметров μ , σ и от круговой частоты ω .

В табл. 4 приведены данные λ , v_ϕ и δ для стали (материала обода шкива).

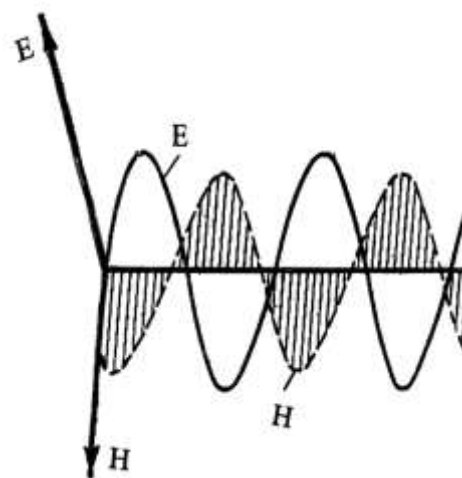


Рисунок 6 – Плоская электромагнитная волна в металлическом обode тормозного шкива со стороны его внешней поверхности

Figure 6 - Flat electromagnetic wave in the metal rim of the brake pulley on the side of its external surface

Таблица 4 – Характеристики плоской электромагнитной волны и глубины ее проникновения в тело обода шкива при индукционном нагревании

Table 4 - Characteristics of the flat electromagnetic wave and its penetration depth into the body of the pulley rim during induction heating

Частота, λ , с ⁻¹	Длина волны (в см) для стали при:		Фазовая скорость (v_ϕ , см/с) в стали при:		Глубина проникновения (δ , мм) в сталь при:	
	$t = 20^\circ\text{C}$; $\mu = 10$	$t = 800^\circ\text{C}$; $\mu = 1,0$	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 800^\circ\text{C}$	$t = 20^\circ\text{C}$	$t = 800^\circ\text{C}$
50	4,46	44,6	$2,23 \cdot 10^2$	$2,23 \cdot 10^3$	0,71	7,11
$2,5 \cdot 10^3$	0,63	6,33	$1,55 \cdot 10^3$	$1,55 \cdot 10^4$	0,1	1,0
10^4	0,316	3,16	$3,16 \cdot 10^3$	$3,16 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	0,5
10^6	$3,16 \cdot 10^{-2}$	0,316	$3,16 \cdot 10^4$	$3,16 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$

Проанализируем полученные расчетные данные.

С увеличением частоты λ электромагнитной волны глубина ее проникновения δ в сталь уменьшается. Расчеты выполнены при постоянной величине магнитной проницаемости ($\mu = \text{const}$). Однако отметим, что магнитная проницаемость $\mu = f(H)$ является величиной переменной, поэтому полученные данные фактически являются приближенными.

Заключение

Использование комбинации составляющих физических принципов применительно к фрикционным парам трения тормозных устройств позволили установить закономерности изменения электрических и тепловых полей при контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения с различными градиентами электрического потенциала и температуры при заданных граничных условиях.

Теоретические исследования нестационарных физико-химических процессов в контактном зазоре между микровыступами металлополимерных пар трения тормозных устройств при условии, что $K_{\text{вз}} \leq 1$

мозных устройств при условии, что $K_{\text{вз}} \leq 1$ (коэффициент взаимного перекрытия пар трения), базируется на использовании основных положений теории: нестационарной диффузии; газовой динамики; химической кинетики и электротермомеханического трения. При этом маловажная роль отводится процессам нестационарной доставки и потребления активного компонента среды в межконтактный зазор микровыступов металлополимерных пар трения. Общую роль занимают адсорбционные процессы, происходящие на металлическом фрикционном элементе.

Для плоской электромагнитной волны, попадающей на внешнюю поверхность обода тормозного шкива, в любой момент времени в заданной точке фаза вектора электрического поля опережает фазу вектора магнитного поля на $1/8$ периода, что в дальнейшем позволило оценить характеристики плоской электромагнитной и глубины ее проникновения в тело обода шкива при индукторном нагревании.

Установлено общее количество тепловой энергии, которая распространяется в теле обода шкива при его индукторном нагревании, позволившая сделать сравни-

тельный анализ соотношений напряжений магнитных и электрических полей и доказать, что соотношение $\left(\frac{\vec{E}}{E_0}\right)$ является почти квазистабильным в интервале температур ниже точки Кюри (780°C). Таким образом, внешняя поверхность обода шки-

ва работает в зоне ферромагнитных свойств его материала.

Проанализированы закономерности изменения температур на внешней поверхности и внутри приповерхностного слоя обода тормозного шкива во времени при индукторном нагревании.

REFERENCES

1. Proektnyj i proverochnyj raschet frikcionnyh uzlov lentочно-kolodochnyh tormozov transportnyh sredstv / A.Kh. Janahmadov, D.A. Volchenko, D.Yu. Zhuravlev [i dr.]. Standart. Baku: «Apostroff», 2016. – 311 s. (in Russian)
2. **Volchenko A.I.** Teplovoj raschet tormoznyh ustrojstv. Lvov: Vishcha shkola, 1987. – 136 s. (in Ukrainian)
3. **Genbom B.B., Gudz G.S., Eremenko P.I.** O vliyanii konstruktivnyh faktorov na temperaturnyj rezhim tormoznyh mekhanizmov. *Avtomobilnaya promyshlennost*. 1976. №1. S. 26 – 28. (in Russian)
4. **Javadov M.Y., Volchenko D.A., Skrypnik V.S., Volchenko N.A., Evchenko A.S., Vudvud A.N.** Physical methods for evaluating the load of friction pairs of braking devices (Part I). *Herald of the Azerbaijan Engineering Academy*. Vol.13, No 2, 2021, pp. 48-57 (in Russian)
5. **Muchnik G.F., Rubashov I.B.** Metody teorii teploobmena. Teplovoe izluchenie. M.: Vysshaya shkola, 1974. – 272 s. (in Ukrainian)
6. **Kozdoba L.A.** Elektricheskoe modelirovanie yavlenij teplo- i massoperenosa. M.: Energiya, 1972. – 296 s. (in Russian)
7. **Janahmadov A.Kh.** Sinergetika i fraktaly v tribologii / A.Kh. Janahmadov, O.A. Dyshin, M.Ya. Javadov. Baku: Apostroff, 2014. - 504 s. (in English)
8. **Sopronyuk M.P.** Dmagnostika materialov i sred. Energeticheskie poverhnosti sloev / P.M. Sopronyuk, V.M. Yuzevych. – Lvov: FMI im. G. V. Karpenko NAN Ukrainy, iz-vo «SPOLOM». 2005. – 292 s. (in Ukrainian)
9. **Abramovich I.G., Levin V.I.** Uravnenie matematicheskoy fiziki. M.: Nauka, 1990. – 286 s. (in Russian)
10. **Nensis E.I.** Metody matematicheskoy fiziki. M.: Prosveshchenie, 1987. – 200 s. (in Russian)