

УДК 621.891

В. Я. МАЛЫК

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина*

## МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КОНТАКТНО-ИМПУЛЬСНОГО ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ (часть I)

*Рассмотрены вопросы: методы теплотехнических расчетов и их анализ; особенности конструкций фрикционных узлов; основные электротермомеханические процессы при трении; температуры: термической деструкции полимерных накладок и насыщения, стабилизации металлических фрикционных элементов.*

**Ключевые слова:** *методы теплового расчета, пары трения, тормозное устройство, контактно-импульсное фрикционное взаимодействие, пятно контакта, металлический и неметаллический фрикционный элемент, элемент градиентной теории.*

**Введение.** Существующие методы теплового расчета контактно-импульсного фрикционного взаимодействия металлополимерных пар трения тормозных устройств должны искать компромисс между тепловыми полями, действующими на пятна контактов при электротермомеханическом трении, и механическими, электрическими, химическими полями [1; 2].

Электротермомеханическое трение и износ металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза существенно зависит от характеристик микрогеометрии фрикционного контакта. В связи с тем, что поверхности имеют шероховатость и субшероховатость, а также волнистость, которые обусловлены характером предварительной технологической обработки, процессом трения и возникающего при этом износа, и при этом импульсный контакт является дискретным, а его фактическая площадь контакта составляет незначительную часть от номинальной площади. Взаимодействие поверхностей происходит только на фактической площади контакта – и поэтому импульсная сила трения и износ пропорциональны этой площади. Разрушение единичных фрикционных связей происходит при сдвиге, равном среднему диаметру пятен контакта. Переход от оттеснения к резанию определяется глубиной внедрения вершин микронеровностей и, следовательно, зависит от сближения поверхностей. Наконец, на электрический и тепловой режимы узла трения существенно влияют число, размер и плотность распределения пятен фактического контакта, на которые, в свою очередь, влияют и химические поля.

**Состояние проблемы.** Интенсивное развитие нанотрибологии требует особого подхода к методам теплового расчета пар трения тормозных устройств. Составляющие материалы пар трения «металл-полимер» имеют различные допустимые и насыщения температуры, которые разделены между собой сотнями градусами. При этом поверхностные градиенты в паре трения «металл-полимер» при трении принимаются одинаковыми, несмотря на то, что энергетические уровни их приповерхностных слоев существенно различаются. Все это требует критически оценить методы теплотехнических расчетов и провести их анализ.

**Методы теплотехнических расчетов и их анализ.** Остановимся на методах решения задач теплопроводности, применяемых при теплотехнических расчетах.

Аналитический метод базирується на математическом решении дифференциальных уравнений теплопроводности. Задачи теплопроводности бывают стационарные и нестационарные. Для решения таких задач пользуются общим уравнением теплопроводности (температурное поле задают как функцию координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и  $t$ ). Частный случай уравнения находят, когда коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость не зависят от координат и температуры, из которого в дальнейшем: а) при отсутствии в системе источников и стоков теплоты получают уравнение Фурье; б) при наличии в системе источников и стоков теплоты (если система не зависит от времени, т. е. стационарна) приходят к уравнению Пуассона; в) при отсутствии в системе, которая не зависит от времени, источников и стоков теплоты, получают уравнение Лапласа [3–5].

Численный метод (конечных разностей) заключается в определении температур для некоторого набора (сетки) точек, носящих название узлов. Затем задается температура в каком-то выбранном узле и с помощью, например, уравнения Лапласа, описывающего двухмерную задачу стационарной теплопроводности, ее связывают с температурой соседних узлов, определив вторые производные от температуры. Рассматриваемый объект, например пластина, разделяется на конечное число элементов, и чем больше их, тем меньше расстояние между ними, что обеспечивает хорошее приближение к действительным значениям первой и второй производной. С помощью уравнений устанавливается связь между температурными разностями, а следовательно, суммой тепловых потоков, входящих в узел, с заданной температурой. Для полученных уравнений справедлив закон Кирхгофа для электрического тока со следующей формулировкой: алгебраическая сумма всех тепловых потоков в данной точке должна равняться нулю. Полученные таким образом уравнения должны иметь симметрию, поскольку она позволяет проверить правильность записи уравнений узловых точек до начала численного решения задачи. При этом должно соблюдаться равенство тепловых потоков, поступающих, например, из узла  $A$  в узел  $B$  и наоборот (с обратным знаком). Теплообмен между узловыми точками описывается константами проводимости. Для процесса теплопроводности они рассчитываются по формуле стационарной теплопроводности, а для других видов теплообмена - эквивалентной проводимостью. Решение уравнений узловых точек для выбранного объекта производится с помощью вычислительной техники [5].

При решении нестационарных задач теплопроводности тепловой поток между отдельными точками изменяется не только с координатой, но и во времени. Уравнения узловых точек наряду с конечными приращениями координаты и температуры имеют конечные временные интервалы. Эти уравнения - следствие теплового баланса, учитывающего теплоту, подводимую к узлу, рассеиваемую им и аккумулируемую в нем. Численный метод решения задач теплопроводности применяется в тех случаях, когда аналитические методы решения непригодны.

Аналоговый метод основан на подобии двух форм уравнения диффузии, т. е. распределения напряжения в линиях токов с заданными параметрами (сопротивлением и емкостью) и одномерным уравнением теплопроводности Фурье. Электрическими и тепловыми аналогами являются напряжение и температура, ток и тепловой поток, время. Перечисленные величины используются для определения значений термического сопротивления и термической емкости. Аналоговую схему стационарной задачи получают путем разделения рассматриваемого объекта на конечное число дискретных элементов (узлов) без учета термических емко-

стей. Таким образом, задача сводится к аналитическому методу. В дальнейшем определяются термические сопротивления между узлами, как в аналогичных задачах теории электрических цепей, законы из которой применимы и к задачам теплопроводности. Аналоговый метод используется при решении нетрудоемких задач теплопроводности.

*Графический метод* базируется на решении уравнения теплопроводности путем разбивки рассматриваемого объекта (например, параллельные плоские стенки) на отдельные слои небольшой толщины. Противоположные границы каждого из слоев соединяются прямыми, совокупность которых аппроксимирует профиль температуры в теле. Температура центра каждого слоя в заданный момент времени считывается непосредственно с графика. Расчетным путем определяется интервал времени. Затем строится график каждого последующего температурного распределения соединением точки пересечения границ слоев с графиком предшествующего распределения температуры. Графический метод не требует сложных вычислений и пригоден для решения нестационарных задач теплопроводности с различными граничными условиями для объектов простейшей геометрической формы [6].

*Экспериментальный метод* опирается непосредственно на получение значений температур в исследуемых объектах путем их измерений.

Одно время наряду с другими методами расчета теплонагруженности пар трения тормозов получила распространение математическая теория планирования экстремальных экспериментов [7]. С помощью этой теории задачи решаются следующим образом. Первоначально устанавливается, в какой мере каждый из факторов влияет на параметр выхода. Количественной мерой является значение коэффициента модели, отвечающего данному фактору. При этом знак «плюс» свидетельствует о росте параметра, а «минус» – об убывании, т. е. указывает на характер влияния. Затем устанавливается расположение совокупности факторов по силе их влияния на параметр выхода и принимаются решения, исходя из возможных ситуаций и различаемые по адекватности модели, значимости и незначимости ее коэффициентов. При построении интерполяционной формулы получение адекватной модели означает, что задача решена. Однако в данном методе использовались только внешние параметры и не учитывались внутренние параметры на электронном уровне взаимодействия поверхностных слоев пар трения тормозов [2; 8; 9].

**Особенности конструкций фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов и их эксплуатационные параметры.** К наиболее распространенным фрикционным узлам тормозных устройств относятся прямые и обратные пары трения. Прямые пары трения – вращается металлический фрикционный элемент, который тормозится подводимыми к нему фрикционными накладками. В случае взаимодействия по схеме «вращающиеся полимерные фрикционные элементы – подводимый металлический фрикционный элемент» имеют место обратные пары трения. В последнее время проводятся исследования теоретического и экспериментального характера применительно к многопарным фрикционным узлам ленточно-колодочного тормоза. Особенностью конструкций таких узлов является то, что накладки в них посажены с натягом на рабочую поверхность обода тормозного шкива или находятся в свободном состоянии на его поверхности. При этом тормозная лента полностью освобождена от фрикционных накладок [10; 11].

Интенсификация режимов эксплуатации нагруженных металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок, связанная с увеличением интенсивности генерирования электрических и тепловых токов, и как следствие, энергонагруженности их рабочих элементов при электротермомеханическом трении. Все это вызывает на стадии разработки конструкций фрикционных узлов необходимость оценки энергонагруженности их пар трения с целью правильного подбора материалов для обеспечения надежных износостойких характеристик. При этом в статике необходимо производить оценку следующих эксплуатационных параметров фрикционных узлов: статического коэффициента взаимного перекрытия; статического коэффициента трения; тепловых токов между приповерхностными слоями металлополимерных пар трения; предварительные удельные нагрузки при посадке с натягом бандажей накладок на шкив; упругопластические деформации элементов поверхности; действие вибрационных нагрузок. При электротермомеханическом трении имеет место скользящий контакт для которого необходимо производить оценку следующих эксплуатационных параметров: относительной скорости скольжения; динамического коэффициента взаимного перекрытия; динамического коэффициента трения; переменных удельных нагрузок; упругопластической деформации элементов поверхности; действия ударных и вибрационных нагрузок; электрического и теплового импульсного взаимодействия между поверхностными и подповерхностными слоями металлополимерных пар трения, сопровождаемых химическими полями; величину износа: механического, электрического, теплового и химического.

#### **Содержание основных электротермомеханических процессов при трении.**

Происходящие при электротермомеханическом трении процессы взаимосвязаны и взаимообусловлены, а свойства микровыступов с пятнами контакта с механическим, электрическим, тепловым и химическим полями непрерывно изменяются.

Особенности происходящих при электротермомеханическом трении процессов, явлений и эффектов определяются сначала исходными, затем текущими профилями микровыступов металлополимерных пар трения: начальной дискретностью и множественностью импульсного контактирования во времени и в пространстве; дискретностью, неоднородностью и нестационарностью физико-химических структур и наблюдаемых электротермомеханических свойств микровыступов и зазоров между ними с ярко выраженной их анизотропией в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (по нормали и по касательной) к поверхностям пятен контактов микровыступов; дискретностью множественной структуры основных процессов, явлений и эффектов, вызывающих, в свою очередь, дополнительные, а также их нестационарностью и термодинамической необратимостью в открытой трибологической системе.

Импульсное приложение нагрузки к микровыступам поверхностей трения металлополимерных пар в начальный момент торможения вызывает генерирование импульсных электрических токов.

Электрический импульс синусоидальной формы и его характеристики проиллюстрированы на рис. 1. При этом использованы следующие обозначения:  $A'$  – амплитуда;  $t_{II}$  – длительность импульса;  $t_{IIa}$  – длительность импульса на уровне  $0,5A'$ . Электрический импульс характеризует кратковременное отклонение электрического напряжения или силы тока от некоторого постоянного значения.

Эмпирическая зависимость определения импульса тока от времени приведена на рис. 1 (где  $e$  – основание натурального логарифма). Импульс тока выра-

жается в амперсекундах в случае произвольного временного хода тока. Следует заметить, что электрический импульс и электромагнитная плоская волна описываются одинаковым законом – синусоидой.

Сильные колебания температуры в начальный период трения связано с генерированием электрических токов на микровыступах поверхностей с постоянным их затуханием к концу связано также с миграцией «горячих пятен», возникающих на поверхностях трения в результате дискретности контакта. Судя по волновой периодичности изменения температуры в зонах термопар, расположенных в различных точках поверхностного слоя накладки, перемещение «горячих пятен» подчиняется некоторой аperiodической закономерности, связанной с неравномерностью распределения нормальных сил на поверхности фрикционного контакта, и как следствие, удельных нагрузок, а также износа. Характерно увеличение разброса величин температур с увеличением твердости материалов поверхностного слоя накладки, связанное, очевидно, с изменением размеров «горячих пятен» и более неравномерным распределением их по поверхностях микровыступов трения.

На рис. 2 показаны предложенные расчетные модели для оценки характеристик взаимодействия пятен контактов с различными диаметрами пары трения «металл-полимер» при генерировании электрических и тепловых токов.

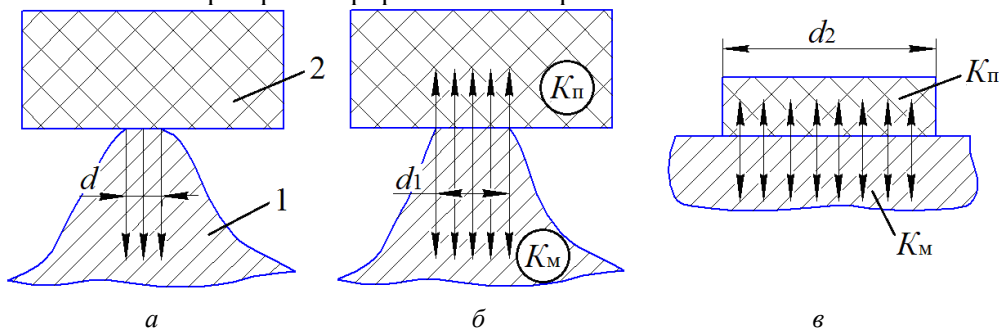


Рис. 2. Расчетные модели для оценки характеристик взаимодействия пятен контактов с различными диаметрами ( $d$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ) пары «металл (1)-полимер (2)» при генерировании: а – импульсных электрических токов; б, в – импульсные температурные токи: всплшки; поверхностные

На рис. 2, б, в введены обозначения  $K_m$ ,  $K_p$ , означающие коэффициенты распределения тепловых потоков, соответственно, в металлический и полимерный фрикционный элементы [11]. Следует заметить, что с увеличением площади пятен контактов микровыступов наблюдается рост заряженных частиц на их поверхностях.

Проанализируем теплонагруженность поверхностного и приповерхностного слоев элементов трения металлополимерных пар.

Согласно классической теории [5; 9-11] в непосредственной близости от точек контакта пары трения «металл (1) – полимер (2)» (рис. 3, а) образуются отдельные полусферические изотермические поверхности, сливающиеся в общую по-

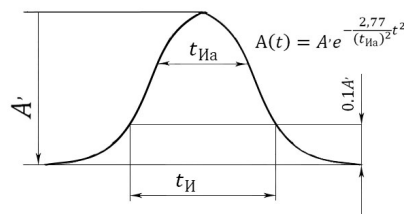


Рис. 1. Электрический импульс синусоидальной формы и его характеристики

верхность на некоторой глубине. Расположение изотермических поверхностей характеризуется величиной температурного градиента. В общем случае температурное поле в металлическом и полимерном фрикционных элементах, относящихся, соответственно, к поверхностному и приповерхностному их слоям, представлено на рис. 3 б, в. Из последнего видно, что в зоне взаимодействия имеют место следующие температуры:  $t_f$  – трения, возникающая в зоне деформации микроучастков рабочей поверхности;  $t_k$  – контактная, возникающая в точках контакта;  $t_s$  – поверхностная, возникает на макроучастках поверхностей трения;  $t_v$  – объемная, возникает в теле элемента трения ниже зоны деформации.

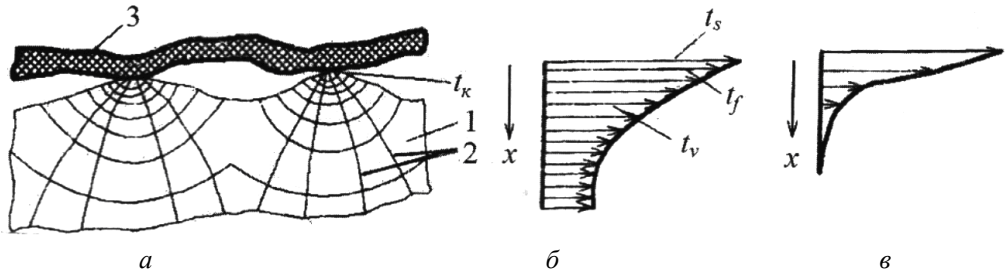


Рис. 3. Температурное поле поверхностного слоя металлического (1) элемента (а) при трении и эпюры изменения температур в нем (б) и в приповерхностном слое полимерного (2) элемента (в):  $t_f$ ,  $t_k$ ,  $t_s$ ,  $t_v$  – температуры: трения, возникающая в зоне деформации микроучастков рабочей поверхности; контактная, возникающая в точках контакта; поверхностная, возникающая на макроучастках поверхностей трения; объемная, возникающая в теле элемента трения ниже зоны деформации

На рис. 4 приведено распределение температуры ( $t$ ) и теплового потока ( $q$ ) на пятне контакта при:  $a - t = const$ ;  $\delta - q = const$ . Однако такое идеальное распределение температуры ( $t$ ) и теплового потока ( $q$ ) на пятне контакта в парах трения невозможно из-за инверсии токов между взаимодействующими зонами.

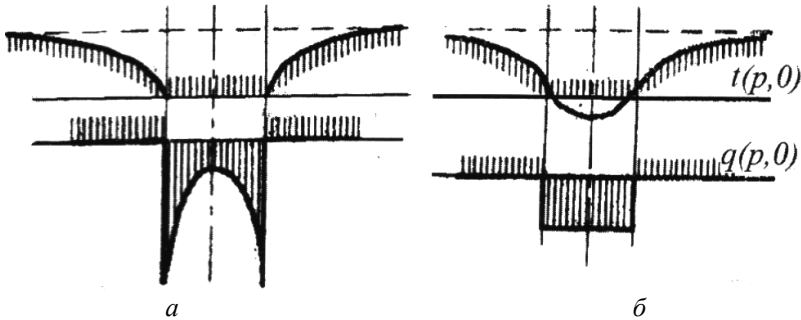


Рис. 4. Распределение температуры ( $t$ ) и теплового потока ( $q$ ) на пятне контакта при:  $a - t = const$ ;  $b - q = const$

В тормозных устройствах, имеющих не массивный металлический элемент трения (транспортные средства, некоторые подъемно-транспортные машины и др.), до достижения фрикционными накладками допустимой температуры роль термоэлектрогенератора выполняет контртело (металлический элемент трения), а термоэлектрохолодильника – поверхностные слои фрикционных накладок. После превышения допустимой температуры картина меняется на обратную. В ленточно-колодочном тормозе буровой лебедки металлический элемент трения массивен, он является термоэлектрогенератором. Тепловое состояние поверхностных слоев фрикционных накладок ленты различно.

**Температура начала интенсивной термической деструкции полимерных фрикционных накладок.** Известно, что наиболее часто термостойкость оценивается с помощью термогравиметрического анализа полимерных материалов. Термогравиметрические кривые проиллюстрированы на рис. 5 показана зависимость константы скорости процесса термодеструкции от температуры [7].

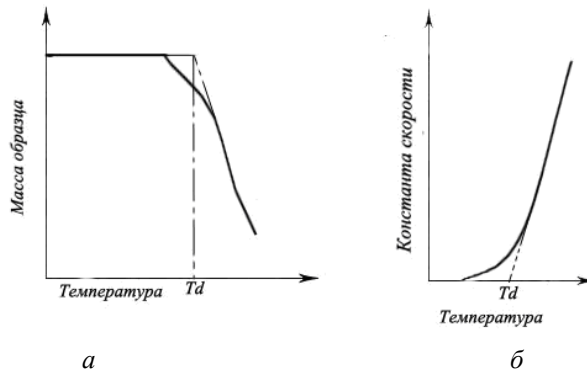


Рис. 5. Схематическое изображение: *а* – термогравиметрической кривой полимера; *б* – зависимости константы скорости процесса термодеструкции от температуры

Температура начала интенсивной термодеструкции  $T_d$  определяется по пересечению касательных к двум ветвям термогравиметрической кривой. Из рис. 5, *б* следует, что при некоторой характерной температуре наблюдается катастрофическое увеличение константы скорости и, как следствие, начинается интенсивная термическая деструкция. Последняя протекает в весьма узком интервале температур и поэтому температура термической деструкции выбирается внутри данного интервала. Известно, что указанная температура несколько зависит от темпа нагревания в условиях термогравиметрического анализа и от скоростных токов компонентов омывающей среды, в которой происходит нагревание поверхностей пятен контакта полимерной накладки.

Обычно процесс деструкции рассматривается как кинетический эффект. Последний играет существенную роль за конечный промежуток времени при переходе электронов, образующих валентные связи, из устойчивого состояния в неустойчивое.

Известно, что в процессе деструкции происходит диссипация химических связей. Если представить повторяющееся звено полимеров в виде набора ангармонических осцилляторов, образованных термодеструкцией, как допустимую температуру, при которой происходит потеря устойчивости ангармонического осциллятора. При этом с термодинамической точки зрения указанное явление представляет собой температуру фазового перехода первого рода и, следовательно, рассматривать термодеструкцию как фазовый переход. Это явление отличается от фазового перехода в простых термодинамических системах, для которых характерна обратимость фаз. Последняя, в данном случае отсутствует, так как из продуктов деструкции нельзя вновь получить полимер простым вынужденным охлаждением поверхности накладок.

По данным А.М. Джанахмедова и А.И. Вольченка термодеструкция материалов поверхности фрикционной накладки ФК-24А наступает при температуре 390 °С. Что касается химического состава фрикционных материалов для накладок, то они высветлены в работе [12;13].

**Температуры насыщения и стабилизации металлических фрикционных элементов тормозных устройств.** Металлические фрикционные элементы тор-

мозных устройств изготавливаются, в основном, из чугунов и его модификаций и сталей. Примерный химический состав металлических фрикционных элементов (тормозных барабанов и шкивов) представлен в табл. 1. В работе [12; 13] представленные материалы для тормозных дисков могут успешно использоваться для тормозных барабанов транспортных средств.

Таблица 1

**Химический состав металлических фрикционных элементов**

Металлический элемент трения	Химический элемент, вес. %									
	C	Cr	Cu	Mg	Mn	Ni	P	S	Si	Fe
Чугун	3,0-3,5	0,15	0,001	0,001	0,6-1,0	0,50	0,60	0,15	1,8-2,4	92,66
Сталь	0,42-0,5	0,25	0,25	-	0,5-0,8	0,25	0,04	0,4	0,17-0,37	97,89

По данным А.В. Чичинадзе металлы имеют температуру теплового насыщения (табл. 2).

Таблица 2

**Температуры теплового насыщения некоторых металлов**

Материалы	Чавун	Сталь	Cu	Al	Cr	Na
$t_m, ^\circ\text{C}$	187,0	185,0	68,5	104,0	201,0	252,0

При этом в работе [13] отмечалось, что металлические и неметаллические фрикционные элементы тормозных устройств характеризуются коэффициентом теплового насыщения (табл. 3).

Таблица 3

**Коэффициенты теплового насыщения металлических и неметаллических фрикционных элементов тормозных устройств**

Материалы	стали:		чавуны:		ретинакс:	
	30ХГСА	65Г	ЧНМХ	серые	тип А	тип Б
Коэффициент теплового насыщения, $\sqrt{\lambda c \rho}$ , Н·м/(м <sup>2</sup> ·с <sup>0,5</sup> ·°С)	121,0-122,0	128,0-109,0	136,0-141,0	130,0-142,0	131,0-145,0	

Данный коэффициент устанавливает связь между теплофизическими параметрами материала: коэффициентом теплопроводности ( $\lambda$ ), теплоемкостью ( $c$ ), и плотностью ( $\rho$ ). Однако, коэффициент теплового насыщения материала можно представить в другом виде, используя подстановку  $c\rho = \lambda/a$ . В этом случае получим  $\lambda\sqrt{a}^{-1}$ , где  $a$  – коэффициент температуропроводности материала.

Рассмотрим теплонагруженность металлополимерных пар трения при температурах ниже и выше допустимой для материалов фрикционной накладки.

До температуры ниже допустимой для материала накладок пар трения тормоза преобладает, в основном, вынужденный конвективный теплообмен от поверхностей металлического фрикционного элемента. После превышения допустимой температуры для материала накладок пар трения тормоза уже преобладает лучистый теплообмен (перенос теплоты осуществляется электромагнитными волнами). В это время происходит выгорание связующих компонентов из приповерхностных слоев накладок. Идущая термохимическая реакция с точки зрения энергетики является слабой, так как она носит эндотермический характер. Согласно электронно-ионной теории о двойном электрическом слое в это время формируются два двойных электрических слоя. Первый – на полированной поверхности металли-



ческого фрикционного элемента и рабочих поверхностях накладок. Второй охватывает рабочие поверхности фрикционных накладок (которые не взаимодействуют с полированной поверхностью металлического фрикционного элемента) и нижний уровень их приповерхностного слоя. В то же время на контактных поверхностях пар трения происходит непрерывное образование «жестких» и «мягких» окисных пленок, частично экранируемых взаимным массопереносом, и являющимися соединительными мостиками термоэлементов в микротермобатареях. При этом зарождается тепловое равновесие между металлическими фрикционными элементами и его боковой стенкой или крепежным выступом из-за перераспределения теплоты между ними на основе темпов нагрева.

Однако, при этом необходимо учитывать условие теплового равновесия которое требует, как известно, наряду с постоянством температуры также и постоянства вдоль среды суммы  $\mu + U$ , где  $\mu$  – химический потенциал частиц, а  $U$  – их энергии во внешнем электрическом поле. В данном случае речь идет о равновесии по отношению к электронам, так что под  $\mu$  надо понимать их химический потенциал, а  $U = -e\varphi$ , где  $\varphi$  – потенциал электрического поля. Соответственно, этому электрический ток  $j_1$  и диссипативный поток энергии  $q'$  обращаются одновременно в нуль лишь при условиях  $\vartheta_1 = const$ ,  $\mu - e\varphi = const$ , т.е. при  $\nabla \vartheta_1 = 0$ ,  $\nabla \mu + eE = 0$ . Выражение для  $j_1$  и  $q'$  записывают в виде следующих соотношений, удовлетворяющих указанному условию:

$$E + \frac{1}{e} \nabla \mu = \frac{1}{\sigma} j_1 + \alpha \nabla \vartheta_1, \quad (1) \quad q' = q - \left(\varphi - \frac{\mu}{e}\right) j_1 = \alpha \vartheta_1 - \chi \nabla \vartheta_1, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – электрическая проводимость среды;  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – термоэлектрический коэффициент; соотношение между коэффициентами  $\nabla \vartheta_1$  в (1) и  $j_1$  в (2) – следствие принципа Онсагера. Величина  $(\varphi - \mu/e) j_1$ , вычтенная из полного потока энергии, представляет собой плотность конвективного потока энергии. Последнюю и необходимо учитывать при оценке термостабилизационного состояния металлического фрикционного элемента в тормозных устройствах.

Указанное стабилизационное тепловое состояние ободов поддерживается возникновением в элементарных объемах приповерхностных слоев фрикционных элементов множества микротермобатарей, создающих внешние и внутренние электрические поля с различными двойными электрическими слоями, и работающими в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников, а при преобладании внутреннего электрического поля происходит инверсия токов от приповерхностного слоя барабана в приповерхностные слои накладок.

**Выводы.** Таким образом, на основании нового подхода к методам теплового расчета контактно-импульсного фрикционного взаимодействия металлополимерных пар трения тормозных устройств проиллюстрировано, что на первом этапе необходимо знать особенности поведения материалов «металл-полимер» в оцениваемом интервале температур при действии на них механических, электрических и химических полей, генерируемых на пятнах контактов при электротермомеханическом трении.

#### Список литературы

1. Журавлев Д.Ю. Единое поле взаимодействия металлополимерных пар трения / Д.Ю. Журавлев // Проблемы трения и изнашивания: научн.-техн. сб. – К.: НАУ, 2013. Вып. 60 – С. 35–41
2. Лурье С. Прогноз механических и динамических свойств материалов с микро- и нано-структурной на основе градиентной теории сред / С. Лурье // Электронный журнал: Труды ИПРИМ РАН. – М., 2009. – 46с.

3. Євтушенко О.О. Методи дослідження контактної взаємодії термопружних тіл за умов локального тертя з урахуванням фрикційного нагрівання та зношування: дис. ... докт. фізико-математичн. наук 01.02.04 / Євтушенко Олександр Олексійович. – Львів, 2000. 342с.
4. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
5. Джанахмедов А.Х. Темпы нагревания металлополимерных пар трения при импульсном и длительном подводе теплоты в ленточно-колодочном тормозе [А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Д.А. Вольченко и др.] Проблемы трения и изнашивания: научн.-техн. сб. – К.: НАУ, 2013. Вып. 61. – С. 20-29.
6. Аскадский А.А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А.А. Аскадский, Ю.И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 248с.
7. Фрикционные узлы / [А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, П.Ю. Пургал, Д.А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах. Том 1. Кубанск. государств. технологич. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
8. Градиентные полимерные материалы / [А.А. Аскадский, Л.М. Голенева, К.А. Бычко и др.] Рос. хим.ж. (Журнал. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2001, т. XLV, №3. – С. 123–129.
9. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. редакцией А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
10. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография в 2 т. Т.1 / [А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, В.Я. Малык, П.А. Пояков]; под. общ. ред. А.А. Петрика. – Краснодар: Изд-во Кубанск. государств. технолог. ун-та, 2009.– 276с.
11. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография / Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Криштопа, [и др.]. – Кубанск. государств. технолог. ун-т. – Краснодар, Ивано-Франковск, 2013.– 441с.
12. Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 4) / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.] // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. Вип. 56. – С. 55–70.
13. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун и др. – М.: Наука, 1986. – 245с.

Стаття надійшла до редакції 11.12.2013

*В. Я. МАЛИК*

### МЕТОДИ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ КОНТАКТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ (частина I)

Розглянуті питання: методи теплотехнічних розрахунків та їх аналіз; особливості конструкцій фрикційних вузлів; основні електротермомеханічні процеси при терті; температури: термічної деструкції полімерних накладок і насичення і стабілізації металевих фрикційних елементів.

**Ключові слова:** методи теплового розрахунку, пари тертя, гальмівний пристрій, контакт-імпульсна фрикційна взаємодія, пляма контакту, металевий і неметалічний фрикційний елемент, елемент градієнтної теорії.

*V. Y. MALUK*

### METHODS OF THERMAL CALCULATION OF CONTACT-IMPULSE FRICTION INTERACTION (part I)

We've shown questions of: methods of thermal calculations and analysis, design features of friction pairs, the main electrothermalmechanic processes in friction; temperature: thermal degradation of polymer linings and saturation and stabilization of metal friction elements.

**Key words:** methods of thermal analysis, friction pairs, braking system, contact-impulse frictional interaction, spot contact, metallic and non-metallic friction element, the element of the gradient theory.

**Малик Володимир Якович** – канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазового обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.