

УДК 621.891

Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ, С. И. КРЫШТОПА, И. О. БЕКИШ, А. В. ВОЗНЫЙ,
О. Б. СТАДНЫЙ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ БУРОВЫХ ЛЕБЕДОК (часть первая)

Рассмотрена компьютерная модель пятен контакта микровыступов металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки при фрикционном взаимодействии с учетом параметров механического, электрического и теплового полей.

Ключевые слова: математическая модель, контакт микровыступов, пятна контакта, металлополимерные пары трения, компьютерная модель, поле: механическое, электрическое и тепловое, ленточно-колодочный тормоз

Введение. Электротермомеханическое трение в высоконагруженных металлополимерных парах ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки осуществляется при переменных скоростях скольжения и удельных нагрузках, в условиях генерируемых электрических токов и аккумулируемой теплоты с неравномерностью нагревания подповерхностных слоев пар трения «металл-полимер». При этом процессы, явления и эффекты, протекающие в подповерхностных слоях пар трения отличаются большой сложностью. Так, для поверхности каждого из тел в паре характерен высокий уровень неоднородности материалов и дефектов структур, масштабы которых соизмеримы с размерами пятен касания микровыступов, что оказывает влияние на электротермомеханическое трение. Оценка энергонагруженности поверхностей трения и ее влияние на основные процессы, явления и эффекты необходимы при решении задач обеспечения надежности фрикционных узлов [1, 2] путем увеличения ресурса как полимерных накладок, так и рабочих поверхностей металлических элементов.

Состояние проблемы. При контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения металлополимерных пар тормозных устройств элементы трения испытывают электротермомеханическое напряженно-деформируемое состояние, при этом происходит распределение электрических и тепловых полей возле зоны контактного взаимодействия. На макроуровне (внешние параметры) – это эксплуатационные параметры (скорость скольжения; податливость элементов пары трения и ее контактного стыка; коэффициенты статического и динамического взаимного перекрытия; удельные нагрузки; динамические коэффициенты трения; тормозной момент; температуры: вспышки, поверхностные, объемные и др.), определяются с учетом известных условий взаимодействия [1] и микроформы трущихся поверхностей. На микроуровне (внутренние параметры) – это фактически импульсно действующие: нормальные силы, удельные нагрузки, деформации и внутренние напряжения, электрические и тепловые токи и порождаемые ими поля, температуры в подповерхностных слоях и др., которые определяются на основании теории единого поля взаимодействия [2]. На наноуровне – рассматривают условия равновесия на энергетических уровнях при работе полимерной накладки (ее рабочего поверхностного слоя) в зоне температур, ниже и выше допустимой для ее материалов;

потенциальные барьеры в условиях равновесия при контактно-импульсном взаимодействии термоэлементов микротермобатарей в парах трения; контакты между микровыступами металлического элемента трения и полупроводниковыми пленками полимерной накладки; переходы типа p-n в микротермобатареях металлического элемента трения и полупроводниковыми пленками полимерных накладок; взаимодействия электрических и тепловых полей и др.

Понятие состояния взаимодействия пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения включает в себя напряженно-деформированное состояние и генерируемые электрические и тепловые токи на их поверхностях.

На макроуровне – это номинальные характеристики, определенные с учетом известных условий взаимодействия в макроформе поверхностей. На микроуровне – фактические импульсные удельные нагрузки, фактические механические электрические, тепловые и химические поля в поверхностных и подповерхностных слоях, омываемые скоростными токами компонентов сред, возникающие на поверхностях пятен контактов микровыступов при их взаимодействии.

Разрушение материала при трении обусловлено контактно-импульсным взаимодействием, сопровождающимся совместным действием механической, электрической и тепловой нагрузки. Это вызывает рост поверхностных температур и температурных градиентов, что приводит к значительным термическим напряжениям в металлическом элементе трения [3].

Термические напряжения, возникающие в элементах пары трения тормозов, являются следствием теплового удара, вызванного быстрым нарастанием температуры, которое сопровождается структурными изменениями в материалах пары трения [4].

Закономерности трения скольжения и процессов, явлений и эффектов, возникающих на пятнах контактов микровыступов и в зазорах между ними, зависят от динамики их нагревания (импульсного или длительного), характера формирования токов температурного поля и его развития. С другой стороны, наблюдаемые при трении процессы, явления и эффекты настолько взаимосвязаны, что сама тепловая задача не может быть рассмотрена в «чистом» (классическом) виде – как задача о формировании токов теплового поля и распределении теплоты в парах трения «металл-полимер» при заданных начальных и граничных условиях. Сложный комплекс разнородных, но взаимосвязанных механических, электрических, тепловых, химических и электромагнитных воздействий происходит как раз в «пространстве» «начально-граничных» условиях. В связи с этим тепловая задача трения должна рассматриваться в сложной взаимосвязи с состоянием поверхностей трения и с процессами, явлениями и эффектами на поверхностях и подповерхностных слоях пары трения «металл-полимер».

Компьютерное моделирование прочно заняло свое место в фундаментальных и прикладных науках, в частности, в исследовании механики и физики процессов микроконтактов металлополимерных пар трения тормозных устройств при электротермомеханическом трении и износе [4].

Наряду с аналитическими и экспериментальными методами применение компьютерного моделирования необходимо расценивать как равноправный метод. Расчет характеристик механического, электрического и теплового контактов с помощью математической модели имеет ряд преимуществ по сравнению с аналитическими методами. Расчет деформации каждого микровыступа позволяет более точно учесть особенности контактирования, по сравнению с аналитическим расчетом, связанным с усреднением его характеристик.

Попытки уточнения аналитических моделей за счет отказа от усредненных параметров и введения статистически распределенных характеристик единичных контактов приводят к сложным аналитическим выражениям, содержащим интегралы, которые не выражаются в элементарных функциях и могут быть рассчитаны только численно. Таким образом, теряются преимущества чисто аналитического метода и появляется необходимость использования частных численных решений.

Постановка задачи. В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к данной проблеме:

- влияние шероховатости металлополимерных пар ленточно-колодочных тормозов на их энергонагруженность;
- математическая модель электротермомеханического контакта микровыступов металлополимерных пар трения «шкив – накладки» ленточно-колодочного тормоза;
- особенности компьютерного моделирования энергонагруженности металлополимерных пар трения тормозных устройств.

Цель работы. Оценка энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки путем применения компьютерного моделирования с учетом механических, электрических и тепловых полей на пятнах контактов их микровыступов.

Влияние шероховатости металлополимерных пар ленточно-колодочных тормозов на их энергонагруженность. Дискретный контакт в металлополимерных парах трения тормозных устройств обусловлен постоянным изменением положения его элементарных участков. Последние представляют собой очаги «электрических» и «термических» неровностей с различными энергетическими уровнями. Микроконденсаторы, образованные на рабочих поверхностях пары трения «металл-полимер», являются источником энергии электрического поля. Кроме того, «электрические очаги» способствуют генерированию электрических токов с помощью сформированных микротермоэлектробатарей из материалов пары трения с различными механическими и физико-химическими свойствами. Это обуславливает их работу в режиме микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрочлодильников. В связи с этим одни участки поверхности трения нагреваются, а другие – охлаждаются. Трибоэффект при трении микровыступов рабочих поверхностей вызывает возникновение «термических» очагов. Они обладают более высоким энергетическим уровнем. В результате этого более разогретые локальные участки полимерной поверхности трения благодаря термическому расширению и податливости приподнимаются над остальной поверхностью и начинают воспринимать всю прикладываемую к фрикционному узлу нагрузку. Так продолжается до тех пор, пока износ этого участка поверхности не обусловит снижение его уровня. После чего снова происходит перераспределение нагрузки, которая приложена уже к другим, менее изношенным участкам поверхности. Износ микровыступов поверхности трения сопровождается не только перераспределением нагрузки, но и переполаризацией из-за изменения направления микротермотоков. Все это влияет на интенсивность процессов нагревания и вынужденного охлаждения элементов трения фрикционного узла.

В нетрадиционном ленточно-колодочном тормозе [2], в котором фрикционные накладки находятся на тормозном шкиве, а тормозная лента выполняет

функции металлического фрикционного элемента, особые требования предъявляются к их обработке. Обработанная рабочая поверхность тормозной ленты и шкива, как бы она ни была совершенна, имеет отличия профиля поверхностей от геометрической формы, заданной чертежами деталей. Для данных фрикционных узлов в чертежах не указывается требуемое направление следов обработки, которое оказывает влияние на фрикционные свойства контакта. Согласно работы [5] различают макроотклонения (нерегулярное отклонение поверхности от правильной геометрической формы), волнистость (более или менее периодические макроотклонения от геометрической формы детали, представляющие собой практически равные по размерам возвышения и впадины) и шероховатость (макроотклонения геометрического профиля волнистой поверхности от геометрической формы). И. В. Крагельский на основе молекулярно-механической теории трения обосновал и показал экспериментально, что по мере снижения шероховатости от грубой поверхности до зеркально гладкой, импульсная сила трения сначала уменьшается, затем остается постоянной, а при низкой шероховатости увеличивается. Однако известно, что для снижения деформационной составляющей трения, вызывающей искажение микропрофиля выступов, надо уменьшить высоту микронеровностей и увеличить опорную площадь поверхности, которая подвержена воздействию импульсных нормальных усилий, что приведет к уменьшению удельных нагрузок в зоне контакта, и как следствие, к снижению ее поверхностных температур. В то же время для снижения адгезионной составляющей трения надо, наоборот, увеличить высоту микронеровностей и уменьшить опорную площадь поверхности, что незамедлительно приведет к возникновению больших удельных нагрузок и высоких локальных ее поверхностных температур.

В нетрадиционном ленточно-колодочном тормозе за цикл торможения изменение шероховатости при приработке осуществляется за счет контактирования мягкого фрикционного материала, т.е. внешней и внутренней поверхностей фрикционных накладок (НВ 12 – 45) с твердым, т.е. внутренней поверхностью тормозной ленты и рабочей поверхностью тормозного шкива (НВ 207 – 250). Это обусловлено подстройкой шероховатости поверхностей накладок под шероховатость поверхностей металлических фрикционных элементов. На внешних фрикционных узлах тормоза это вызвано «пропахиванием» внешних поверхностей фрикционных накладок (мягкого материала) внедрившимися микронеровностями внутренней поверхности тормозной ленты (твердого материала) и превращением пластических деформаций в зоне фрикционного взаимодействия в упругие.

На поверхностях внутренних пар трения происходит следующее. При относительном перемещении микронеровности рабочей поверхности обода шкива, скользя по внутренним поверхностям фрикционных накладок, отесняют ее материал, образуя перед собой волны (валики). В связи с большими размерами номинальной площади соприкосновения внутренних пар трения образуются десятки волн, по которым происходит их контактирование. Волны в общем случае имеют форму вытянутых эллипсоидов. При контакте волны подвержены в основном упругой деформации, а микронеровности, расположенные на них – упругой и пластической деформации. При упругих деформациях в процессе приработки в зонах взаимодействия внешних и внутренних пар трения тормоза вследствие изнашивания их поверхностей разрушаются те микронеровности, которые подвержены наибольшему силовым воздействием (когда фрикционные

накладки попадают под набегающую ветвь тормозной ленты). За процессами износа рабочей поверхности обода шкива следуют процессы зарождения и развития сетки трещин, которые сопровождаются тремя стадиями протекания:

- образование сетки трещин на фрикционной поверхности взаимодействия за счет электрических и тепловых токов, сопровождающихся их электрическими и тепловыми разрядами, поверхностными температурными градиентами по ширине обода шкива, процессами термоэлектростимулированной и электростимулированной поляризации и деполяризации пятен контактов микровыступов пар трения;

- рост трещин по длине и вглубь, а также слияние некоторых из них в рабочих слоях обода шкива под действием ослабевающих переменных удельных нагрузок, вызывающих пластические деформации поверхностных и подповерхностных слоев обода, а также температурных градиентов на них, вызванных аperiodическим протеканием процессов нагревания и вынужденного охлаждения поверхностных и подповерхностных слоев с неодинаковым поперечным сечением по периметру обода шкива;

- хрупкий разрыв обода шкива, происходящий, как правило, при больших термических напряжениях, развивающихся при положительных или отрицательных температурах окружающего воздуха, а механический разрыв – при 50-60 % -ом износе от допустимой величины рабочей поверхности обода.

В дальнейшем появляются новые микронеровности, как на внешних так и внутренних поверхностях пар трения тормоза, отличающиеся по своим размерам и форме от изношенных, вызывающих меньшее силовое воздействие. Такое взаимодействие поверхностей внешних и внутренних пар трения тормоза по истечении некоторого времени работы приводит к появлению установившейся шероховатости, которая в течении определенного промежутка времени не изменяется. Установившаяся шероховатость соответствует минимально возможным, в данных условиях, динамическим коэффициентам трения. Поэтому необходимо исходить из того, что чистота обработки рабочей поверхности тормозной ленты должна быть как минимум на два класса выше, чем рабочей поверхности обода шкива. Это технологическое решение не приведет к нарушению условия работоспособности нетрадиционного ленточно-колодочного тормоза, когда f_2 (динамический коэффициент трения во внутренних фрикционных узлах) будет больше f_1 (динамический коэффициент трения во внешних фрикционных узлах). При этом высота микронеровностей поверхностей трения внешних и внутренних фрикционных узлов тормоза допускается до 1,5 – 3,8 мкм.

Математическая модель электротермомеханического контакта микровыступов металлополимерных пар трения «шкив – накладки» ленточно-колодочного тормоза. Математическая модель электротермомеханического контакта формируется из характеристик, полученных из механических, электрических и тепловых полей, имеющих место на пятнах микровыступов.

Метод оценки внешних и внутренних параметров узлов трения при испытании в стендовых условиях, при которой механические системы объектной и модельной структуры, состоящие из подсистем, при их контактно-импульсном электротермомеханическом фрикционном взаимодействии, находящимся во взаимодействии с конструктивными особенностями, линейным или полиномиальным законами изменения тахограмм металлического фрикционного элемента пары трения, а также со скоростной, силовой, электрической, тепловой и хи-

мическими характеристиками узла трения, составляющими его единое поле энергетического взаимодействия при условии, что между внешними и внутренними параметрами «объекта» и «модели» обеспечиваются следующие соотношения:

- отношения масс объекта (M) и модели (m) равно: $M/m = C_m = C_L^2$;
- отношение линейных размеров объекта (L) и модели (l) равно геометрическому масштабному подобию: $L/l = C_L$;
- отношение полированных площадей объекта (S_n) и модели (s_n) равно $S_n/s_n = C_{S_n} = C_{L_n}^2$;
- отношение матовых площадей объекта (S_m) и модели (s_m) равно $S_m/s_m = C_{S_m} = C_{L_m}^2$;
- отношение физико-механических параметров материалов: коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, температур и их градиентов, коэффициентов теплоотдачи; твердость, модуль упругости, предел прочности, сопротивление срезу и т.д. объекта (Φ) и модели (ϕ) равно $\Phi/\phi = C_\Phi = 1,0$;
- отношение внешних сил, действующих на элементы пары трения, объекта (F) и модели (f) равно $F/f = C_F = C_L^2$;
- отношение времени протекания исследуемых процессов, явлений и эффектов в объекте (ζ) и модели (τ) равно $\zeta/\tau = C_\tau = 1,0$, которое соблюдаются при следующих допустимых внешних параметрах:
 - отношение натяжений набегавшей ветви (S_n) к натяжению сбегавшей ветви (S_c) тормозной ленты составляет $S_n/S_c \leq [n]$;
 - удельные нагрузки (p) не превышают допустимой величины для материалов фрикционной накладки;
 - изменение динамического коэффициента трения (f) колеблется от 0,2 до 0,5;
 - поверхностные температуры фрикционной накладки не превышают допустимой для ее материалов;
- обод шкива не попадает в зону термостабилизационного состояния, отличающийся тем что закономерности изменения линий токов силового, электрического, теплового и химического полей, характеризуются внутренними и внешними параметрами, во взаимодействии с линиями токов скоростного поля омывающих сред подчиняется волновой природе со сдвигом по фазе и описываются отвечающими ей зависимостями при соблюдении следующих отношений:
 - отношение высоты микровыступов фрикционных поверхностей объекта (H) и модели (h) равно $H/h = C_H = 1,0$;
 - отношение длины микровыступов фрикционных поверхностей объекта (L_M) и модели (l_M) равно $L_M/l_M = C_{L_M} = 1,0$;
 - отношение площадей пятен контактов микровыступов фрикционных поверхностей объекта (A_o) и модели (A_m) равно $A_o/A_m = C_{A_o} = 1,0$;
 - отношение импульсных нормальных усилий объекта (N) и модели (n) равно $N/n = C_N = 1,0$;
 - отношение линейных скоростей скольжения объекта (V) и модели (v) равно $V/v = C_V = 1,0$;
 - отношение импульсных сил трения объекта (F_T) и модели (f_T) равно $F_T/f_T = C_{F_T} = 1,0$;

- отношение импульсных динамических коэффициентов трения объекта (f_o) и модели (f_m) равно $f_o/f_m = C_{fo} = 1,0$;
- отношение импульсных удельных нагрузок объекта (p_o) и модели (p_m) равно $p_o/p_m = C_{po} = 1,0$;
- отношение импульсных тормозных моментов объекта (M_o) и модели (M_m) равно $M_o/M_m = C_{Mo} = 1,0$;
- отношение податливости стыков подсистемы «тормозная лента – нерабочие поверхности накладок» объекта (Π_{o1}) и модели (Π_{o2}) равно $\Pi_{o1}/\Pi_{o2} = C_{\Pi o1} = 1,0$;
- отношение податливости стыков подсистемы «рабочая поверхность накладки – поверхность обода шкива» объекта (Π_{o3}) и модели (Π_{o4}) равно $\Pi_{o3}/\Pi_{o4} = C_{\Pi o3} = 1,0$;
- отношение амплитуд колебаний связей механических подсистем и деформаций микронеровностей объекта (A) и модели (a) равно $A/a = C_A = 1,0$;
- отношение частот колебаний объекта (Ω) и модели (ω) равно $\Omega/\omega = C_\Omega = 1,0$;
- отношение энергетических уровней подповерхностных слоев объекта ($\mathcal{E}'_o$) и модели ($\mathcal{E}'_m$) равно $\mathcal{E}'_o/\mathcal{E}'_m = C_{\mathcal{E}'_o} = 1,0$;
- отношение токов скоростей омывающего воздуха объекта (V_ϕ) и модели (v_ϕ) равно $V_\phi/v_\phi = C_{V\phi} = 1,0$;
- отношение токов скоростей компонентов омывающих сред объекта (V_c) и модели (v_c) равно $V_c/v_c = C_{Vc} = 1,0$ и при этом соблюдается в открытой термодинамической системе трибосопряжения равенств не только поверхностных температур, но и равенств химических потенциалов при вынужденном конвективном теплообмене его подсистем:
 - наружная поверхность обода шкива – скоростные токи охлаждающего воздуха;
 - внутренняя поверхность обода шкива – скоростные токи компонентов омывающей среды;
 - поверхностный и подповерхностный слой полимерной накладки – скоростные токи компонентов омывающей среды, а взаимодействие подсистемы «обод тормозного шкива – крепежный выступ – фланец барабана лебедки» осуществляется кондуктивным теплообменом за счет температурных градиентов по их толщине, после чего производятся измерение и определение параметров трибосопряжения с одновременным контролем и фиксацией площадей пятен контактов микровыступов в реальном масштабе времени, поскольку электротермическое сопротивление дискретных контактов с различной энергетической активностью микро-конденсаторов и термобатарей с мгновенным их переключением при изменении площадей пятен контакта микровыступов при соблюдении условий на первой стадии фрикционного взаимодействия ($A_r < A_a$), что фактическая площадь контактирования (A_r) мала по сравнению с номинальной (A_a) производится суммирование составляющих генерируемых токов, а при $A_a = A_r$ фиксируется трибоЭДС в сопряжении с переменным градиентом механических свойств его материалов и при этом темп проникновения взаимодействующих между собой импульсов электрического и теплового токов влияет на интенсивность износа микровыступов при переполаризации, а величины тепловых токов на пятнах контактов микровыступов определяется формулой:

$$t_{\text{общ}} = t_{II} + t_{\text{всн}} + t_I, \quad (1)$$

где t_{II} – поверхностная температура от трения и контактного сопротивления, вызванная генерируемыми токами на пятнах контактов микровыступов, а также фрикционной составляющей; $t_{всп}$ – температура вспышки, вызванная разрядными токами между микровыступами; t – объемная температура, вызванная действием первых двух составляющих температур, а также зависит от джоулевой теплоты.

Температура t_{II} определяется из условия действия двух источников теплоты (электрического и фрикционного) в зоне трения

$$t_{II} = \frac{0,942q_0k}{\lambda_1} \sqrt{\frac{k_m d_{cp}}{\pi V}}, \quad (2)$$

где $q_0 = \frac{1}{A_r} \left[I^2 \left(\frac{\rho \sqrt{HB}}{\sqrt{\pi N}} + \frac{\sigma HB}{N} \right) + fNV \right]$ – тепловой поток на контактной по-

верхности с учетом электрической и фрикционной составляющих, Вт/м²; A_r – фактическая площадь касания, мм²; I – генерируемый ток в парах трения, А; ρ – удельное сопротивление контактных материалов, Ом·мм²/м; HB – приведенная твердость по Бринеллю контактных материалов, МПа; N – импульсное нормальное усилие, действующее в зоне контакта материалов, Н; σ – удельное сопротивление пленок на контакте, Ом·мм²/м; f – динамический коэффициент трения; V – скорость скольжения, м/с; k – приведенный коэффициент распределения теплового потока; k_m – коэффициент распределения теплового потока, попадающего в металлический фрикционный элемент; λ_1 – приведенный коэффициент теплопроводности материалов пар трения, Вт/(м·°C); d_{cp} – средний диаметр пятна контакта, определяемый с учетом реальной его шероховатости, мм.

Температурную вспышку $t_{всп}$ определяется по зависимости вида:

$$t_{всп} = \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \frac{fNd_{cp}}{A_r \lambda_1 \left[4 + (\pi Pe)^{\frac{1}{2}} \right]}, \quad (3)$$

где A_r – фактическая площадь контакта, которая представляет собой сумму элементарных пятен касания, мм²; $Pe = \frac{V \cdot d_{cp}}{a}$ – критерий Пекле; a – приведенный коэффициент температуропроводности материалов пар трения, м/с².

Объемная температура металлического фрикционного элемента определяется из условия равенства тепловых потоков на контактной поверхности с учетом электрической и фрикционной составляющей и между тем что отводится от его полированной поверхности к скоростным токам компонентов омывающей среды:

$$t = \frac{4I^2 \rho}{\pi^2 d_{cp}^3 k_m \cdot 10^2}, \quad (4)$$

и в конечном итоге общая температура контактных поверхностей металлополимерных пар трения равна

$$t_{общ} = \frac{0,942q_0k}{\lambda_1} \sqrt{\frac{k_m d_{cp}}{\pi V}} + \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \frac{fNd_{cp}}{A_r \lambda_1 \left[4 + (\pi Pe)^{\frac{1}{2}} \right]} + \frac{4I^2 \rho}{\pi^2 d_{cp}^3 k_m \cdot 10^2}, \quad (5)$$

по составляющих, которыми оцениваются энергетические уровни поверхностных и подповерхностных слоев металлополимерных пар трения тормоза.

Максимальные сжимающие напряжения $\sigma_{1\max}$ в ободе шкива будут на его рабочей поверхности и они равны алгебраической сумме составляющих:

$$\sigma_{1\max} = \sigma_k + \sigma_1 + \sigma_2, \quad (6)$$

где $\sigma_k, \sigma_1, \sigma_2$ – напряжение в ободе шкива от действия: удельных нагрузок в парах трения; температурных градиентов на его рабочей поверхности; объемной температуры: крепежного выступа ($t_{\text{с}}$) и обода шкива ($t_{\text{об}}$) при условии ($t_{\text{об}} > t_{\text{с}}$)

$$\sigma_k = \frac{N}{2\pi k_{\text{сз}} B \delta}, \quad (7)$$

где $k_{\text{сз}}$ – коэффициент взаимного перекрытия пар трения; B, δ – ширина и толщина обода шкива.

$$\sigma_1 = \frac{\alpha E (t_1 - t'_1)}{2(1 - \mu)}, \quad (8)$$

где α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости; t_1, t'_1 – температуры: рабочей и внутренней поверхности обода шкива; μ – коэффициент Пуассона.

$$\sigma_2 = \frac{\alpha E (t_{1\text{ср}} - t_{2\text{ср}})}{1 + A_1 / A_2}, \quad (9)$$

где $t_{1\text{ср}}, t_{2\text{ср}}$ – объемная температура крепежного выступа и фланца барабана; A_1, A_2 – площади поперечных сечений крепежных выступов обода и фланца барабана.

Для более точного определения составляющих σ_1 и σ_2 в зависимость (3) вместо $(t_1 - t'_1)$ можно представить слагаемое $\tau \left(\frac{\partial t_1}{\partial \tau_1} - \frac{\partial t'_1}{\partial \tau'_1} \right)$ (где τ – время торможения; τ_1, τ'_1 – время достижения температур t_1 и t'_1) которое характеризует темп нагревания обода шкива, а в зависимость (9) вместо $(t_{1\text{ср}} - t_{2\text{ср}})$ – $\delta_{\text{ср}} \left(\frac{\partial t_{1\text{ср}}}{\partial \delta_1} - \frac{\partial t_{2\text{ср}}}{\partial \delta_2} \right)$ (где $\delta_1, \delta_2, \delta_{\text{ср}}$ – толщины: крепежного выступа; фланца барабана; их средняя величина), которая характеризует температурные градиенты по толщине рассматриваемых элементов.

Зарождение и развитие трещин на рабочей поверхности ободов тормозных шкивов оценивается коэффициентом сопротивления тепловому удару:

$$S = \delta_0 / \delta, \quad (10)$$

где δ_0, δ – напряжения: сопротивления трещинообразованию.

Исходные предпосылки модели следующие: материалы пятна контакта микровыступов однородны и изотропны; контакт носит дискретный характер и происходит по вершинам отдельных микровыступов шероховатостей, деформация микровыступов имеет упругий характер и описывается зависимостью Герца для контакта двух криволинейных гладких тел с первоначальным касанием в точке; размеры единичных пятен контакта малы по сравнению с размерами зоны взаимодействия и радиусами кривизны микровыступов в точке касания; в зоне кон-

такта действуют только импульсные нормальные силы и силы трения; распределение пятен контакта по поверхности пар трения равномерное. Исходными данными для расчета являются характеристики микрогеометрии поверхностей – максимальная высота выступов над средней линией профиля R_p и максимальный радиус закругления выступов $r_{\max}$; физико-механические характеристики материала – модуль упругости (модуль Юнга) E , коэффициент Пуассона μ , удельное электрическое сопротивление материала ρ ; эксплуатационные характеристики, импульсная нормальная сила, сжимающая контакт.

В табл. 1 представлены основные зависимости для расчета характеристик единичного контакта двух сферических микровыступов пятна контакта.

Таблица 1

Механические и электрические характеристики пятна контакта двух сферических микровыступов металлополимерных пар трения

Название параметра		Расчетная зависимость
Радиус единичного пятна контакта		$a = (0,75Nr / E)^{2/3}$; (1)
Деформация контактирующих микровыступов		$\delta = \frac{a^2}{r} = \left[(0,56N^2 / (rE^2)) \right]^{0,25}$; (2)
Удельная нагрузка на пятне контакта микровыступов	максимальная	$P_1 = \left(\frac{6NE^2}{\pi^2 a^2} \right) = 1,5N / (\pi a^2)$; (3)
	средняя	$P_2 = 0,66P_1 = N / (\pi a^2)$; (4)
Приведенный модуль Юнга		$1/E = (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2$. (5)
Сила тока		$I = \sqrt{\frac{t_{\max} \cdot \alpha_T \cdot l_k}{R_k \cdot \rho}}$. (6)

В табл. 1 в зависимости 6 применены следующие условные обозначения:

$t_{\max}$ – максимальная температура на пятне контакта микровыступов, °C;

α_m – коэффициент внешней теплоотдачи, Вт/(м²·°C);

R_k – термическое сопротивление контакта, °C/Вт;

ρ – удельное электрическое сопротивление, (Ом·мм²)/м;

l_k – длина контакта, мм.

Особенности компьютерного моделирования энергонагруженности металлополимерных пар трения тормозов. Компьютерная модель практически реализована в виде Windows-приложения, написана на языке C++ с использованием библиотеки классов Borland. Программно модель входит в основной расчетный модуль, в который включена оценка внешних и внутренних параметров металлополимерных пар трения на макро-, микро- и наноуровнях.

Кроме основного, есть дополнительный модуль, отвечающий за удобство представления данных и пользовательский интерфейс. Результатом работы являются эксплуатационные характеристики контакта, представленные в виде таблицы. Для большей наглядности на основе предложенных формул предусмотрена возможность строить графики зависимостей характеристик контакта от внешних факторов, которыми являются токи омывающего воздуха и компонентов смесей.

В рамках компьютерной модели расчет характеристик контакта происходит следующим образом. Генерируется пара случайных чисел, распределенных по заданному закону, соответствующих высоте и радиусу выступа шероховатой поверх-

ности. Логику работы программы иллюстрирует блок-схема основного расчетного модуля для параметров механического, электрического и теплового полей (рис. 1).

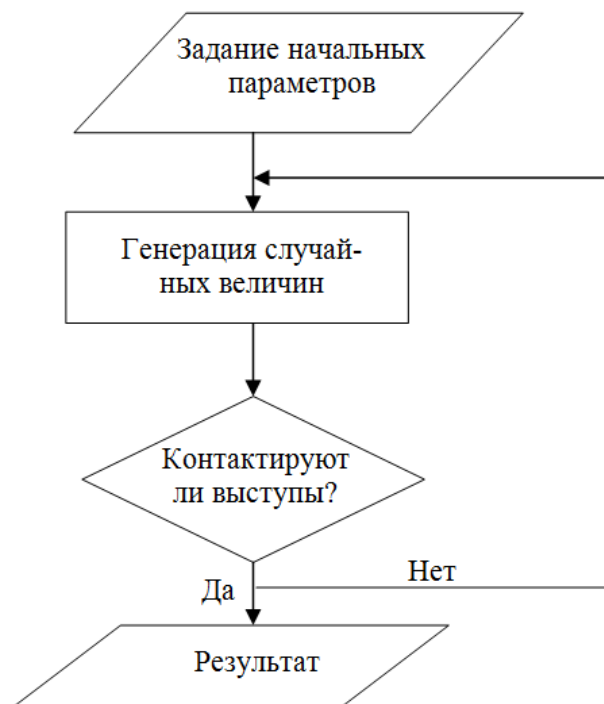


Рис. 1. Блок-схема основного расчетного модуля

Программа связана с базой данных MS Access, состоящей из двух таблиц, каждая из которых включает в себя 33 поля. Первая таблица содержит значения исходных промежуточных данных, а вторая – значения результатов. Таблицы используются для построения графиков.

При этом первое поле каждой таблицы зарезервировано для проверенной начальной комбинации исходных параметров и используется только в начале работы и только для чтения. Прежде всего программа считывает начальную комбинацию исходных параметров из базы данных и дополняет этими значениями поля исходных данных. Затем пользователь редактирует их, выполняет расчет, после чего заполняется таблица значений и по ней строится график.

Адекватность модели проверялась путем сравнения результатов моделирования с данными работ других авторов, полученными на основании аналитических моделей для некоторых частных случаев [6, 7].

Выводы. Таким образом, в данном материале рассмотрены общие принципы компьютерного моделирования энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки с учетом механических, электрических и тепловых полей на пятнах контактов микровыступов при их фрикционном взаимодействии.

Список литературы

1. Контактно-импульсное взаимодействие материалов типа «металл-металл» и «полимер-полимер» в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, С. И. Крыш-

топа, Д. Ю. Журавлев, Н. М. Стебелецкая // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2013. – №5(2). – С.29 – 41.

2. Темпы нагрева металлополимерных пар трения при импульсном и длительном подводе теплоты в ленточно-колодочном тормозе / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, Н. М. Стебелецкая // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. – 2013. – №2(61). – С20 – 30.

3. Джанахмедов А. Х. Нефтяная трибология / А. Х. Джанахмедов - Баку: Элм, 2003. – 326 с.

4. Диплом №462 на открытие «Закономерности изменения износофрикционных характеристик поверхностных слоев металлополимерных пар трения при их контактно-импульсном взаимодействии» от 28.12.2013г. авторов: А. И. Вольченко, А. М. Пашаев, А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, С. И. Крыштопа. – М.: Международный акад. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А – 588 от 07.09.2013 г.

5. Демкин Н. Б. Зависимость эксплуатационных свойств фрикционного контакта от микрогеометрии контактирующих поверхностей // Н. Б. Демкин, В. В. Измайлов. Трение и износ. – 2010. – Т. 31. № 1. – С. 68 – 77.

6. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин. // Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

7. Измайлов В. В. Контакт твердых тел и его проводимость // В. В. Измайлов, М. В. Новоселов – Тверь: Из-во ТГТУ, 2010. – 112 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2014

*Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ, С. І. КРИШТОПА, І. О. БЕКІШ, А. В. ВОЗНИЙ,
О. Б. СТАДНИК*

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНОСТІ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ПАР ТЕРТЯ СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ БУРОВИХ ЛЕБІДОК (частина перша)

Розглянута комп'ютерна модель плям контактів мікрОВиступів металополімерних пар тертя стрічково-колодкового гальма бурової лебідки при фрикційній взаємодії з урахуванням параметрів механічного, електричного та теплових полів.

Ключові слова: математична модель, контакт мікрОВиступів, плями контакту, металополімерні пари тертя, комп'ютерна модель, поле: механічне, електричне та теплове; стрічково-колодкове гальмо.

*D. Yu. ZHURAVLEV, S. I. KRYSHTOPIA, I. O. BEKISH, A. V. VOZNYI,
O. B. STADNYK*

**COMPUTER SIMULATION OF THE ENERGY LOADING OF THE
METAL-POLYMER FRICTION PAIRS OF THE BAND-BLOCK
BRAKES OF THE DRAW-WORKS (part one)**

The article examines a computer model of the spots of the micro-projection contacts of the metal-polymer friction pairs of the band-block brake of draw-works during the friction interaction, taking into account the parameters of the mechanical, electrical and thermal fields. During the contact-impulse interaction of the micro-projections of the friction surfaces of the metal-polymer pairs of the braking devices, the friction elements feel the electrothermalmechanical and strained and distorted state and we've observed the distribution of the electric and thermal fields near the contact interaction area. The calculation characteristics of the mechanical, electrical and thermal contacts by means of the mathematical model has several advantages in comparison with the analytical methods. Thus, the deformation calculation of each micro-projection can more accurately take into account the peculiarities of the contact than during the analytical calculation that is related to the averaging of its characteristics. The discrete contact in the metal-polymer friction pairs of the braking devices depends on the constant position change of its basic sites. The latter turn out to be the centers of the electrical and thermal inequalities with different energy levels. The mathematical model of the electrothermalmechanical contact is formed of the characteristics received from the mechanical, electrical and thermal fields that occur on the micro-projection spots.

Keywords: mathematical model, micro-projection contact, contact spots, metal-polymer friction pairs, computer model, field (mechanical, electrical and thermal), band-block brake.

Журавльов Дмитро Юрійович – канд. техн. наук, доцент кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019.

Криштопа Святослав Ігорович – канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазового технологічного транспорту, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019.

Бекіш Ірина Орестівна – канд. техн. наук, доцент кафедри інженерної графіки Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019.

Возний Андрій Володимирович – аспірант кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019.

Стадник Олег Богданович – аспірант кафедри механіки машин, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019.