

## АКСИОМАТИКА ФЕНОМЕНА ТРЕНИЯ КАК ОСНОВНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ ЕГО ИЗУЧЕНИЯ

Fedorov S.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kaliningrad State Technical University»,  
Kaliningrad, Russia (fedorov@kltgu.ru)

### AXIOMATICS OF THE PHENOMENON OF THE FRICTION AS MAIN METHODOLOGY OF ITS STUDYING

*В статье рассматриваются возможности аксиоматического метода анализа процесса трения. Обсуждаются некоторые исходные аксиомы трения, присущие современным знаниям трибологии. Предлагаются аксиомы, вытекающие из анализа существа трения как глобального, балансового феномена трансформации движения (энергии) как такового. Рассматриваются представления о пластической деформации как основном механизме трансформации и диссипации энергии. Предлагается термодинамический анализ процесса трения и его основные выводы. Рассматривается физическое существо коэффициента трения как основного параметра процесса трения.*

*Ключевые слова:* аксиома, трение, движение, энергия, трансформация, диссипация, баланс, деформация, коэффициент трения

**Введение.** Современная трибология, признанная как междисциплинарная (общеинженерная) область знаний, сегодня уже распадается на ряд самостоятельных научных направлений – трибомеханику, трибофизику, трибохимию, трибоматериаловедение, трибобиологию и т.д. Материалы международного конгресса по трибологии 2009 г. в Киото (Япония) акцентируют наше внимание уже на новые и узкодифференцированные направления в трибологии: экотрибологию, геотрибологию, пищевую трибологию, трибологию здоровья, плазматрибологию, эксплуатационную трибологию, процессную трибологию, микротрибологию и нанотрибологию.

Естественно, это есть следствие самого феномена трения, как сложного межграничного явления, который проявляет себя эффектами различной физической природы – механическими, тепловыми, электрическими, магнитными, химическими, биологическими и др. Однако применение различных частных физических моделей трения сформировало на сегодня множество столь же различных взглядов и мнений, которые трудно воспринимаются все вместе, ибо это колоссальный объем информации. Особенно это проблематично, учитывая общеинженерную важность трибологии.

Как научная проблема трибологии, цель которой есть поиск общего, так и проблема преподавания трибологии как новой науки и учебной дисциплины требует от исследователя и педагога применения строго научных и традиционно методических приемов в изложении материала. Всякой науке как таковой свойственно иметь логические цепочки доказательств, которые физически естественно соединяют и объединяют все разделы и приложения науки в единое, доказуемое целое. Это стандартный принцип научности.

В этой связи весьма плодотворно и насущно применение аксиоматического метода. Аксиоматический метод, способ построения научной теории, при котором в ее основу кладутся некоторые исходные положения (суждения) – аксиомы, или постулаты, из которых все остальные утверждения этой науки (теоремы) должны выводиться чисто логическим путем, посредством доказательств.

**Исходные или нулевые аксиомы трения.** Центральными понятиями современной трибологии как науки о феномене трения являются понятия об обобщенной модели трения и соответственно о трибосистеме. Что принять здесь в качестве исходного, чтобы развивать далее логические цепочки доказательств?

Видится рациональным следующее. С одной стороны, сегодняшний анализ совокупного множества современных исследований по трению можно представить в виде трех тезисов (возможны и другие) существенного свойства, которые принимаются многими исследователями как бесспорно доказанными относительно наиболее характерных свойств обобщенной модели. А именно:

1. Трение - явление сопротивления относительно перемещению (движению) поверхностей, локализованное в точках контакта по касательной к ним;
2. Трение - процесс преобразования (трансформации) энергии внешнего механического движения в другие виды энергии, и в основном, в тепловую;

### 3. Трение - процесс упругопластической деформации и разрушения, локализованный в тонких поверхностных слоях материалов пары трения.

Эти три тезиса можно рассматривать как исходные аксиомы трения и назвать нулевыми аксиомами трения, как суть отсчета, от которого далее возможно развивать аксиоматический анализ процесса трения обобщенного инженерного свойства.

В качестве аксиоматического метода дальнейшего исследования, указанных выше исходных аксиом трения, автор считает целесообразным применять метод эргодинамики деформируемых тел [1-4], который на сегодняшний день по своей фундаментальности теоретических, экспериментальных и практических обоснований возможно и целесообразно использовать как метод именно аксиоматический, т.е. метод, которому можно доверять.

Эргодинамика деформируемых тел, как комплексная теория, представляет собой синтез наиболее общих законов термодинамики необратимых процессов, молекулярной кинетики (термоактивационный анализ) и теории дислокаций в их взаимной диалектической связи на базе основного закона природы - закона о сохранении энергии при ее превращениях.

**Трибосистемы номинальные и действительные.** Полагая, что наиболее совершенной или же номинальной трибосистемой являются естественные трибосистемы, созданные самой природой в результате длительной эволюции трансформаций движения материи, а реальные или действительные машинные трибосистемы и собственно трение в них лишь наша попытка приблизить их к истинным и номинальным, то здесь самой первой аксиомой можно положить аксиому о сути рациональности трибосистемы, как следствия трансформации движения как такового. В обратном направлении данная мысль должна иметь следующий логический вывод – исследование основных закономерностей трения следует осуществлять именно в аспекте анализа общих закономерностей движения и его трансформаций в самой трибосистеме. Следовательно, можно выявить первые аксиомы относительно существования трибосистемы:

**1. Номинальной трибосистемой является трибосистема, созданная в результате естественных эволюционно-трансформационных процессов движения в природе;**

**2. Действительной трибосистемой является все совокупное множество систем с трением, как целесообразность машинного элемента, созданных человеком при его активной деятельности.**

**Балансовый и единичный признак трения.** Учитывая, что основным признаком всякой системы является признак баланса, то рамки трибосистемы следует определять рамками соблюдения, например, энергетического баланса трения. Следовательно, основное уравнение для трибосистемы это уравнение энергетического баланса, характеризующее обобщенно и количественно движение в системе трения. Составляющие этого баланса должны определять основные количественные закономерности трансформации энергии (и движения) в этой системе.

Таким образом, **трибосистема в наиболее общем смысле количественно характеризуется уравнением энергетического баланса.** Наиболее общие количественные закономерности поведения (состояния) трибосистемы обусловлены величинами соотношений между составляющими энергетического баланса трения. Эти положения также можно принимать как аксиомы трения. Соответственно этому можно показать справедливость уравнения баланса энтропии, а значит и информации и др.

Учитывая, что наиболее **характерной величиной** самого глобального принципа баланса является **единица (целое)**, то, следовательно, и основные параметры трибосистемы (трения), выраженные как показатели соотношений между составляющими баланса, должны также иметь критериальные (предельные) величины, равные единице.

**Основной механизм трансформации и диссипации энергии при трении.** Несмотря на многообразие проявлений трения и частных механизмов его протекания, в современной трибологии отчетливо проводится мысль, что главным активирующим фактором самого трения и всех явлений, сопутствующих ему (адгезия, фазовые превращения, химические реакции, собственно износ, явления тепловой, электрической и магнитной природы и т.д.), является упругопластическая деформация. И это есть свидетельство того, что **между отдельными проявлениями трения различной физической природы и процессом упругопластической деформации существует глубокая взаимная связь.** Следовательно, при описании процесса трения как процесса упругопластической деформации существует реальная объективная возможность описания этой общей феноменологической моделью и частных проявлений трения, и соответственно трансформации самой этой модели трения в некоторые частные модели трения.

С другой стороны, современные исследования процесса трения указывают на существование глубокой взаимной связи между закономерностями упругопластической деформации и закономерностями преобразования (диссипации) энергии при трении. Исследования этой взаимной связи в рамках энергетических представлений и исследований трения и износа [5-11 и др.] доказали ее фундаментальность.

Поэтому, основываясь на современных достижениях в изучении феномена трения, целесообразно и плодотворно принять к рассмотрению в качестве модели трения модель упругопластической деформации, локализованной в тонких поверхностных слоях материалов пары трения. Эту **модель упругопластической**

**деформации можно рассматривать как обобщенную сущностную модель трения - модель преобразования (трансформации) энергии внешнего относительного механического движения при трении.**

Принятие модели упругопластической деформации в качестве обобщенной модели трения, естественно, предполагает возможность обобщения этой моделью всех возможных частных механизмов (каналов) диссипации энергии при трении, присущих частным отдельным моделям трения, которые в совокупности определяют общий эффект рассеяния энергии трением.

Однако здесь сразу возникает вопрос: как согласовать модель упругопластической деформации с отдельными частными эффектами трения (каналами диссипации энергии), которые отражены в различных, современных моделях трения и имеют определенный и объективный физический смысл?

Для решения этого вопроса необходимо дальнейшее рассмотрение самой модели упругопластической деформации. Видимо, все многообразие проявлений физической природы трения следует рассматривать с учетом частных граничных условий протекания самой упругопластической деформации. Следовательно, в данном случае к описанию упругопластической деформации необходимо подойти также с обобщенных энергетических (термодинамических) позиций.

Сразу необходимо отметить следующее - использование только лишь термодинамического метода для рассмотрения в целом феномена упругопластической деформации как обобщенной модели трения недостаточно. Необходимо одновременное рассмотрение энергетической природы трения (пластической деформации) с использованием структурно-энергетических и молекулярно-кинетических представлений. Только лишь представляя этот процесс на элементарном, структурном уровне как активированный, связанный с существованием элементарных активированных комплексов, представится возможность сведения в общую модель трения таких явлений, как адгезия, фазовые превращения, химические реакции и т.д., имеющих активационную кинетическую природу. Как бы при этом феномен пластической деформации не видоизменялся в зависимости от условий трения, его физическая, активационная, кинетическая сущность не изменится: будь то вырождение объемной пластической деформации в эффект чисто поверхностный, адгезионный, либо пусть это будет совокупность большого числа атомно-молекулярных перегруппировок, каждую из которых можно рассматривать либо как элементарный акт массопереноса (диффузия), либо как отдельную химическую реакцию. Более того, каждый такой элементарный активированный эффект имеет общую двухстадийную схему - возникновение неустойчивости (образование активированного комплекса) и распад неустойчивости с образованием нового устойчивого (равновесного для данных условий) комплекса, и строго подчиняется законам термодинамики.

Таким образом, упругопластическая деформация как обобщенная модель трения должна рассматриваться на основе комплексного подхода - термодинамического и молекулярно-кинетического.

С целью наибольшего соответствия этой модели реальной дискретной (структурной) модели реальных материалов обобщенная модель трения должна соответствовать современным представлениям теории несовершенств, которая рассматривает процессы и механизмы упругопластической деформации и разрушения твердых тел в соответствии с четкой иерархической классификацией дефектов (несовершенств) кристаллического строения.

В этой связи целесообразно обратиться к методу эргодинамики деформируемых тел и ее обобщенной модели пластической деформации [1-4].

#### **Обобщенная модель упругопластической деформации и повреждаемости твердого тела [1-4].**

Деформируемое тело рассматривается как открытая, многокомпонентная, существенно неоднородная и неравновесная система, представляющая иерархию (суперпозицию) статистически равномерно распределенных по объему локальных метастабильных структурных элементов различных уровней (от субмикро- до макроуровня).

Макроскопическое явление пластической деформации, повреждаемости и разрушения элемента твердого тела рассматривается как кооперация огромного числа микроскопических элементарных актов (процессов) атомно-молекулярных перегруппировок в поле внешних сил (механических, термических, электрических и др.), активируемых флуктуациями тепловой энергии. Из достаточно детальной в теории дислокаций классификации микроскопических механизмов, контролирующих явление, выделены две наиболее характерные группы - адаптивная и диссипативная, первая из которых связана с постепенным накоплением дефектов кристаллического строения и искажений структуры, а вторая - с тепловыми эффектами.

С термодинамической точки зрения (рис.1) пластическая деформация, повреждаемость и разрушение твердого тела - это конкуренция двух (указанных выше) противоположных, взаимосвязанных и одновременно протекающих в деформируемых объемах тела групп микроскопических процессов, связанных с ростом плотности скрытой энергии  $u_e$  различного рода дефектов и повреждений (зарождающихся и накапливающихся в системе вследствие работы внешних сил  $\omega_p$ ) и снижением ее в силу диссипации. Первой группе соответствует деформационное упрочнение (наклеп) и повреждаемость материала, а второй - динамический возврат (отдых), обуславливающий тепловой эффект пластической деформации  $q$ .

Уравнение энергетического баланса процесса пластической деформации и разрушения для единицы деформируемого элемента твердого тела [1-4] имеет вид:

$$\omega_p = \Delta u_e + q. \quad (1)$$

Значительная часть энергии, связанной с тепловым эффектом пластической деформации  $q$ , не задерживается в деформируемом элементе тела и рассеивается в окружающей среде вследствие теплообмена  $\bar{q}$ . Лишь небольшая ее часть накапливается в деформируемом элементе тела в виде тепловой составляющей внутренней энергии  $\Delta u_T$ , повышая его температуру (эффект саморазогрева). Накапливаемая в деформируемом элементе тела внутренняя энергия  $\Delta u$  определяется суммой двух составляющих – скрытой и тепловой:

$$\Delta u = \Delta u_e + \Delta u_T. \quad (2)$$

Тепловой эффект пластической деформации можно определить как сумму двух составляющих:

$$q = \Delta u_T + \bar{q}, \quad (3)$$

Соотношения между составляющими энергетического баланса процесса пластической деформации и разрушения реальных твердых тел могут быть самыми разнообразными и зависят как от физико-химической природы и структуры материала, так и условий, в которых протекает процесс деформирования.

Интенсивность указанных тенденций определяется скоростью накопления в деформируемых объемах скрытой энергии  $\dot{u}_e$  и мощностью теплового эффекта пластической деформации  $\dot{q}$ .

За параметр повреждаемости и критерий разрушения принимается плотность внутренней энергии  $u$ , накопленной в деформируемом элементе тела. Согласно эргодинамической теории, тело считается разрушенным, если хотя бы в одном макрообъеме, ответственном за разрушение, плотность внутренней энергии достигает предельной (критической) величины  $u_*$ . Данному моменту соответствует появление в системе

бифуркаций, образование трещины критического размера, резкая локализация процесса в устье трещины.

**Условие локального разрушения записывается в виде**

$$u(\bar{r}_*, t_*) = u(\bar{r}_*, 0) + \int_0^{t_*} \dot{u}(\bar{r}_*, t) dt = u_* = const, \quad (4)$$

где  $u(\bar{r}_*, 0)$  - плотность внутренней энергии в локальном объеме в исходном (до деформирования  $t=0$ ) состоянии;  $\dot{u}(\bar{r}_*, t)$  - удельная скорость изменения внутренней энергии в локальном объеме, ответственном за разрушение;  $\bar{r}_*$  - параметр, характеризующий координаты  $(x_*, y_*, z_*)$  локального объема, ответственного за разрушение.

Здесь мы не рассматриваем подробно модельных закономерностей пластической деформации, которые относятся к области кинетики [4]. Для первоначального обобщенного анализа трения, представленная выше модель пластической деформации вполне достаточна.

**Термодинамический анализ процесса трения.** Как известно, трение характеризуется произведением сил трения  $F$  и пути трения  $l$ , т.е. работой  $W_T$ , затрачиваемой на преодоление сил трения:

$$W_T = F \cdot l. \quad (5)$$

В наиболее общем случае работа сил трения складывается из работы упругого и пластического деформирования и разрушения контактных объемов и работы, затрачиваемой на преодоление сил вязкого трения и разрушения смазочного материала:

$$W_T = W_T^y + W_T^{nl} + W_{cm}. \quad (6)$$

Для частного случая трения без смазки ( $W_{cm} \cong 0$ ) и в условиях установившегося (развитого) трения, когда работой сил упругого деформирования можно пренебречь, в силу их малости, работа трения  $W_T$  будет

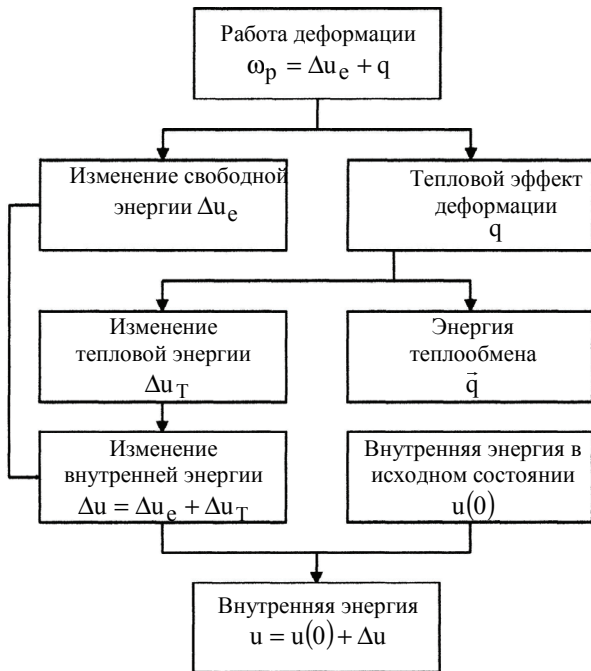


Рис. 1. Схема энергетического баланса процесса пластической деформации [1-4]

определяются в основном работой сил пластического деформирования поверхностей (контактных объемов)  $W_T^{nl}$ :

$$W_T = W_T^{nl} = W_{T1}^{nl} + W_{T2}^{nl}. \quad (7)$$

Здесь  $W_{T1}^{nl}$ ,  $W_{T2}^{nl}$  - работа пластического деформирования контактных объемов материала вала (1) и подшипника (2).

Согласно уравнению энергетического баланса процесса пластической деформации и разрушения (1) работу  $\omega_T$  внешних сил  $F$  при трении на пути  $l$  для единицы деформируемого (контактного) объема можно представить следующим образом:

$$\omega_T = \Delta u_e + q \text{ или } \dot{\omega}_T = \dot{u}_e + \dot{q}. \quad (8)$$

В уравнении (8)  $\dot{\omega}_T = d\omega_T/dt$  - мощность трения (диссипации) энергии;  $\dot{u}_e = du_e/dt$  - скорость накопления скрытой энергии в деформируемых (контактных) объемах;  $\dot{q} = dq/dt$  - мощность теплового эффекта пластической деформации (трения).

Поскольку при трении деформируются контактные объемы обоих материалов, составляющих пару трения (см. рис. 2), уравнения (8) следует записать как

$$\omega_T = \Delta u_{e1} + \Delta u_{e2} + q_1 + q_2; \quad (9)$$

$$\dot{\omega}_T = \dot{u}_{e1} + \dot{u}_{e2} + \dot{q}_1 + \dot{q}_2. \quad (10)$$

Полученные уравнения (8)-(10) представляют процесс трения как сложное противоречивое (конкурентное) диалектическое явление, характеризующееся одновременным протеканием в деформируемых (контактных) объемах материалов пары трения двух взаимосвязанных и противоположных групп микроскопических процессов, связанных с ростом плотности скрытой энергии  $\Delta u_e$  различного рода дефектов и повреждений, зарождающихся и накапливающихся в системе вследствие работы внешних сил  $\omega_T$ , и снижением ее в силу возврата (диссипации)  $q$ .

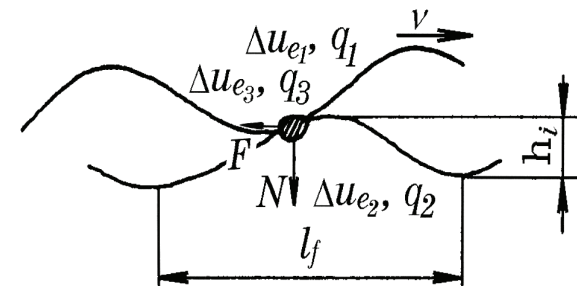


Рис. 2. Условная схема контакта металлов при трении

Противоречивость (конкурентность) процесса трения обуславливается физическим существом явления деформирования [4]. Известно, что каждая дислокация и другие дефекты и повреждения создают вокруг себя поле упругих напряжений, а на их образование (зарождение) в материале затрачивается строго определенная работа внешних сил  $\omega_p$ . Следовательно, каждый из указанных дефектов является носителем избыточной потенциальной энергии  $\mu_i$ , что обуславливает изменение потенциальной составляющей внутренней энергии  $\Delta u_e$  деформируемых объемов материалов, и приводит их в неустойчивое термодинамическое состояние. Поэтому процесс зарождения в деформируемых объемах материала различного рода дефектов и повреждений не может идти беспредельно, так как одновременно с ним идут процессы возврата (отдыха), связанные с выходом дислокаций на поверхность или аннигиляцией дислокаций и других дефектов противоположных знаков, а также с «залечиванием» обратимых (неустойчивых) нарушений сплошности (пор, трещин и др.). Этот процесс вызван тепловым движением элементарных частиц материала и протекает по закономерностям термодинамики. Степень и интенсивность этого возврата зависят от скорости деформаций, температуры и других условий, в которых протекает процесс.

По мере увеличения плотности скрытой энергии, накапливаемой в локальных объемах материала, при возврате все большая и большая часть дефектов успевает уничтожиться в процессе самой деформации. Процесс возврата сопровождается высвобождением скрытой энергии и трансформацией (превращением) ее в другие виды энергии, в основном в тепловую  $q$ .

Полученные уравнения (8)-(10) показывают, что с термодинамической точки зрения работу сил трения  $\omega_T$  (мощность трения  $\dot{\omega}_T$ ) можно условно разделить на две специфические части.

Первая часть работы трения  $\omega_T$  связана с изменением в деформируемых (контактных) объемах материалов скрытой (потенциальной) энергии  $\Delta u_{e1}$ ;  $\Delta u_{e2}$  различного рода элементарных дефектов и повреждений, зарождающихся и накапливающихся в деформируемых объемах. Эта энергия является однозначной и интегральной характеристикой субмикро- и микроструктурных изменений, которые протекают в

пластически деформируемых объемах материалов [1-4]. Она является мерой деформационного упрочнения и повреждаемости материалов.

Вторая часть работы трения  $W_T$  связана с процессами динамического возврата, сопровождающимися высвобождением скрытой энергии и тепловым эффектом трения  $q_1, q_2$ . Эта энергия связана с движением и уничтожением различного рода элементарных дефектов противоположных знаков, выходом их на поверхность, залечиванием обратимых субмикроскопических нарушений сплошности и т.д.

В наиболее общем случае уравнения (9) и (10) следует представить с учетом реального (не единичного) размера трибоконтакта  $V_f$ :

$$W_T = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + Q_1 + Q_2 = \Delta U_{e\Sigma} + Q_\Sigma; \quad (11)$$

$$\dot{W}_T = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{U}_{e\Sigma} + \dot{Q}_\Sigma, \quad (12)$$

где  $\Delta U_{e\Sigma} = \Delta u_{e1}V_{f1} + \Delta u_{e2}V_{f2}$  и  $\dot{U}_{e\Sigma} = \dot{u}_{e1}V_{f1} + \dot{u}_{e2}V_{f2}$  - изменение и скорость изменения накопленной скрытой энергии в контактных объемах пары трения;  $Q_\Sigma = q_1V_{f1} + q_2V_{f2}$  и  $\dot{Q}_\Sigma = \dot{q}_1V_{f1} + \dot{q}_2V_{f2}$  - мощность и тепловой эффект трения;  $V_{f1}, V_{f2}$  - контактные (деформируемые) объемы материалов пары трения.

Решая уравнения (5) и (9), (10) относительно силы трения, получим обобщенные уравнения для силы трения:

$$F_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + Q_1 + Q_2}{l} = \frac{\Delta U_{e\Sigma}}{l} + \frac{Q_\Sigma}{l}; \quad (13)$$

$$F_t = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{v} + \frac{\dot{Q}_\Sigma}{v}. \quad (14)$$

Здесь  $F_l$  и  $F_t$  - значение силы трения, соответствующей пути трения  $l$ , и соответственно ее значение в единицу времени  $t$ .

Разделив обе части уравнений (13) и (14) на нормальную силу  $N$ , представим обобщенные уравнения для коэффициента трения  $\mu$ :

$$\mu_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + Q_1 + Q_2}{Nl} = \frac{\Delta U_{e\Sigma}}{Nl} + \frac{Q_\Sigma}{Nl}; \quad (15)$$

$$\mu_t = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{Nv} + \frac{\dot{Q}_\Sigma}{Nv}. \quad (16)$$

Здесь  $\mu_l$  и  $\mu_t$  - значения коэффициента трения на пути  $l$  и, соответственно, его значение в единицу времени  $t$ .

При рассмотрении уравнений (13) - (16) необходимо отметить, что уравнения (14) и (16) более «локальные», т.е. характеризуют динамику процесса трения. Поскольку работа трения  $W_T$  определяется по выбранному интервалу пути трения  $l$ , то закономерности изменения силы трения и коэффициента трения на этом пути не учитываются работой  $W_T$ . Поэтому для определения мгновенных (в единицу времени) значений силы и коэффициента трения необходимо пользоваться зависимостями (14) и (16), которые решены относительно мощности трения.

Таким образом, **термодинамический анализ процесса пластической деформации и разрушения объема твердого тела позволяет получить обобщенные (двучленные) зависимости для силы трения  $F$  и коэффициента трения  $\mu$** , что соответствует современным представлениям о двойственной природе трения [12,13 и др.]. Обозначив в формуле (13) составляющую трения, связанную с процессами накопления скрытой энергии деформации, как  $F_{МЕХ}$ , а составляющую трения, связанную с тепловым эффектом трения, как  $F_{МОЛ}$ , получим известные выражения молекулярно-механической [12] или адгезионно-деформационной (при соответствующих переобозначениях) [11] теорий трения

$$F = F_{МЕХ} + F_{МОЛ} \cong F_{ДЕФ} + F_{АДГ}. \quad (17)$$

Здесь

$$F_{МЕХ(ДЕФ)} = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{v} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{v}; \quad (18)$$

$$F_{МОЛ(АДГ)} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = \frac{\dot{Q}_\Sigma}{v}. \quad (19)$$

Соответственно формулу (16) можно преобразовать к виду

$$\mu = \mu_{\text{МЕХ}} + \mu_{\text{МОЛ}} \cong \mu_{\text{ДЕФ}} + \mu_{\text{АДГ}} \quad (20)$$

Здесь

$$\mu_{\text{МЕХ(ДЕФ)}} = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2}}{Nv} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{Nv} \quad ; \quad (21)$$

$$\mu_{\text{МОЛ(АДГ)}} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \frac{\dot{Q}_\Sigma}{Nv} \quad (22)$$

Как следует из уравнений (17) - (22), сила трения  $F$  и коэффициент трения  $\mu$  характеризуют двойственную диалектическую (конкурентную) природу процесса трения, связанную с ростом плотности скрытой энергии  $\Delta u_{e1}$  и  $\Delta u_{e2}$  различного рода дефектов и повреждений структуры и, соответственно, с деформационным упрочнением контактных объемов материалов трибопары (механическая (деформационная) составляющая трения [11,12 и др.]), а также с возвратом (диссипацией) накопленной энергии деформации и тепловым эффектом трения  $q_1$  и  $q_2$  (молекулярная (адгезионная) составляющая трения [11,12 и др.]).

Уравнения (13) - (16) устанавливают глубокую взаимную связь микроскопических и обобщенных параметров процесса трения  $\Delta u_{e1}$ ;  $\Delta u_{e2}$ ;  $q_1$ ;  $q_2$  с макроскопическими - внешними характеристиками процесса трения  $N$  и  $v$ . В предложенных обобщенных уравнениях трения учитываются как характеристики материала вала (контртела) -  $u_{e1}$ ;  $q_1$ , так и материала подшипника -  $u_{e2}$ ;  $q_2$ .

Согласно [1-4] (см. (3)) тепловой эффект трения следует представить в виде суммы двух составляющих  $\Delta u_T$  и  $\bar{q}$ . Первая составляющая  $\Delta u_T$  представляет тепловой эффект трения в виде эффекта саморазогрева с температурой  $T_f$ :

$$\Delta u_T = \int_{\theta}^{T_f} \rho c dT, \quad (23)$$

где  $\theta$  - температура материала до деформирования;  $\rho$ ,  $c$  - плотность и теплоемкость материала.

Вторая составляющая  $\bar{q}$  представляет так называемую «транзитную» составляющую [1-4] теплового эффекта трения, которая по существу характеризует динамическую диссипативную составляющую трения [13].

Таким образом, согласно [1-4] тепловой эффект пластической деформации при трении следует представить как сумму двух составляющих:

$$q = \Delta u_T + \bar{q} \quad (24)$$

Накапливаемая в деформируемом объеме тела внутренняя энергия  $\Delta u$  определяется так же суммой двух составляющих: потенциальной (скрытой)  $\Delta u_e$  и кинетической (тепловой)  $\Delta u_T$ :

$$\Delta u = \Delta u_e + \Delta u_T \quad (25)$$

Эта энергия [4] связана с повреждаемостью материала  $\Delta u_e$  и его термическим разупрочнением  $\Delta u_T$ , следовательно, является опасной и ответственной за разрушение.

Эти составляющие трения следует идентифицировать как составляющую механической активации и повреждаемости и составляющую термической активации и повреждаемости. Все промежуточные значения в соотношении между потенциальной и тепловой составляющими изменения при повреждаемости (разрушении) относятся либо к квазихрупким, либо квазивязким разрушениям (повреждаемости).

В соответствии с (23) - (25) уравнения энергетического баланса процесса трения (11) и (12) можно преобразовать к виду

$$W_T = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{T1} + \Delta U_{T2} + \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2 = \Delta U_{e\Sigma} + \Delta U_{T\Sigma} + \bar{Q}_\Sigma \quad ; \quad (26)$$

$$\dot{W}_T = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{U}_{e\Sigma} + \dot{U}_{T\Sigma} + \dot{Q}_\Sigma \quad (27)$$

Соответственно для силы трения  $F$  и коэффициента трения  $f$  уравнения (13) - (16) также преобразуются к виду

$$F_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{T1} + \Delta U_{T2} + \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2}{l} = \frac{\Delta U_{e\Sigma}}{l} + \frac{\Delta U_{T\Sigma}}{l} + \frac{\bar{Q}_\Sigma}{l} \quad ; \quad (28)$$

$$F_t = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{v} + \frac{\dot{U}_{T\Sigma}}{v} + \frac{\dot{Q}_\Sigma}{v} \quad ; \quad (29)$$

$$\mu_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{T1} + \Delta U_{T2} + \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2}{Nl} = \frac{\Delta U_{e\Sigma}}{Nl} + \frac{\Delta U_{T\Sigma}}{Nl} + \frac{\bar{Q}_\Sigma}{Nl} \quad ; \quad (30)$$

$$\mu_t = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{T1} + \dot{U}_{T2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{Nv} + \frac{\dot{U}_{T\Sigma}}{Nv} + \frac{\dot{Q}_\Sigma}{Nv}. \quad (31)$$

Соотношения между составляющими энергетического баланса (26) - (31) процесса трения  $\Delta u_{e1}$  и  $\Delta u_{e2}$ ,  $\Delta u_{T1}$  и  $\Delta u_{T2}$ , а также  $\bar{q}_1$  и  $\bar{q}_2$  изменяются в широких пределах и определяются физико-химическими свойствами материалов, составляющих пару трения, их структурой и условиями процесса трения. Подобное многообразие частных соотношений между составляющими энергетического баланса процесса трения и определяет собственно все многообразие частных (граничных) проявлений процесса трения и износа.

По величине этих соотношений можно судить о поведении материалов при трении в данных (конкретных) условиях трения (деформирования) и износе (разрушении), т.е. судить обобщенно о состоянии трибосистемы.

Выполняя термодинамический анализ процесса трения, необходимо отметить одно обстоятельство принципиального характера, связанное с фундаментальным понятием трибологии - понятием о «третьем теле» [14]. В наиболее общем случае уравнения баланса энергии при трении (11) и (12) следует записать в виде

$$W_T = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + \Delta U_{e3} + Q_1 + Q_2 + Q_3; \quad (32)$$

$$\dot{W}_T = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{U}_{e3} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3. \quad (33)$$

Они учитывают составляющие  $\Delta u_{e3}V_{f3}$  и  $q_3V_{f3}$ , характеризующие схему деформируемого контакта с учетом возникновения и существования «третьего тела». Для частного случая локализации трения в объеме «третьего тела» уравнения (32) и (33) преобразуются к виду

$$W_T = \Delta U_{e3} + Q_3; \quad (34)$$

$$\dot{W}_T = \dot{U}_{e3} + \dot{Q}_3. \quad (35)$$

Данная запись уравнений энергетического баланса энергии при трении не противоречит рассуждениям, приведенным выше, дополняет их и обладает более широкой физической обоснованностью.

Таким образом, выполненный **термодинамический анализ процесса трения как процесса упругопластической деформации и разрушения, локализованного в тонких поверхностных объемах материалов пары трения, показывает, что в основе явления трения и износа лежат две противоречивые взаимосвязанные и одновременно протекающие в поверхностных (деформируемых) слоях материалов пары трения тенденции - рост плотности скрытой энергии  $\Delta u_{e1}$ ;  $\Delta u_{e2}$  за счет работы внешних (деформирующих) сил  $\omega_T$  и снижение (высвобождение) ее за счет различного рода релаксационных процессов, протекающих в деформируемых объемах твердого тела;** при этом первая тенденция связана с деформационным упрочнением (наклепом), а вторая - с динамическим возвратом (отдыхом)  $q_1$ ;  $q_2$ . Интенсивность указанных процессов определяется соответственно скоростью изменения плотности скрытой энергии  $\dot{u}_e$  и скоростью теплового эффекта пластической деформации (трения)  $\dot{q}$ .

Данная формулировка феномена трения и износа наиболее полно соответствует современным представлениям о сущности трения как явления (процесса) диссипации энергии [13]. Согласно выполненному термодинамическому анализу процесса трения, упруго-пластическая деформация материалов является основным обобщенным механизмом (каналом) трансформации и рассеяния внешнего механического движения при трении.

Наиболее важным результатом термодинамического анализа процесса трения являются **полученные обобщенные уравнения трения (11) - (16), которые, по сути, можно рассматривать как уравнения совместности трибосистемы.** Они описывают совместную работу (деформацию) трущихся поверхностей и решены относительно обобщенных интегральных параметров состояния материалов трибосистемы. Для рассмотрения особенностей совместной работы трущихся поверхностей необходим дальнейший анализ обобщенных уравнений трения с учетом возможных (наиболее типичных) граничных условий существования трения.

На термодинамический анализ процесса трения, необходимо распространить основной вывод термодинамического анализа пластической деформации и разрушения твердых тел [1-4], согласно которому «...в качестве структурного параметра необходимо принимать не всю величину накопленной пластической деформации, а только ее часть, связанную с деформационным упрочнением. Эта деформация однозначно и интегрально определяется плотностью потенциальной составляющей внутренней энергии, т.е. плотностью, так называемой скрытой энергии  $\Delta u_e$  различного рода дефектов и повреждений, накапливаемых в пластически деформируемых объемах материалов.

Вторая часть пластической деформации, контролируемая релаксационными процессами, связанными с динамическим возвратом (отдыхом), следовательно, с тепловым эффектом, обусловлена «квазивязким» течением твердого тела. Эта составляющая пластической деформации не связана с изменением структурного состояния материала и хорошо наблюдается, например, при стационарной ползучести».



И далее: «Для описания кинетики изменения структурного состояния деформируемого элемента твердого тела необходимо получить кинетическое уравнение состояния твердого тела, описывающее кинетику изменения в деформируемых объемах плотности потенциальной составляющей внутренней энергии  $\Delta u_e$ ».

Все это в полной мере относится и к термодинамическому анализу процесса трения. Поэтому следует записать: в качестве структурного (истинного) параметра деформируемых (контактных) объемов при трении необходимо принимать не всю величину накопленной пластической деформации (работы  $\omega_T$  (мощности  $\dot{\omega}_T$ ) трения), а только ее часть, связанную с деформационным упрочнением. Следовательно, в обобщенных соотношениях трения (11) - (16) первые составляющие процесса, связанные с изменением величины плотности скрытой энергии  $\Delta u_e$  различного рода дефектов и повреждений, являются истинными характеристиками (параметрами состояния) трения, которые отражают истинное сопротивление деформируемых (контактных) объемов материалов пары трения относительно перемещению поверхностей.

Все возможные изменения различной физической природы, имеющие место в деформируемых объемах материалов пары трения в зависимости от условий трения и изменяющие величину  $\Delta u_e$ , однозначно же ею и отображаются и в совокупности с другими составляющими энергетического баланса трения ( $\Delta u_T$  и  $\bar{q}$ ) наиболее полно и столь же однозначно определяют и характеризуют смену закономерностей (вид) самого трения.

Предлагаемая выше физическая трактовка составляющих энергетического баланса процесса трения (11) - (16) имеет очень важное значение, ибо она позволяет сразу же определить объективное место истинных характеристик трения в общем энергетическом балансе и, что особенно ценно, - истинный физический смысл основной характеристики трения - коэффициента трения Г.Амонтона (Леонардо да Винчи).

**Энергетическая интерпретация коэффициента трения Леонардо да Винчи (Г.Амонтона).** Один из первых выводов анализа трения с позиций эргодинамики деформируемых тел - это энергетическая интерпретация (аксиома) Леонардо да Винчи (Амонтона) коэффициента трения. Для условий, характеризующих малыми скоростями скольжения и незначительным тепловым эффектом трения ( $Q \cong 0$ ) уравнение энергетического баланса трения (15) представляет коэффициент трения Амонтона в обобщенном виде как

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U_e}{Nl}; F = \frac{\Delta U_e}{l}; Q \cong 0. \quad (36)$$

Следовательно, коэффициент трения Леонардо да Винчи (Амонтона) имеет глубокий физический смысл. С одной стороны, это параметр, характеризующий обобщенно сопротивление относительно перемещению (движению) поверхностей, ибо он отражает долю энергии, которая «уничтожается» трением в виде запасенной скрытой энергии  $\Delta U_e$ , по отношению к параметру  $Nl$ , который обобщенно количественно характеризует работу внешних сил (энергию внешнего относительного движения), совершающих на пути  $l$  работу. С другой стороны, это обобщенная характеристика повреждаемости, ибо он (коэффициент трения) определяется плотностью скрытой энергии  $\Delta u_e$ , характеризующей меру дефектности структуры и являющейся обобщенным параметром повреждаемости [1-4]. И здесь также можно сказать, что коэффициент трения однозначно отражает обобщенно структурное совершенство (несовершенство) деформируемого контактного объема, так как параметр  $\Delta u_e$  ( $\Delta U_e$ ) определяется энергией различного рода дефектов и повреждений, накапливаемых в пластически деформируемых объемах тела, и в соответствии с основным выводом термодинамической теории прочности [1-4] является обобщенной характеристикой структуры (структурный параметр).

В работе [13] было показано, что произведение  $N \cdot l$  эквивалентно произведению  $\mu^* \cdot N \cdot l$ , где величина  $\mu^*$  имеет единичное, т.е. балансовое значение. В единичном, балансовом значении коэффициента трения  $\mu^*$  и заключается физический смысл коэффициента трения Леонардо да Винчи. Отсюда следует, что работа внешних сил  $N \cdot l = \mu^* \cdot N \cdot l$  - это предельная работа, которая затрачивается в деформационном процессе трения на предельную активацию объема трения, т.е. работа, требуемая для доведения объема трения до состояния разрушения.

Исходя из вышеуказанной энергетической трактовки уравнения коэффициента трения Леонардо да Винчи (36), представляется возможность рассмотреть его в новом физическом смысле:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U_e}{N \cdot l} = \frac{\Delta U_e}{\mu^* N \cdot l} = \frac{\Delta U_e}{T^* l} = \frac{F_i}{F_*} = \frac{\tau_i}{\tau_*} \quad (37)$$

Следовательно, коэффициент трения есть отношение удельной силы трения  $\tau_i$  к максимальной удельной силе трения  $\tau_*$ , которая есть произведение контактной нагрузки трения  $N$  и максимального балансового коэффициента трения  $\mu^* = 1$ . Балансовый коэффициент трения характеризует условие разрушения (нарушения

фрикционной связи) объема трения  $V_f^*$  - условие нарушения равновесия тела на плоскости с трением по

А.Парану или же разрушения по теории максимальных касательных напряжений ( $\mu^* = 1 = \operatorname{tg} 45^\circ$ ).

Процедура определения коэффициента трения, по сути, есть процедура сличения его с критическим (балансовым) коэффициентом трения, который характеризует условие нарушения фрикционной связи.

В заключении сформулируем аксиому о коэффициенте трения. Коэффициент трения как количественная мера сопротивления относительно перемещению отражает долю энергии внешнего движения, которая «уничтожается» трением, т.е. забирается от этого внешнего движения, за счет накопления контактными объемами внутренней энергии.

#### **Выводы.**

1. Энергетическая интерпретация коэффициента трения Леонардо да Винчи (Г.Амонтон), предложенная выше, может рассматриваться как центральная аксиома трения.

2. Центральная аксиома трения раскрывает глубокий физический смысл коэффициента трения как основного и наиболее информативного параметра трения.

3. Применение рассмотренных выше аксиом и их развитие, в рамках термодинамического анализа процесса упруго-пластической деформации, к анализу существа трения позволяет рассматривать трение как эволюционный феномен [13], подчиненный адаптивно-диссипативным закономерностям трансформации контактных объемов.

4. Применение аксиоматического метода анализа процесса трения позволяет обозначить реальные пути формирования доверительной теории трения, обладающей свойством междисциплинарности, т.е. непротиворечивости обширным, современным знаниям о феномене трения. Такой метод наиболее полно отвечает потребностям трибологии, как самостоятельной науки, так и учебной дисциплины.

В заключении автор благодарит рецензента за высказанные конструктивные пожелания и согласен, что данную работу следует рассматривать как развитие положений классической реологии упруго-пластически деформируемых тел.

***Анотація.** У статті розглядаються можливості аксіоматичного методу аналізу процесу тертя. Обговорюються деякі вихідні аксіоми тертя, притаманні сучасним знанням трибології. Пропонуються аксіоми, що впливають з аналізу істоти тертя як глобального, балансового феномена трансформації руху (енергії) як такого. Розглядаються уявлення про пластичну деформацію як основному механізмі трансформації та дисипації енергії. Пропонується термодинамічний аналіз процесу тертя і його основні висновки. Розглядається фізична суть коефіцієнта тертя, як основного параметра процесу тертя.*

***Ключові слова:** аксіома, тертя, рух, енергія, трансформація, дисипація, баланс, деформація, коефіцієнт тертя*

***Abstract. Purpose.** In a modern tribology for the last some decades were created more than ten independent scientific directions. All this complicates the engineering analysis of a friction process as most the general phenomenon of the nature.*

***Approach.** On the basis of the all-round analysis of models of a friction process the general are revealed most. These models are considered as initial axioms of a friction process. The conclusion is drawn on expediency of application of the thermodynamic analysis of a friction process, as process of elastic-plastic deformation of a solids surface layer. Structural-energy interpretation of process of plastic deformation and friction process is given. The generalized energy equations of friction process are received. The conclusion is drawn on a community of the equations of energy balance of a friction. The equations of energy balance of a friction allow to interpret particular models of a friction. The physical sense of a sliding friction coefficient is considered. It is shown that the friction coefficient is the main and most informative parameter of a friction process.*

***Findings.** The thermodynamic analysis of a friction process allows to present it as a basis of an axiomatic method. Such approach possesses property of the general axiomatics of a friction when it is possible to form chains of strict proofs of the separate parties of a friction process.*

***Originality.** The analysis of a friction process from positions of the equations of energy balance showed high efficiency at the solution of a wide number of practical tasks.*

***Keywords:** axiom, friction, movement, energy, transformation, dissipation, balance, deformation, factor of a friction*

1. Федоров В. В. Эргодинамика и синергетика деформируемых тел / В. В. Федоров // Физико-химическая механика материалов. - 1988. - №1. - С.32-34.
2. Федоров В. В. Эргодинамическая концепция разрушения / В. В. Федоров // Проблемы прочности. - 1991. -№8. - С.48-58, №10. - С. 31-35.
3. Федоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел / Василий Васильевич Федоров. – Ташкент: ФАН, 1979.-186 с.
4. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твёрдых тел / Василий Васильевич Федоров. – Ташкент : ФАН, 1985.-168 с.

5. *Кузнецов В. Д.* Физика твёрдого тела /В. Д. Кузнецов. – Томск : Полиграфиздат. - Т.4. - 1947. – 542 с.
6. *Семенов А. П.* Схватывание металлов /А. П. Семенов. – Москва : Машгиз, 1958.
7. *Костецкий Б. И., Носовский И. Г., Караулов А. К. и др.* Поверхностная прочность материалов при трении.- Киев: Техніка, 1976.- 296 с.
8. *G. Fleischer:* 40 Jahre Bewertung von Reibung und Verschleiss mit Hilfe der Energiedichte // Tribologie und Schmierungstechnik 51. Jahrgang, 3/2004, 5–11
9. *Федоров В.В.* Исследование взаимной связи закономерностей износа металлов с энергетическими характеристиками процесса внешнего трения / В. В. Федоров, С. В. Хачатурьян, В. Я. Коршунов . Вестник ЦНИИ МПС. - 1977. - №5. - С. 30-34.
10. *Анализ кавитационного изнашивания гетерогенных материалов.* Л. И. Погодаев, А. И. Некоз, М. С. Стечишин и др. // Проблемы трения и изнашивания. - 1975. - Т. 36, - С. 16-22.
11. *Крагельский И. В.* Основы расчётов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. - М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
12. *Боуден Ф. Ф.* Трение и смазка твёрдых тел / Ф. Ф. Боуден, Д. Тейбор. - М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
13. *Фёдоров С.В.* Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. – Калининград: КГТУ, 2003. – 415 с.
14. *Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е изд. переработ. и доп. / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше, и др. / Под общей ред. А.В. Чичинадзе.- М.: Машиностроение, 2001.- 664 с.*

## REFERENCES

1. *Fedorov V.V.* Fiziko-himicheskaja mehanika materialov [Physico-Chemical Mechanics of Materials]. Lviv:1988, no. 1, pp.32-34.
2. *Fedorov V.V.* Problemy prochnosti (Strength of Materials). Kiev: 1991, No 8, pp.48-58, no 10, pp. 31-35.
3. *Fedorov V.V.* Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrusheniya tvjordyh tel (Thermodynamic aspects of strength and failure of solids). Tashkent: Nayka, 1979. 186 p.
4. *Fedorov V.V.* Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya tvjordyh tel (Kinetics of damageability and failure of solids). Tashkent: Nayka, 1985. 168 p.
5. *Kuznecov V.D.* Fizika tvjordogo tela (Physics of solids). Tomsk: Poligrafizdat, 1947. 542 p.
6. *Semjonov A.P.* Shvatyvanie metallov (Scuffing of metals). Moscow: Mashgiz, 1958.
7. *Kosteckij B.I., Nosovskij I.G., Karaulov A.K. i dr.* Poverhnostnaja prochnost materialov pri trenii (Increase of materials strength under friction ). Kiev: Tjehnika, 1976. 296 p.
8. *G. Fleischer:* 40 Jahre Bewertung von Reibung und Verschleiss mit Hilfe der Energiedichte. Tribologie und Schmierungstechnik 51. Jahrgang, 3/2004, pp. 5–11.
9. *Fedorov V.V., Hachatur'jan S.V., Korshunov S.V.* Journal of All-Union Research Institute of Ministry of Transport, 1977, no. 5, pp. 30-34.
10. *Pogodaev L.I., Nekoz A.I., Stechishin M.S., Protopopov A.S.* Problemy trenija i iznashivaniya [Problems of friction and wearing]. Kiev: Tjehnika, 1975, no. 36, pp.16-22.
11. *Bowden F.P., Tabor D.* The Friction and Lubrication of Solids. Oxford: At the Clarendon Press, 1964. 543 p.
12. *Kragelskij I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S.* Osnovy raschjotov na trenie i iznos (The foundations of friction and wear calculations). Moscow: Mashinostroenie, 1977. 526 p.
13. *Fedorov S.V.* Osnovy tribojergodinamiki i fiziko-himicheskie predposylki teorii sovmestimosti (The foundations of triboergodynamics and physico-chemical prerequisites of compatibility theory). Kaliningrad: KGTU, 2003. 415 p.
14. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka) [Tribology foundations (Friction, wear, lubricat)]. Uchebnik dlja tehniceskikh vuzov. red. A.V. Chichinadze.* Moscow: Mashinostroenie, 2001, 664 p.