

УДК 621.891

О.Н. Трошин

*Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В ТРИБОЛОГИИ

*В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований аномально низкого трения с позиции термодинамики неравновесных процессов, возникающих в условиях упругого взаимодействия микрорельефа элементов трибосистем.*

**Ключевые слова:** аномально низкое трение и изнашивание, «отрицательное» трение, трибосистема, энтропийный насос, молекулярно-механическая и волновая составляющие силы трения.

### Введение

**Постановка проблемы.** Современная теоретическая и экспериментальная трибология все чаще обращается к объяснению природных феноменов снижения силы трения. Так анализ научных публикаций, посвященных исследованию высокоскоростного движения тел в воде, показал, что во всех случаях эффект снижения сил трения достигается генерированием упругих волн различными способами. Н. Тесла один из первых обратил внимание в технике, на роль волновой составляющей контактного взаимодействия при движении твердых тел [1].

В отличие от обычных турбин, в которых движущийся поток попадает на лопасти или поршни, в турбине Н. Теслы применяется множество жестких «идеально» упругих металлических дисков, которые не рассекают вихревой поток под острым углом, а скользят параллельно потоку. При этом они приводятся в движение благодаря особому рода притяжению, которое возникает между поверхностью диска и движущимся газом или жидкостью. Это притяжение, являющееся тормозящим фактором для летательных и прочих двигательных аппаратов, вызвано «толчком жидкости о шероховатую поверхность твердого вещества» [1], по сути это и есть волновая составляющая силы внешнего трения.

Снижение силы трения за счет использования упругих волн различной природы является фактором снижения внешнего воздействия на трибосистему получивших распространение трибологии [2–3]. В настоящее время этот эффект начал широко использоваться при конструировании современных образцов вооружения (высокоскоростные суда и торпеды) [4]. В то же время вклад волновой составляющей, генерируемой непосредственно при взаимодействии трибоэлементов при их движении, до настоящего времени остается незаслуженно недооцененным [5–7], и это связано, прежде всего, с необходимостью создания специальных средств, как испытания, так и регистрации триботехнических параметров, в реальном времени испытания, позволяющих оценивать показатели аномально низкого

трения и изнашивания.

Анализ последних достижений и публикаций. В последнее время при изучении аномально низкого трения и изнашивания с привлечением современных физических теорий [8–10] особое внимание уделено именно квазиупругому импульсному взаимодействию возникающему в поверхностном слое при определенном его реологическом построении.

Импульсные взаимодействия вызывают не только колебания, но и поверхностные волны, которые при определенных условиях становятся основным каналом диссипации внешней подводимой энергии при внешнем трении.

Применение кванто-механического подхода к анализу квазиупругого взаимодействия позволили авторам [11–13] сформулировать условия перехода трибосистемы к аномально низкому трению и изнашиванию основанную на равновесии волновой,  $F_w$  (результат взаимодействия кинетического и гравитационного нанополей) и молекулярно-механической составляющих силы трения

$$F_{fr} = |F_a + F_d| \leq |F_w|, \quad (1)$$

где  $F_a$  – адгезионная составляющая силы трения;  $F_d$  – деформационная составляющая силы трения.

**Целью данной работы** является анализ термодинамического условия достижения аномально низкого трения и изнашивания путем увеличения волновой составляющей диссипации внешне подводимой энергии при внешнем трении, а также экспериментального подтверждения полученных теоретических результатов.

### Изложение основного материала

Проведенный анализ при внешнем трении механизмов диссипации внешне подводимой энергии позволяет сделать вывод, что совершенство трибосистем,  $\mu$  (коэффициент трения) при аномально низком трении оценивается величиной отношения кинетической,  $F_{fr}$  и гравитационной,  $N$  составляющих сил внешнего трения:  $\mu = F_{fr}/N$ .

С одной стороны – это параметр, характеризующий обобщенно сопротивление относительно перемещению (движению) поверхностей, он отражает долю энергии, которая «уничтожается» трением в виде запасенной скрытой энергии, по отношению к работе внешних сил (энергии внешнего относительного движения). Нагрузка,  $N$  воспринимается как квазимасса трения, совершающая на пути трения работу. С другой стороны – это обобщенная характеристика повреждаемости, так как коэффициент трения, определяется плотностью скрытой энергии, характеризующей меру дефектности или совершенства структуры и являющейся обобщенным параметром меры повреждаемости, либо безызнности [8].

В результате проведенных экспериментальных исследований трибосистем, работающих в условиях аномально низкого трения и изнашивания [10; 14] установлены наноструктурные особенности поверхностных слоев при аномально низком трении, которые обусловлены переходом от классического дислокационного механизма пластической деформации к ротационному. Пластическая микродеформация при трении создает тепловые флуктуации, а в совокупности все перечисленные процессы определяют рассеяние (диссипацию) механической энергии колебаний.

При определенных условиях возникает режим контактного резонанса (эффекта бегущей волны), который аномально снижает интенсивность пластической деформации и накопление повреждаемости. Таким образом, волновая составляющая силы трения может быть, как фактор интенсифицирующий процессы трения и изнашивания, так и фактором перехода к аномально низкому трению и изнашиванию.

В первом случае, на этапе динамического нагружения поверхностей трения, происходит накачка материала точечными и иными дефектами, приводящими к возрастанию внутренней энергии. Во втором случае, к ее уменьшению по волновому каналу диссипации внешне подводимой энергии при трении.

В теории колебаний наиболее распространено описание динамики движения масс уравнениями Лагранжа. Классическим примером такого описания является уравнение линейного осциллятора, представляющего собой возбуждаемой гармонической силой  $P(t) = P \sin \omega t$  и совершающей упругие колебания с амплитудой  $X(t)$ . Энергетический обмен в этом случае может быть, оценен по схеме, предложенной А.Д. Дубининым [15–16]. Упругой средой (трибоэлементы, рабочая среда) в которой генерируются и распространяются поперечные и поверхностные волны, мерой энергии волн является объемная плотность кинетической энергии среды  $E_k$ :

$$E_k = \frac{dE_k}{dV} = \frac{\rho v_1^2}{2},$$

а объемная плотность потенциальной энергии,  $E_p$ , которая аккумулируется в подповерхностном слое

трибоэлементов

$$E_p = \frac{dE_p}{dV} = \frac{\rho v_2^2 \varepsilon}{2},$$

где  $dE_k$  и  $dE_p$  – кинетическая и потенциальная энергии элементарных объемов  $dV$ ;  $\rho$  – плотность;  $v$  – фазовая скорость волн в среде;  $\varepsilon$  – относительная деформация.

Общая энергия [15] в результате упругого взаимодействия равна

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho(v_1^2 + v_2^2 \varepsilon)}{2}.$$

Так как объемная плотность энергии волн зависит от координат и времени, скорость переноса волновой энергии равна скорости перемещения в пространстве при максимальной объемной плотности энергии волны. Достижение квантовой теории позволяет утверждать, что энергия волны переносится дискретно – фононами.

Анализ взаимодействия волн от множества осцилляторов в трибосистеме проведенного с привлечением Марковского процесса с двумя дискретными состояниями, в частности «Двухсторонней реакции», предлагающей возможность в системе только переход (первое состояние – восстановление, второе состояние – распад), позволил авторам работ [12–13] сформулировать условия перехода трибосистемы к аномально низкому трению и изнашиванию. В данных работах, по сути, речь идет об условиях образования бегущей волны при множественном квазиупругом кинетическом взаимодействии микрошероховатостей контактной области трибосистемы. Так же, как и в электротехнике, режим бегущей волны в линии распространяются волны равные по амплитуде и сдвинутые по фазе.

В результате анализа процессов диссипации внешне подводимой энергии в условиях аномально низкого трения и изнашивания, базирующегося на соблюдении второго закона термодинамики авторами данных работ сформулированы условия энергетического баланса данного режима трения в виде равновесия импульса силы от волновой составляющей равной по абсолютной величине молекулярно-механической составляющих сил трения.

Интегральное взаимодействие на фактических пятнах контакта оценивается авторами работ [11; 13] импульсом силы

$$v(x(t)) = e^{-\frac{\Delta E(\hat{\varepsilon})}{\Theta}},$$

где  $\Delta E$  – энергия контакта в состоянии сцепления;  $\hat{\varepsilon}$  – механический квант;  $\Theta$  – модуль канонического распределения энергии по линии (поверхности) контакта.

По сути это величина накладывает граничные условия на скорость взаимного перемещения, достаточный для квантования энергообмена при эволюции трибосистемы от нормального трения к ано-

мально низкому трению. Данное распределение  $v(x(t))$  является эквивалентным, но уже не для системы микросмещений, а для системы индуцированных ими в поверхностных слоях бегущей волны в кинетическом нанополе, которое задается модулем канонического распределения энергии,  $\Theta$  по всем взаимодействующим элементарным осцилляторам.

Данный вывод хорошо согласуется с экспериментальными результатами исследований применения вибраций накладываемых на трибосистему [17], наблюдается порог относительно скорости перемещения.

В отечественном агрегатостроении наибольшее распространение получила трибосистема сталь 30Х3ВА азотированная – бронза ВБ23НЦ. Для достижения аномально низкого трения и изнашивания данной трибосистемы, разработана специальная финишная обработка трибоэлементов. Образцы из стали 30Х3ВА подвергали поверхностной обработке алмазной пастой, формирующей развитую на микроструктурном уровне шероховатость и определенный градиент по твердости. Образцы из бронзы ВБ23НЦ подвергали обработкой карбидом кремния. Данная обработка позволяет формировать развитую микрошероховатость с эффектом упрочнения поверхностного слоя. После выполнения данных операций поверхностный слой бронзы обрабатывали инструментом, изготовленным из минерала группы амфиболов.

В процессе приработки данной трибосистемы в течении 40–50 мин трибосистема формирует необходимые реологические особенности для перехода к аномально низкому трению и изнашиванию.

После перехода к аномально низкому трению и изнашиванию все параметры трибосистемы: коэффициент трения,  $\mu$ ; средняя поверхностная температура в контактной области,  $T$ ; скорость изнашивания (измеряется по параметрам акустической эмиссии) (рис. 1), поддерживаются в квазиустойчивом состоянии. При разгрузке трибосистемы регистрируемые параметры остаются на прежнем уровне, что является подтверждением аномально низкого трения.

Важным для практики является реакция трибосистемы, работающей в условиях аномально низкого трения и изнашивания, на изменения внешних условий трения. Для этого в следующем эксперименте при достижении аномально низкого трения и изнашивания для данной пары трения нагрузка с 1200 Н была уменьшена до 600 Н (рис. 2).

В результате волнового взаимодействия внешнее трение преобразуется во внутреннее трение. В условиях аномально низкого трения в подповерхностных деформируемых слоях возможно накопление энергетического потока превышающий прочность межатомных связей ( $1011 \text{ Дж/м}^2$ ), что способствует образованию микротрещин. Причем их возникновение может носить взрывной характер порядка  $10^{-15}$  с.

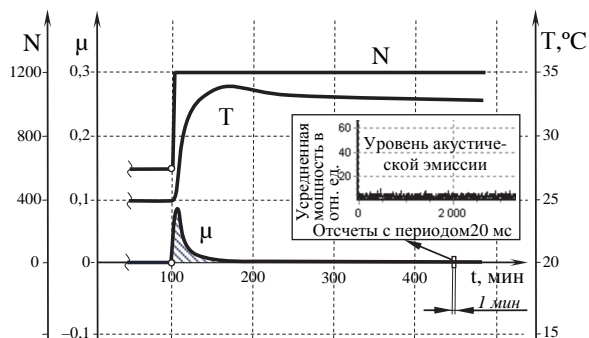


Рис. 1. Триботехнические показатели трибосистемы при нагружении, N с 600 Н до 1200 Н

При этом трибосистема переходит в область «отрицательного» трения, т.е. изменяется вектор направления силы трения. В этом случае нарушается равновесие между молекулярно-механической и волновой составляющей силы трения (1).

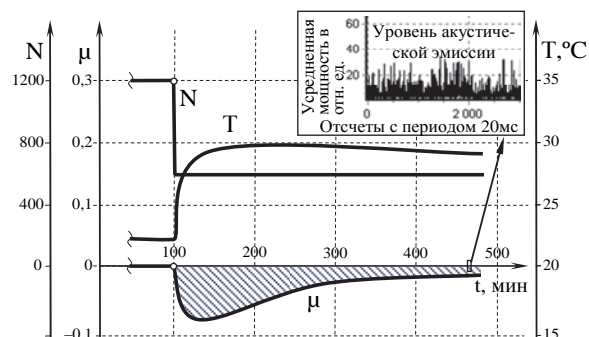


Рис. 2. Триботехнические показатели трибосистемы при разгрузке, N с 1200 Н до 600 Н

Результаты измерения скорости изнашивания методом акустической эмиссии показали (рис. 2), что «уменьшение» коэффициента трения в этом случае сопровождается увеличением температуры и скорости изнашивания.

При нагружении трибосистемы (рис. 1), работающей в условиях аномально низкого трения и изнашивания, изменения триботехнических показателей носит противоположный характер по сравнению с разгрузкой (рис. 2).

Площадь под огибающей коэффициента трения,  $\mu$  относительно оси абсцисс (рис. 1–2) представляет собой долю энергии, которая «уничтожается» трением в виде запасенной скрытой энергии, по отношению к работе внешних сил (энергии внешнего относительно движения). При нагружении эта энергия запасается в поверхностном слое, а при разгрузке она из поверхностного слоя «уничтожается» и сопровождается при этом процессами поверхностного разрушения (изнашивания) имеющих другую физику. Динамическую (волновую) составляющую, можно с термодинамической позиции представить, как энтропийный насос, который при нагружении закачивает энергию в трибосистему (в структуру материалов трибоэлементов), а при разгрузке ее откачивает.

Энергетические дефекты формирующих волновую составляющую сил трения при изменении внешних условий ведут себя аналогично поведению точечных дефектов – вакансий. Френкелем Я.И. отмечалась важная особенность вакансий: для них не выполняется закон сохранения, они могут появляться и исчезать при нагревании и охлаждении кристаллов, причем поверхность в качестве стока вакансий эффективней, чем в качестве их источника, она вакансии поглощает охотнее, чем отдает их внутрь. Концентрация вакансии соответствующей достижению минимума свободной энергии [18] является результатом борьбы энтропийного выигрыша и энергетического проигрыша. Аналогичную картину мы наблюдаем в процессе энергообмена при изменении внешних условий трения трибосистем, работающих в условиях аномально низкого трения и изнашивания.

Если при нормальном механохимическом изнашивании пластическая деформация является причиной энергетической накачки в подповерхностном слое, то источниками в данном случае являются линейные (дислокации) и точечные дефекты. При аномально низком трении и изнашивании энергетические дефекты – фононы – кванты волн растяжения-сжатия и сдвига (звуковые волны) являются основной причиной энергетического уничтожения.

Для учета данного канала диссипации внешне подводимой энергии, автором работы [8] введено понятие механического кванта,  $\hat{\epsilon}$  – минимального числа атомов, способных обеспечивать такое их конфигурационное распределение наноструктуры, которые обладают свойствами обратимо воспринимать и рассеивать (возвращать) энергию внешнего механического движения. В объеме трибосистемы в условиях аномально низкого трения и изнашивания (элементарной трибосистемы) количество таких механических квантов равно  $0,63 \cdot 10^8$ , т.е. безопасному числу циклов усталости. Механический квант сам по себе является динамическим осциллятором диссипативных структур трения и его линейный размер равен радиусу сферического идеального кристалла  $D = 7,177$  нм.

Собственно, механический квант,  $\hat{\epsilon}$  следует рассматривать как элементарную наноструктуру поверхности, работающей в условиях аномального трения и изнашивания [10; 19].

Таким образом, при нормальном механохимическом изнашивании трибосистема может быть представлена в виде теплового генератора с достаточно высоким КПД (более 95% внешне подводимой энергии превращается в тепло) [6]. При аномально низком трении и изнашивании трибосистема представляет собой сложную динамическую структурированную систему обладающую «искусственным интеллектом» и волновая составляющая в ней, по сути, представляет собой энтропийный насос, преобразующим несбалансированную часть во внешнее трение во внутреннее.

Поскольку объемная плотность энергии волн от элементарных осцилляторов зависит от координат и времени, скорость переноса энергии волной равна скорости перемещения в пространстве при максимальной объемной плотности энергии волны.

Принципиально важным является анализ процессов саморегулирования при поддержании стационарного режима аномально низкого трения и изнашивания. Для нормального механохимического изнашивания саморегулирование осуществляется по каналу термодинамической энтропии

$$\frac{dS_{Ti}}{dt} = -\frac{1}{T} \frac{dG}{dT},$$

где  $G$  – термодинамический потенциал Гиббса.

В этом случае условия стационарного изнашивания обеспечивается соблюдением равенства скорости прироста и убыли свободной энергии. С позиции структурно-энергетической теории трения и изнашивания [6] равенство скоростей образования и разрушения вторичных структур.

Общим признаком преобразования в трибосистеме является их необратимый характер, выражающийся в производстве энтропии.

Баланс энергии при аномально низком трении и изнашивании с позиции термодинамического анализа можно представить в форме, отражающей первое и второе начала термодинамики

$$\rho T dS = \rho dU - \sigma_{ik} d\epsilon_{ik} - Y_j dZ_j A_k a_k,$$

где  $S$  и  $U$  – удельное значение энтропии и внутренней энергии материала;  $\rho$  и  $T$  – плотность и температура;  $\sigma_{ik}$  – тензор напряжений;  $\epsilon_{ik}$  – тензор деформаций (упругих и пластических);  $Y_j$  и  $Z_i$  – локальные значения химического потенциала и концентрации компонент;  $A_k$  и  $a_k$  – обобщенные силы и координаты.

Одним из условий самоорганизации неравновесных диссипативных структур [3] являются наличие флуктуаций  $\sigma_{ik}$  и  $\epsilon_{ik}$ , а, следовательно, коэффициента трения непосредственно связанного с ними. Учитывая то, что работа по преодолению сил трения равна изменению свободной энергии с обратным знаком, можно записать вероятность образования флуктуаций

$$W = e^{-\frac{\Delta U}{RT}} = e^{-\frac{\Delta S}{R}} e^{-\frac{U}{RT}},$$

где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии;  $\Delta S$  – изменения энтропии, связанной с образованием флуктуаций.

Таким образом, соблюдение принципа Лешателье в условиях аномально низкого трения и изнашивании сводится к достижению равновесного состояния путем регулирования числа механических квантов на пятнах фактического контакта, т.е. равенство импульсов силы от молекулярно-механической и волновой составляющих силы тре-

ния (1). В нашем случае при аномально низком трении и изнашивании уместно говорить не только о производстве энтропии и внутренней энергии материала, но и их уничтожении по волновому каналу.

## Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы: 1. Саморегулирование при условиях аномально низкого трения и изнашивания в трибосистеме происходит по каналу структурной энтропии. 2. Изнашивание в условиях аномально низкого трения (отрицательного) обусловлено в подповерхностных деформируемых слоях возможно накопление энергетического потока превышающий прочность межатомных связей и способствует образованию микротрещин. Изнашивание происходит не на поверхности трения, а в подповерхностном слое появляются локальное разрушение поверхностного слоя. 3. Наличие при внешнем трении волновой составляющей показывает значительную разницу между молекулярной и механической составляющими силы трения.

## Список литературы

1. Тесла Н. Утраченные изобретения Николы Теслы / Н. Тесла. – М.: Яуза : Эксмо, 2009. – 288 с.
2. Nosonovsky M. Friction-Induced Vibrations and Self-Organization. *Mechanics and Non-Equilibrium Thermodynamics of Sliding Contact* / M. Nosonovsky V. Mortazavi // Taylor & Francis Group, 2014. – 331 p.
3. Трошин О.Н. Научная парадигма достижения аномально низкого трения в трибологии / О.Н. Трошин // Вісник ХНТУСГ. – 2017. – Вип. 181. – С. 102-110.
4. Пат. 2397101 С1 РФ, МПК В63В 1/36 (2006.01) Устройство для увеличения скорости хода судна / Дзюба А.Ф.; патентообладатель: Дзюба А.Ф. – №2009121794/11; заявл. 08.06.2009; опубл. 20.08.2010, бюл. №23.
5. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.
7. Классификация видов наноизноса по значению коэффициента диссипации подводимой внешней энергии к трибосистеме / В.Н. Стадниченко, О.Н. Трошин, Н.Г. Стадниченко и др. // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2011. – №1 (27) – С. 51-61.

8. Федоров С.В. Общие закономерности эволюции трения с позиций самоорганизации и синергизма / С.В. Федоров. – В кн.: Известия КГТУ. – Калининград, 2007. – № 11. – С. 22-31.

9. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов / В.С. Иванова. – М.: РАН, 1992. – 160 с.

10. Запорожець В.В. Фізичні основи нерівноважного самовпорядкування в трибосистемі / В.В. Запорожець, В.М. Стадніченко, О.М. Трошін // Технологічні системи. – 2013. – 4 (65). – С. 62-70.

11. Zaporozhets V. Automated Systems for Tribodiagnostics of Contact Interactions / V. Zaporozhets, V. Stadnichenko // Journal of Friction and Wear. – 2015. – Vol. 36. – №3. – P. 241-248.

12. Трошін О.М. Гіпотеза в поясненні аномально низького тертя та зношування в трибології / О.М. Трошін // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2015. – Вип. 12. – С. 178-190.

13. Stadnichenko V.M. Gray's Paradox and Wave Solutions in Explaining Anomalously Low Friction and Wear in Tribology / V.M. Stadnichenko, O.M. Troshin // International Journal of Materials Science and Applications. 2016. – Vol. 5. – № 1. – P. 23-30.

14. Методические аспекты неравновесной самоорганизации трибосистем / О.Н. Трошин, В.Н. Стадниченко, Н.Г. Стадниченко и др. // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1 (37). – С. 233-241.

15. Беркович П.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / П.И. Беркович, Д.Г. Громаковский. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.

16. Дубинин А.Д. Энергетика трения и износа деталей машин / А.Д. Дубинин. – М., К.: МАШГИЗ, 1963. – 139 с.

17. Gutowski P. Computational Model for Friction Force Estimation in Sliding Motion at Transverse Tangential Vibrations of Elastic Contact Support / P. Gutowski, M. Leus // Tribology International. – 2015. – Vol. 90. – № 1. – P. 455-462.

18. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу / Б.С. Бокштейн; под ред. Л.С. Асломазова. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 208 с.

19. Stadnichenko V.M. Theory and Practice in Explaining the Anomalously Low Friction and Wear in Tribology / V.M. Stadnichenko, O.M. Troshin, M.G. Stadnichenko // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2016. – № 4 (49). – С. 131-136.

Поступила в редколлегию 12.05.2017

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Е.А. Украинец, Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ТЕРМОДИНАМІЧНІ УМОВИ ДОСЯГНЕННЯ АНОМАЛЬНО НИЗЬКОГО ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЇ

О.М. Трошін

У статті наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень аномально низького тертя з позиції термодинаміки нерівноважних процесів, що виникають в умовах пружної взаємодії мікрорельєфу елементів трибосистем.

**Ключові слова:** аномально низьке тертя та зношування, «від'ємне» тертя, трибосистема, ентропійний насос, молекулярно-механічна і хвильова складові сили тертя.

## THERMODYNAMIC CONDITIONS FOR THE ACHIEVEMENT OF THE ANOMALOUSLY LOW FRICTION AND WEAR IN TRIBOLOGY

O. Troshin

In the article the results of theoretical and experimental studies of anomalously low friction from the position of thermodynamics of non-equilibrium processes that occur under conditions of elastic interaction of the microrelief elements of tribosystem.

**Keywords:** anomalously low friction and wear, «negative» friction, tribosystem, entropy pump, a molecular-mechanical and wave components of the friction force.