

## Взаимодействие водосодержащих дисперсных смесей с металлической поверхностью

### Interaction of hydrous dispersed mixtures with the metal surface

д.т.н., доцент Барabanщиков Юрий Германович

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

+ (812) 534 1286; [ugb@mail.ru](mailto:ugb@mail.ru)

Санкт-Петербург

Российская Федерация

D. Sc., Associate professor Yuriy Germanovich Barabanshchikov

Saint-Petersburg State Polytechnical University

+ (812) 534 1286; [ugb@mail.ru](mailto:ugb@mail.ru)

Saint-Petersburg

Russian Federation

**Ключевые слова:** Закономерности трения керамической массы, электрический эффект, односторонняя проводимость граничного слоя, эмиссия катионов из металла контртела, выделение скрытой теплоты при трении, математическое выражение нелинейного закона трения.

На основании экспериментальных исследований установлены основные закономерности процесса трения керамической массы по металлической поверхности. Предложено математическое выражение, учитывающее нелинейный характер закона трения. Экспериментально исследован процесс изнашивания металлических поверхностей под действием керамической массы.

Получено уравнение, связывающее параметры изнашивания с влажностью керамической массы. Коэффициент пропорциональности в этом уравнении является критерием совместимости материалов трибосистемы и при оптимальном сочетании материалов (минимальном износе) его значение минимально. Показано, что при трении минеральных дисперсных систем по металлу, независимо от их природы, возникает электрический эффект, заключающийся в появлении электродвижущей силы (трибо-ЭДС) способной поддерживать протекание тока во внешней цепи, пока существует трение. Приведены результаты исследований электризации дисперсных систем и влияния на этот процесс различных факторов. Обнаружен эффект односторонней проводимости граничного слоя во время трения скольжения.

На основе анализа возможных причин электризации дисперсных систем при трении выдвинута гипотеза, объясняющая этот процесс эмиссией катионов из металла контртела в результате понижения потенциальной энергии ионов в структурно-упорядоченном граничном слое и повышения кинетической энергии катионов в решетке металла в результате соударений с атомами материала дисперсной фазы. Показано, что при трении керамической массы возможно выделение теплоты, не являющейся результатом диссипации, а связанной с понижением внутренней энергии системы в результате самоорганизации структуры.

**Key words:** investment, energy efficiency, thermal systems, boiler, heat pump, annual total, operations, net present value, payback period.

The basic regularity of ceramic on metal surface friction process was ascertained on the base of experimental research. A mathematical expression which considered nonlinear dependence of friction principle was developed. The process of wear of metallic surfaces under the effect of a ceramic mass has been studied experimentally.

An equation that relates the parameters of wear with moisture ceramic mixture. The coefficient of proportionality in the equation is the criterion of compatibility of materials in the friction system, it becomes minimum (the least wear) when the combination of materials is optimal. It is shown that friction of mineral dispersed systems on a metal produces an electrical effect, such as appearance of an electromotive force (friction-EMF) that is capable to maintain current in an external circuit as long as friction continues. The results of studies of electrization of dispersed systems show how influence various factors on this process. Discovered the effect of unilateral conductivity of the boundary layer during sliding friction.

Based on the analysis of possible causes of electrization of dispersed systems during friction a hypothesis is advanced explaining this process by emission of cations from the counterbody metal due to a drop of the potential energy of ions in a structurally ordered boundary layer and a rise of the kinetic energy of cations in the metallic lattice as a result of collisions with atoms of the dispersed phase. It is shown that during friction ceramic

mixture is released latent heat. This heat is not a dissipative process, but is associated with the reduction internal energy as a result of self-organization the structure.

## 1. Введение

Во многих отраслях промышленности (строительной, металлургической, химической, нефтедобывающей, горнодобывающей, горно-обогатительной, сельском хозяйстве) на разных технологических стадиях существует необходимость в перемещении и механической обработке вязко-пластичных сырьевых сред. Для этих целей используется соответствующее оборудование, основные узлы которого, как правило, изготовлены из металлов. Трение таких сред по металлическим поверхностям вызывает значительный износ оборудования, приводит к существенным потерям энергии и, во многих случаях, влияет на качество продукции. Этим прикладным вопросам посвящено довольно значительное число публикаций. В то же время, с чисто научной стороны, трибологические аспекты взаимодействия водосодержащей вязко-пластичной среды с твердой металлической поверхностью практически не изучены. К ним можно отнести проблемы формирования поверхностных слоев контактирующих тел, влияние структуры вязко-пластичного тела на характеристики внешнего трения и износа контртела, соотношение между внешним и внутренним трением, влияние среды, разработку методов и устройств для исследования трения таких трибологических пар, подходы к управлению трением и износом.

В полной мере сказанное относится к водосодержащим дисперсным смесям (ВДС), которые охватывают большой круг практически важных сырьевых материалов для производства изделий из керамики, бетона и т.п. и составляют предмет исследований настоящей работы. Актуальность этой темы обусловлена следующими причинами.

Наличие воды в дисперсной смеси в разной степени связанности и химической активности приводит к сложному поведению системы в условиях трения, в частности, к возникновению процесса электрохимического изнашивания. Твердые частицы ВДС вызывают сильный абразивный износ металлических частей рабочих органов машин и механизмов. Поскольку полностью исключить износ невозможно, возникает задача регулирования процессов трения и изнашивания в приемлемых масштабах. Качество изделий, полученных на основе ВДС, в значительной степени определяется наличием поверхностных и внутренних дефектов, образующихся в заготовках при формовании, вследствие внешнего и внутреннего трения.

При скольжении бетонной смеси (БС), керамической массы (КМ) по металлической поверхности возникает ряд физических явлений, которые можно разделить на три вида: механические, тепловые и электрические.

К механическим явлениям относится трение по поверхности контакта, течение в объеме пасты (внутреннее трение) и изнашивание поверхностей трения.

Тепловые процессы связаны с превращением механической энергии при трении в теплоту. Количество выделяющейся теплоты, ограничено способностью ВДС рассеивать энергию (диссипирующей способностью). Чем выше влажность ВДС, и ниже ее вязкость, тем выше диссипирующая способность пасты. При недостаточной диссипирующей способности пасты механическая работа не успевает полностью перейти в теплоту, и ее избыточная часть превращается в поверхностную энергию разрывов.

Нами установлено [1], что количество выделяемой при трении ВДС теплоты может превышать количество работы, затраченной против силы трения. Тепловой эффект, не являющийся результатом диссипации механической энергии, объясняется упорядочением структуры граничных слоев, то есть своеобразным фазовым переходом, сопровождающимся выделением скрытой теплоты.

Внешнее трение ВДС является генератором электрической энергии, что объясняется разделением зарядов на границе скольжения в результате трибо-ионной эмиссии – выхода катионов из решетки металла в раствор [2].

Указанные явления вызывают перераспределение фаз в ВДС, в частности воды, что сказывается на структуре и свойствах изделий.

Известно, что прочность материала, кроме физико-химической природы, определяется наличием в структуре микро- и макродефектов, образующихся в процессе изготовления. Трещины, возникающие при эксплуатации строительных конструкций, нередко обусловлены скрытыми нарушениями коагуляционной структуры, возникающими при механической обработке сырьевых смесей, например, при укладке бетонной смеси, формовании керамических изделий и др.

Одним из способов снижения дефектообразования и получения надлежащей структуры материала является оптимальное сочетание его трибо-реологических свойств с режимом формования.

Существенного снижения дефектности изделий можно достичь при условии полной диссипации ВДС мощности механического воздействия. При этом имеется два канала диссипации механической энергии: внутреннее (вязкость) и внешнее трение.

От соотношения между ними зависит равномерность и изотропность структуры материала, а также наличие и характер дефектов. Это можно наблюдать на примере пластического формования керамического кирпича.

Наиболее тяжелый порок ленточного формования кирпича-сырца – так называемый, свиль. Это концентрическая трещина, образующаяся из-за неравномерного распределения скорости по сечению глиняного бруса при выходе из мундштука пресса. Наружные слои бруса вследствие трения о стенки мундштука имеют меньшую скорость, чем его внутренняя часть. При сушке и обжиге в этих местах образуются трещины [3]. Торможение массы о стенки мундштука вызывает разрывы и решение поверхностных участков – дефект, получивший название "драконов зуб" [4].

При всех способах формования приложенное давление распределяется по объему заготовки неравномерно, вследствие наличия внешнего трения [5], что может привести к значительной неравноплотности прессовок.

## 2. Цель работы

Основной целью настоящей работы является исследование закономерностей трения и изнашивания, возникающих при движении водосодержащих дисперсных смесей по металлической поверхности и разработка методов регулирования этих процессов.

## 3. Методика экспериментальных исследований

Внутреннее трение в ВДС исследовалось с помощью устройства, представленного на рис. 1. Внутреннее трение возникало при вращении эксцентрикового колеса с частотой  $\omega$  от 2 до 24 с<sup>-1</sup> и

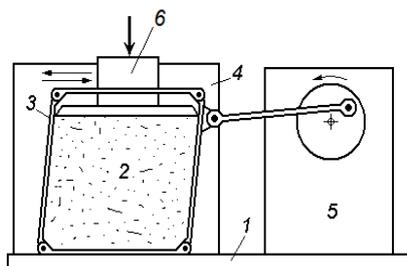


Рис. 1. Устройство для исследования внутреннего трения ВДС: 1-основание; 2- ВДС; 3-шарнирная форма; 4-боковые стенки; 5-привод; 6-пригруз

попеременного перекашивания шарнирной формы 3. Относительная деформация сдвига составляла  $\gamma=0,4$ . После 100 циклов КМ, не вынимая из рамок, сушили, а бетонную смесь выдерживали сутки во влажной среде. Затем рамки 3 разбирали и образцы испытывали на сжатие нормально к боковой поверхности.

Внешнее трение ВДС исследовалось с помощью устройств, представленных на рис. 2. Детали 1 и 3 выполнены из оргстекла.

Применяли в основном две схемы испытания: кольцо по кольцу (схема I) и плоскость по цилиндру (схема II). Прижимающую силу создавали с помощью сменных грузов.

В схеме I тензометрический силоизмеритель калибровали по крутящему моменту, а в схеме II – по силе трения. В схеме II

отработавший поверхностный слой ВДС удаляется с помощью резца 13 и во фрикционный контакт вступает вновь образованная поверхность. Скользящий электрод 4, электрод сравнения 5 (неподвижный относительно ВДС) и вспомогательные электроды 8 изготовлены из одного и того же металла. Резец 13 электрически изолирован от корпуса.

Измерительная схема подключается к любой паре электродов и используется как при измерении трибо-ЭДС, так и напряжения от внешнего источника, подключаемого к клеммам А и К.

При замкнутых контактах  $K_1$  электромагнитного реле производится измерение напряжения  $U$  на нагрузке  $R_1+R_2+R_3$ .

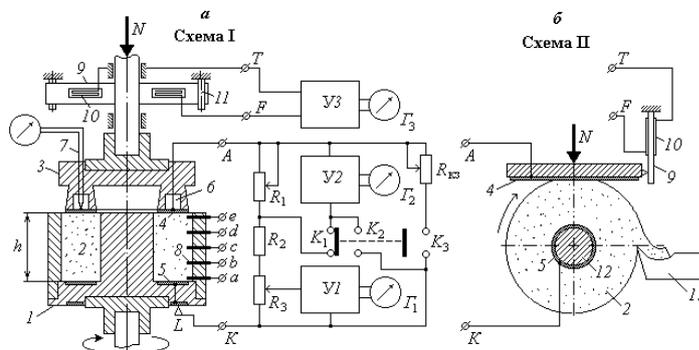


Рис. 2. Схемы испытания: 1- вращающаяся форма; 2- ВДС; 3- ползун; 4- контртело (скользящий электрод); 5- электрод сравнения; 6- канал для термостатирования; 7- термопара; 8- вспомогательные электроды; 9- упругий элемент силоизмерителя; 10- тензорезисторы; 11- упоры; 12- вал; 13- резец; У- измерительные усилители; Г-гальванометры

Калиброванный сигнал для этого снимается с магазина сопротивлений  $R_3$  и подается на вход усилителя постоянного тока У1 типа Ф7024С/4 с входным сопротивлением около 30 МОм. Одновременно по падению напряжения на образцовом резисторе  $R_1$  с помощью усилителя У2 (Ф8024С/1) измеряется сила тока  $I$  в цепи. При замыкании контактов  $K_2$  и  $K_3$  и, соответственно, размыкании контактов  $K_1$  цепь ячейки трения закорачивается проводником  $R_{кз}=0,04$  Ом, вход усилителя У2 подключается параллельно резистору  $R_{кз}$  и производится измерение тока короткого замыкания  $I_{кз}$ . Выходные сигналы усилителей У1 и У2 записывались на диаграммной ленте светолучевого осциллографа Н145. Электрические параметры вычислялись по формулам:  $\Delta DC = U + I \cdot r = U \cdot I_{кз} / (I_{кз} - I)$  и  $r = \Delta DC / I_{кз} = U / (I_{кз} - I)$ , где  $r$  – внутреннее сопротивление ячейки.

#### 4. Результаты исследований

Зависимость удельной силы трения от нормального давления при низких значениях влажности КМ (ниже некоторого значения  $W_f$ ) подчиняется закону Кулона, а при более высоких значениях влажности является нелинейной (рис. 3) [6]. Значение влажности  $W_f$  (назовем его *пороговым* значением) разделяет все свойства керамической массы и других ВДС на два различных типа. Так, например, влияние скорости на силу трения изменяется противоположным образом в зависимости от того, больше или меньше влажность ВДС порогового значения  $W_f$  (рис. 4) [7]. Теоретически  $\tau_{max}$  на рис. 4 есть значение, к которому стремится удельная (на единицу площади) сила трения при стремлении скорости к бесконечности.

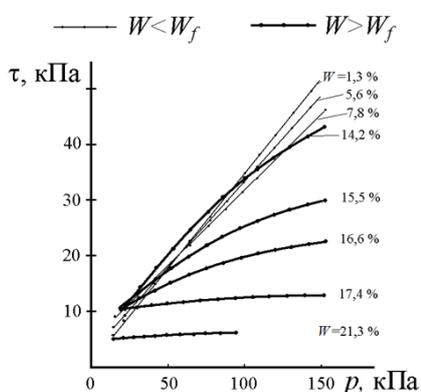


Рис. 3. Зависимость удельной силы трения от нормального давления и влажности  $W$  керамической массы (испытание по схеме I; контртело – титан; скорость скольжения 6,3 см/с)

При влажности ВДС  $W < W_f$  сила трения  $F$  (или  $\tau$ ), изнашивающая способность  $J$  и трибо-ЭДС  $E$  возрастают с увеличением влажности  $W$ , а коэффициент трения имеет постоянное значение  $d\tau/dp = \text{const}$ . При  $W > W_f$  эти величины ( $F$ ,  $J$ ,  $E$ ,  $d\tau/dp$ ) уменьшаются при увеличении  $W$  (рис. 5). При  $W_f > W > W_f$  удельная сила трения  $\tau$  с ростом нормального давления  $p$  стремится к некоторому постоянному пределу  $C$ , а  $d\tau/dp$  – к 0. На основе результатов исследования предложено уравнение, описывающее процесс трения ВДС [6]:

$$d\tau/dp = \mu_0 \cdot \exp(-\beta p), \quad (1)$$

или в интегральной форме

$$\tau = C - (\mu_0/\beta) \cdot \exp(-\beta p), \quad (2)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент трения при  $p=0$ .  $\beta$  – параметр консистентности, зависящий, главным образом, от влажности ВДС. По физическому смыслу  $\beta$  представляет собой площадь истинного контакта, устанавливающуюся под действием  $p=1$ . Обратная величина  $(1/\beta)$  есть предел текучести пасты. В случае недеформируемых тел  $\beta=0$  и  $d\tau/dp = \mu_0 = \text{const}$ , что после

На основании проведенных исследований трения керамической массы и цементных композиций [8] установлено еще одно пороговое значение влажности  $W_n$  [9]. При влажности  $W_f$  и ниже система проявляет свойства твердого тела и скользит по контакту, как единое целое. При влажности  $W_n$  и выше система ведет себя подобно жидкости. Она прилипает к поверхности контртела и скольжение по контакту прекращается, заменяясь течением в объеме ВДС. При  $W < W_f$ , сила трения падает с увеличением скорости, как это имеет место в случае твердых тел, если же  $W > W_f$ , то сопротивление движению возрастает подобно тому, как это происходит в жидкости. Параметры трения и изнашивания, а также электрических явлений изменяются, главным образом, в пределах между пороговыми значениями влажности. Например, для керамической массы эти значения составляют  $W \approx 13\%$  и  $W_n \approx 20\%$ . В этом же интервале находятся значения формовочной влажности КМ при производстве керамических изделий. Экспериментально установлены зависимости силы трения  $F$  или  $\tau = F/S$ , изнашивающей способности ВДС  $J$  и трибо-ЭДС  $E$  от прижимающей силы  $P$  (нормального давления  $p$ ), влажности  $W$ , скорости скольжения  $v$ , природы контртела, дисперсности и состава ВДС.

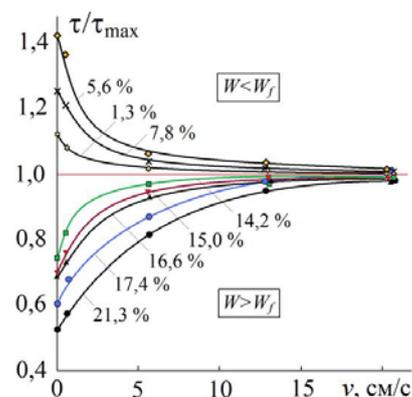


Рис. 4. Зависимость относительного значения силы трения от скорости скольжения при различной влажности КМ (испытание по схеме I)

интегрирования дает линейный закон трения Кулона. В случае идеальной жидкости  $\beta=\infty$  и  $dt/dp=0$ .

Промежуточные значения  $\beta$  отражают то обстоятельство, что трение ВДС включает два одновременно протекающих процесса – скольжение по контакту и течение в объеме. Для того, чтобы доказать связь между параметром  $\beta$  и пределом текучести, необходимо показать, что измеренная (так называемая, контурная) площадь контакта является фактической или, по крайней мере, ее можно считать таковой с достаточным приближением  $S_{\phi}=S_k$ .

Контурная площадь контакта  $S_k$  определялась нами по следу изнашивания, оставленному ВДС на металлическом контртеле [6].

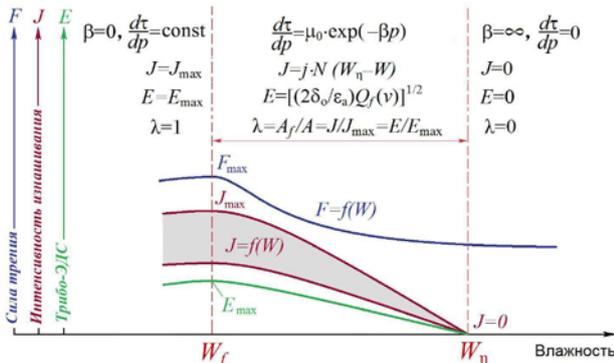


Рис. 5. Основные закономерности трения и изнашивания под действием ВДС. Пороговые значения влажности

в случае контурной площади прямая пропорциональность отсутствует. Таким образом, имеем

Известно, что фактическая площадь  $S_{\phi}$  не поддается прямому измерению. Согласно Боудену и Тейбору [10] фактическая площадь при контакте двух металлов может быть получена из соотношения  $S_{\phi}=P/q_m$ , где  $q_m$  – напряжение, соответствующее переходу выступов в пластическое состояние. На основании решения ряда контактных задач для случая чисто пластической деформации установлено [11], что давление на контакте  $q_m$  пропорционально пределу текучести металла  $\sigma_m$ :

$$q_m = k\sigma_m.$$

Из работ [11-12] следуют два существенных момента: во-первых, для ВДС, обладающих пренебрежимо малой упругостью, можно принять  $k=1$ ; во-вторых, фактическая площадь контакта прямо пропорциональна нормальной силе, в то время как в

$$S_{\phi} = P/\sigma_m,$$

Площадь  $S_k$  определялась в состоянии покоя ( $S_k^s$ ) и при скольжении ( $S_k^d$ ). Полученные кривые зависимости  $S_k=f(P)$ , представленные на рис. 6, показывают, что в состоянии покоя (рис. 6-а) наблюдается прямая пропорциональность между площадью контакта и нормальной силой.

При скольжении (рис. 6-б) эта пропорциональность начинается с нагрузки  $P_k$ , соответствующей точке перелома кривых. Пока не достигнут предел текучести  $\sigma_m$ , увеличение силы  $P$  должно вызывать пропорциональный рост нормального давления  $p$ . Если между  $p$  и  $P$  соблюдается прямая пропорциональность, то площадь контакта остается неизменной, что практически соблюдается на участках кривых слева от перелома (при  $p < \sigma_m$ ). Правые участки графиков соответствуют прямо-пропорциональной зависимости  $S_k$  от  $P$ , что указывает на близкое совпадение контурной и фактической площадей контакта.

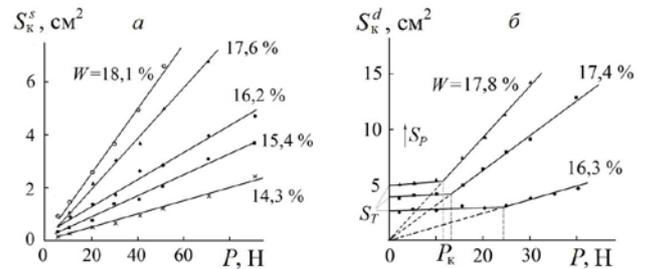


Рис. 6. Зависимость контурной площади контакта от нормальной силы: а – в состоянии покоя ( $S_k^s$ ); б – при скольжении ( $S_k^d$ )

## 5. Физический смысл параметра $\beta$

Сравним  $1/\beta$  с пределом текучести, определяемым экспериментально, как отношение нормальной нагрузки  $P$  к площади контакта  $S_k$ , который образуется в равновесных условиях под действием силы  $P$ . При одних и тех же значениях нормальной нагрузки  $P$  и влажности пасты  $W$  площади статического и динамического контактов не равны ( $S_k^s \neq S_k^d$ ). Соответственно, не равны между собой статический ( $\sigma_m^s = P/S_k^s$ ) и динамический ( $\sigma_m^d = P/S_k^d$ ) пределы текучести. Сравнение полученных по схеме I значений  $\sigma_m^s$  и  $\sigma_m^d$  с  $1/\beta$  показывает (рис. 7), что величина  $1/\beta$  не может быть отождествлена со статическим пределом текучести, но имеет весьма близкие значения с  $\sigma_m^d$ . При высокой влажности значения  $1/\beta$  и  $\sigma_m^d$  практически совпадают. При низкой влажности имеются расхождения, которые могут быть объяснены недостаточной пластичностью керамической массы.

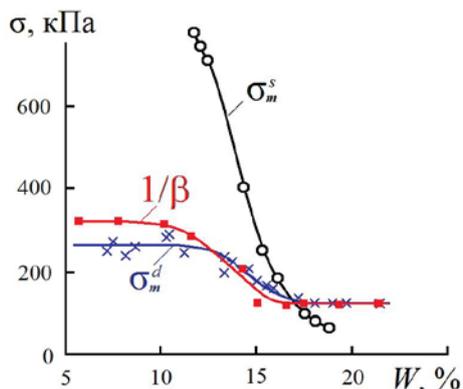


Рис. 7. Сравнение значений параметра  $1/\beta$  с пределом текучести ВДС в состоянии покоя  $\sigma_m^s$  и в состоянии трения скольжения  $\sigma_m^d$

Значения  $\sigma_m^d$  и  $1/\beta$ , полученные при испытаниях по схеме II, превышают аналогичные величины, полученные при использовании схемы I. Причинами расхождений являются различия в напряженно-деформированном состоянии и режиме испытания, а главное, резкое уменьшение площади динамического контакта в схеме II, обусловленное возникновением подъемной силы при вращении цилиндрического образца [6]. В первой схеме этот фактор отсутствует. Площадь динамического контакта в схеме II при прочих равных условиях будет ниже, чем в схеме I, на положительную величину  $P_h/\sigma_m^d$ , где  $P_h$  – подъемная сила. Это различие будет тем больше, чем выше скорость вращения, т. к. подъемная сила  $P_h$  растет с увеличением скорости сдвига. Уменьшение  $S_k^d$  с ростом скорости вращения обнаружено путем измерения непосредственно в экспериментах по схеме II.

Несмотря на расхождение значений величины  $1/\beta$ , полученных при использовании разных испытательных схем, равно как и значений  $\sigma_m^d$ , соотношение между  $1/\beta$  и  $\sigma_m^d$  или, что то же самое, между  $\beta$  и  $S_k^d/P$  сохраняется, как в одной, так и в другой схеме приблизительно одинаковым. Это говорит о том, что параметр  $\beta$  является фактической площадью фрикционного контакта, приходящейся на единицу равнодействующей нормальных сил. В пользу этого положения говорит закономерное увеличение разности  $1/\beta - \sigma_m^d$  в обеих испытательных схемах при уменьшении влажности. То есть, с потерей пластичности номинальная площадь контакта все сильнее отличается от фактической площади в сторону увеличения, как и должно быть.

## 6. Некулонова площадь контакта

В динамическом режиме прямая пропорциональность между  $S_k^d$  и  $P$  наблюдается при нагрузках, превышающих некоторую критическую величину  $P_k$ , которая зависит от влажности (рис. 6-б). При  $P < P_k$  можно считать  $S_k^d = \text{const}$ , и, соответственно, при  $P=0$ ,  $S_k^d \neq 0$ . Отсюда, можно заключить, что при  $P < P_k$  формирование площади контакта происходит не под действием нормальной силы. Это обстоятельство получило объяснение в связи с открытием явления некулонова трения [13], которое, представляет самостоятельный эффект, обусловленный, в отличие от кулонова трения, действием тангенциальных составляющих активных сил. В соответствии с этим необходимо ввести понятия кулоновой площади  $S_p$  (формируемой нормальными силами) и некулоновой  $S_T$  площади фактического контакта (формируемой тангенциальными силами).

При малых  $P$ , пока  $P < P_k$ , для создания равновесного сопротивления тангенциальным силам требуется площадь  $S_T$ , которая больше площади  $S_p$  (штриховые линии на рис. 6-б) и, следовательно, избыточна для поддержания нормальной нагрузки. При  $P > P_k$  площадь  $S_p$  превосходит  $S_T$  (пунктирные линии на рис. 6-б), а значения измеренной площади практически равны отношению  $P/\sigma_m^d$ , из чего следует, что формирование фактической площади контакта в этой области происходит под влиянием только нормальных сил. Таким образом, фактическая площадь контакта определяется той из независимых сил, которая требует большей площади для поддержания равновесия. Следовательно, площади  $S_p$  и  $S_T$  не подчиняются принципу аддитивности, и к ним должен применяться принцип поглощения меньшей площади площадью большей.

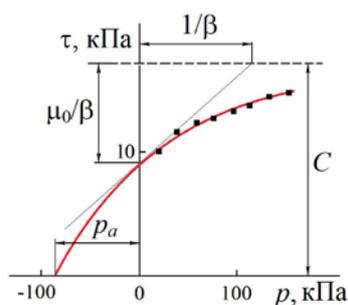


Рис. 8. Кривая зависимости  $\tau=f(p)$  по формуле (2) и экспериментальные точки

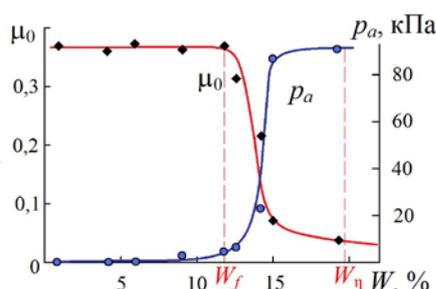


Рис. 9. Влияние влажности КМ на коэффициент трения и адгезию

Близкое совпадение значений параметра  $\beta$  с величиной  $S_T/P$  при  $P < P_k$  и величиной  $S_P/P$  при  $P > P_k$  говорит об универсальности этого параметра и возможности учета с его помощью некулонова трения.

Результаты расчетов по уравнению (2) хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 8) [14]. Отрезок, отсекаемый кривой на отрицательной ветви оси абсцисс, равен давлению адгезии  $p_a$ . Влияние влажности КМ на  $\mu_0$  и адгезию показано на рис. 9.

## 7. Изнашивающая способность ВДС

Интенсивность изнашивания металлической поверхности при трении ВДС  $J = \Delta m/vt$  зависит от следующих факторов: влажности КМ, нормального давления, износостойкости контртела, содержания и гранулометрического состава абразивной составляющей, формы зерен [15]. Из испытанных песков, применяемых в производстве, наиболее опасным является песок средней крупности из отсевов дробления горных пород. При замене этого песка на морской песок, имеющий окатанные зерна, интенсивность изнашивания снижается на 60 %.

Порог влажности  $W_\eta$ , при котором внешнее трение полностью замещается внутренним определяется по интенсивности изнашивания. При  $W = W_\eta$ ,  $J = 0$ . При влажности  $W_f$  интенсивность изнашивания максимальна. Участок зависимости  $J = f(W)$  при  $W_\eta > W > W_f$  может быть с достаточной для практики точностью аппроксимирован линейной функцией, уравнение которой имеет вид [15]:

$$J = j \cdot P(W_\eta - W), \quad (3)$$

где  $j$  – коэффициент пропорциональности, мг/(м·кН·%), представляющий собой интенсивность изнашивания при единичной нормальной силе  $P$ , и разности  $(W_\eta - W)$  в 1 %. Значение  $j$  зависит от свойств материалов пары трения, а значение  $W_\eta$  – только от свойств ВДС (табл. 1). Глина, согласно табл. 1, получена в результате удаления из КМ фракции песка с размером частиц более 0,1 мм. При этом порог влажности  $W_\eta$  увеличился более чем в 1,5 раза, а коэффициент изнашивания  $j$  уменьшился в 50–60 раз.

Таблица 1. Влияние характера материалов на параметры  $j$  и  $W_\eta$

| Материал контртела | Керамическая масса (фракция <5 мм) |              | Глина (фракция <0,1 мм) |              |
|--------------------|------------------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
|                    | $j$ , мг/(м·кН·%)                  | $W_\eta$ , % | $j$ , мг/(м·кН·%)       | $W_\eta$ , % |
| Сталь Ст3          | 2,0                                | 19,8         | –                       | –            |
| Никель             | 2,1                                | 20,1         | –                       | –            |
| Латунь             | 6,9                                | 20,0         | 0,13                    | 32,8         |
| Медь               | 7,8                                | 18,9         | 0,14                    | 29,7         |
| Цинк               | 8,8                                | 19,3         | 0,14                    | 29,0         |

Формула (3) применима при  $P < 82 - 4.2W$  ( $P$  в Н,  $W$  в %). Одной из причин отклонения зависимости  $J = f(P)$  от линейного закона при высоких  $P$  является «некулоново» трение [13], проявляющееся в значительной степени в случае вязко-пластичных тел. Поэтому при малой нормальной силе площадь фактического контакта устанавливается под действием тангенциальных составляющих тензора напряжений и не реагирует на увеличение  $P$  до определенного критического значения  $P_k$ . При  $P < P_k$  увеличение силы  $P$  вызывает пропорциональный рост нормального давления  $p$  и соответствующий ему рост интенсивности изнашивания  $J$ . Возрастание интенсивности изнашивания  $J$  при  $P > P_k$  происходит за счет роста фактической площади контакта, вызванного увеличением  $P$ , согласно уравнению  $S_\phi = P/\sigma_m$ , где  $\sigma_m$  – предел текучести пасты. Другой причиной нарушения зависимости (3) является уменьшение вязкости пасты с ростом нормальной нагрузки. Указанные обстоятельства подтверждены экспериментальными данными.

Увеличение скорости перемещения массы приводит к росту скорости изнашивания  $J'$  (износа в единицу времени), однако интенсивность изнашивания  $J$  (износ на единицу пути) остается неизменной и от скорости практически не зависит. При этом  $J' = k \cdot v$ , где коэффициент пропорциональности  $k$  зависит от влажности и может быть приближенно описан линейной функцией  $k = 2,54 - 0,13W$ . В результате получается уравнение

$$J'=0,13v (19,8-W),$$

где 19,8 – есть  $W_{\eta}$  в %, а 0,13 – произведение  $j \cdot P$  в мг/(м·%), при делении которого на  $P=0,02$  кН получаем  $j=6,5$  мг/(м·кН·%). Найденные значения параметров  $j$  и  $W_{\eta}$  хорошо согласуются с результатами опытов.

## 8. Соотношение между внешним и внутренним трением

Доля внешнего трения ВДС ( $\lambda$ ) в общем сопротивлении определяется по разработанной автором методике, основанной на регистрации процессов, происходящих на фрикционном контакте. К ним относятся: 1) изнашивание контртела, характеризуемое интенсивностью  $J=\Delta m/vt$  – потерей массы  $\Delta m$  за единицу пути трения; 2) трибоионная эмиссия (см. ниже), характеризуемая трибо-ЭДС ( $E$ ). Показано [16], что  $\lambda=J/J_{\max}=E/E^{\max}$ , где  $J_{\max}$  и  $E^{\max}$  – предельные значения  $J$  и  $E$ , имеющие место при отсутствии внутреннего трения. Параметр  $\lambda$  может быть представлен как  $\lambda=N_f/(N_f+N_{\eta})$ , где  $N_f$  и  $N_{\eta}$  – скорости диссипации энергии, соответственно, при внешнем и внутреннем трении.

При влажности  $W_f$  и ниже когда система скользит по контакту, как единое целое  $J=J_{\max}$  (соответственно,  $E=E_{\max}$ ) и  $\lambda=1$ . При влажности  $W_{\eta}$  и выше скольжение по контакту прекращается, заменяясь течением в объеме ВДС. При этом  $J=0$  (соответственно,  $E=0$ ) и  $\lambda=0$ .

Корреляция между  $J$  и  $E$  позволила разработать способ непрерывного контроля интенсивности изнашивания путем измерения трибо-ЭДС в технологическом процессе [17].

Параметр  $\lambda$  уменьшается с ростом влажности и при увеличении нагрузки.

Полученные значения  $\lambda$  показывают, что в схеме испытания II, в отличие от схемы I, доля внешнего трения сокращается с увеличением влажности более резко, что объясняется различием в напряженном состоянии образцов.

## 9. Электрические явления при трении ВДС

Между двумя электродами, один из которых находится в неподвижном контакте с ВДС, а другой скользит по ее поверхности, возникает разность потенциалов, под действием которой во внешней цепи протекает электрический ток, пока происходит скольжение (рис. 10-б). При полной физической симметрии трибоэлемента потенциалы электродов в состоянии покоя равны  $\psi_a=\psi_k=\psi_0$  (см. рис. 10-а). Потенциал скользящего электрода смещается в отрицательную сторону и приобретает значение  $\psi_f$ . Потенциал неподвижного электрода  $\psi_0$  остается без изменения (рис. 11). Разность потенциалов  $E=\psi_f-\psi_0$  является электродвижущей силой (трибо-ЭДС).

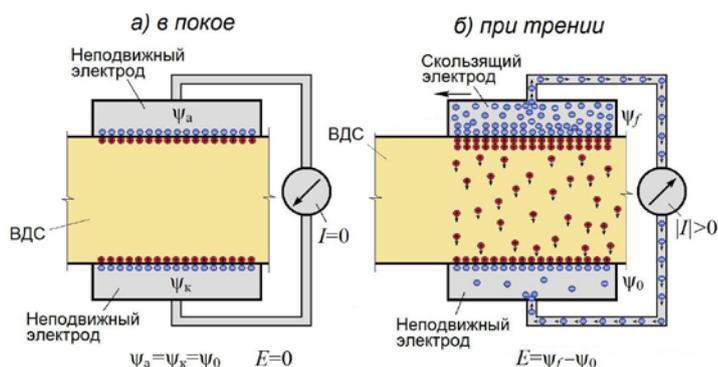


Рис. 10. Схема, поясняющая возникновение ЭДС при трении

максимума (для КМ при  $W=W_f \approx 12-13$  %), а затем снижается.

Такое поведение объясняется влиянием противодействующих факторов. При понижении влажности в области значений  $W < W_f$  доля связанной воды в общем объеме воды возрастает, что приводит к падению  $E$  в связи со снижением растворяющей способности [19] и диэлектрической проницаемости [20] жидкой фазы.

Установлено [18], что возникающая при трении минеральных ВДС электродвижущая сила является универсальным свойством этих систем независимо от их химического состава и вида металла контртела. От вида металла, природы ВДС, их сочетания зависит значение трибо-ЭДС, составляющее от нескольких мВ до 1 В.

С увеличением нормального давления трибо-ЭДС сначала быстро возрастает, а затем принимает постоянное значение.

При увеличении влажности ВДС трибо-ЭДС сначала возрастает, достигает

Для связанной воды глин экспериментально установлены значения относительной диэлектрической проницаемости, составляющие для прослоек толщиной 2-3 нм около 20-30 единиц, против 78,5 для воды в свободном объеме [21]. Падение трибо-ЭДС с ростом влажности при  $W > W_f$  можно объяснить, во-первых, возрастанием обратной утечки (электропроводность ВДС с влажностью растет), во-вторых, тем, что по мере роста влажности и, соответственно, уменьшения вязкости пасты, внешнее трение постепенно переходит во внутреннее. Так, например, при испытаниях КМ по схеме II падение  $E$  с ростом  $W$  происходит достаточно быстро и уже при влажности  $W=19\%$  трибо-ЭДС обращается в 0. Указанное значение  $W$  совпадает с пороговой влажностью  $W_{\eta}$ , соответствующей полному переходу внешнего трения во внутреннее и исчезновению эффекта пристенного скольжения. Это обстоятельство показывает, что электризация не имеет отношения к внутреннему трению, а вызвана исключительно процессами на поверхности фрикционного контакта.

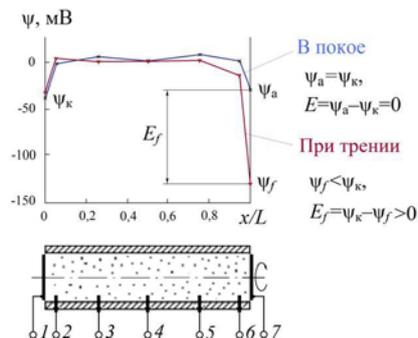


Рис. 11. Электрический потенциал электрода в состоянии покоя  $\psi_a$  и при скольжении  $\psi_f$

В случае бетонной смеси зависимость  $E$  от водоцементного отношения имеет тот же характер.

С увеличением прижимающего давления трибо-ЭДС возрастает. В наибольшей степени это проявляется при малых нагрузках. С ростом давления его влияние на  $E$  ослабевает.

## 10. Влияние скорости

Как в схеме I, так и в схеме II, после остановки движения, происходит скачкообразный рост  $E$  (по абсолютной величине), что можно объяснить двумя причинами. Одна из них имеет место только в случае схемы II и заключается в том, что площадь фрикционного контакта зависит от скорости вращения образца, как это было показано выше. В момент остановки вращения подъемная сила  $P_h$  прекращает свое действие, и площадь контакта увеличивается, что сопровождается трением и вызывает дополнительное смещение потенциала. Другая причина скачка ЭДС в момент остановки скольжения обусловлена влиянием скорости на электропроводность ВДС.

Трибо-ЭДС возрастает с увеличением скорости скольжения  $v$  [22]. При этом возрастает ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , но не пропорционально ЭДС, а несколько быстрее. Следовательно, электрическое сопротивление КМ ( $r=E/I_{кз}$ ) падает с увеличением скорости скольжения. Такой результат является несколько неожиданным, тем более что площадь контакта в схеме II с ростом  $v$  сокращается, а это должно было бы вызывать падение электропроводности, а не ее рост.

Таким образом, скачок трибо-ЭДС после остановки трения может быть вызван, согласно представлениям Леба [23], резким сокращением обратной утечки зарядов в результате падения проводимости ВДС.

## 11. Влияние абразивности и дисперсности ВДС

Влияние абразивности и дисперсности ВДС было установлено на основании испытаний цементно-песчаной смеси, керамической массы и их твердых компонентов (цемента, глины и песка), взятых в отдельности при соответствующей влажности. Цемент в составе теста показал значения трибо-ЭДС чуть выше цементно-песчаной смеси, а кварцевый песок (фракции 0,05-2,5 мм, оптимальной влажностью около 10 %) – значительно ниже. Таким образом, трибо-ЭДС цементно-песчаной смеси обусловлена в основном мелкодисперсной составляющей – портландцементом, при трехкратно меньшим его содержании в смеси, чем песка.

Влияние абразивности и дисперсности ВДС показывает также следующий опыт. Из керамической массы была удалена ее абразивная составляющая – песок. В результате изнашивающая способность оставшейся части (в основном глины), содержащей абразивные частицы не крупнее 0,1 мм, снизилась в среднем в 55 раз [24]. Трибо-ЭДС при этом заметно возросла.

В другом опыте было получено, что трибо-ЭДС сплава (латуни) значительно выше, чем у его менее твердых компонентов (меди и цинка), взятых по отдельности.

На основании данных опытов можно заключить, что, во-первых, для полидисперсных систем значение трибо-ЭДС определяется тонкодисперсной составляющей и, во-вторых, абразивное воздействие ВДС на металл не имеет отношения к электрическим явлениям в данной трибосистеме.

Приведенные экспериментальные результаты показывают, что распространенное мнение о причине возникновения трибо-ЭДС, как результате механического удаления пассивирующих пленок, не является состоятельным, так как не дает ответа на ряд вопросов:

1. Почему при запуске трения потенциал металла смещается мгновенно? Ведь для удаления пассивирующей пленки требуется время.

2. Почему при длительном абразивном изнашивании поверхности металла керамической массой, когда удаляется не только защитная пленка, но и часть основного металла сохраняется влияние скорости скольжения на значение трибо-ЭДС?

3. Почему трибо-ЭДС возрастает при снижении твердости и абразивности дисперсной фазы, или повышении твердости контртела? Ведь с понижением абразивных свойств ВДС или повышением твердости контртела защитная пленка должна удаляться труднее и трибо-ЭДС должна падать. Однако этого не происходит.

В приведенных экспериментах по измерению трибо-ЭДС трудно заподозрить влияние пленочного механизма, тем более, что электроды перед каждым опытом шлифовались тонкой наждачной бумагой. Следовательно, остается открытым вопрос о природе возникновения разности электрических потенциалов при трении.

## 12. Трибоионная эмиссия

На основании проведенных исследований можно выделить ряд общих положений, позволяющих сформулировать научную гипотезу о происхождении трибо-ЭДС при трении ВДС.

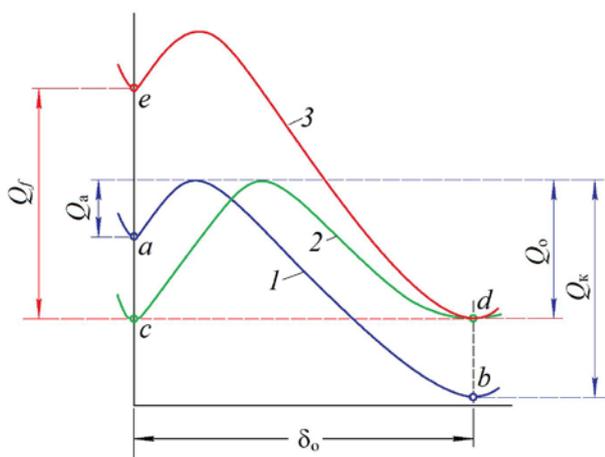
1. Трибо-ЭДС возникает независимо от различий в твердости материалов в паре трения. При трении, например, талька (самого мягкого в природе минерала с твердостью 1 по шкале Мооса) по стали, титану и другим, достаточно твердым, материалам значения трибо-ЭДС составляют 300-500 мВ, в то время, как при трении трепела (твердость около 6) по мягкому цинку величина  $E_f^{max}$  не превысила 40 мВ. Как было показано выше, после удаления из КМ частиц песка (твердость 6-7) крупнее 0,1 мм изнашивающая способность оставшейся части (глины), снизилась в среднем в 55 раз. Трибо-ЭДС при этом возросла. Трибо-ЭДС латуни оказывается значительно выше, чем у менее твердых компонентов этого сплава (меди и цинка), взятых по отдельности. Это указывает физико-химическую, а не механическую природу явления.

2. Во всех опытах с ВДС трение сдвигает электростатический потенциал металла электрода  $\psi_s$  в отрицательную сторону. При этом устанавливается новое значение потенциала  $\psi_f$ , но уже в условиях трения (трибопотенциал). Потенциал металла  $\psi_s$  в отсутствие трения и тока может быть равновесным (когда потенциал самопроизвольно приходит к одной и той же устойчивой величине, и электрохимические превращения отсутствуют) или стационарным, обусловленным двумя и более независимыми электродными реакциями, но протекающими так, что ток одних из них равен и противоположно направлен току других и суммарная плотность тока равна 0. Отрицательный знак разности  $\psi_f - \psi_s$  означает, что металл в результате трения обогатился электронами. Это возможно в двух случаях: 1) если некоторое количество катионов кристаллической решетки металла перешло в раствор или 2) некоторое количество электронов из раствора перетекло в металл. Окислительно-восстановительный характер равновесного потенциала (электронный обмен) возможен только в случае благородных металлов, когда растворение или осаждение металла полностью отсутствует. В остальных случаях равновесный потенциал устанавливается в результате перехода через границу ионов металла [25]. Если в электролите содержатся соответствующие вещества, то наряду с растворением металла на аноде может протекать окислительный процесс, например ионизация водорода или выделение кислорода. Однако в наших опытах выделения кислорода (также, как и выделения водорода) не обнаружено, а из литературы известно, что при анодной поляризации металлов, за исключением металлов платиновой группы, серебра, а также кобальта и никеля в щелочной среде, процесс ионизации водорода не зарегистрирован [26]. Вероятность протекания других реакций на скользящем электроде мала вследствие незначительного содержания электролитов в дисперсионной среде (ВДС затворялись дистиллированной водой).

Таким образом, наиболее вероятным процессом при трении ВДС по металлу является переход катионов кристаллической решетки металла в дисперсионную среду. К такому выводу склоняют еще два обстоятельства. Во-первых, как было показано в работе [24], наблюдается определенная тенденция к расположению металлов в один ряд по значениям трибо-ЭДС и электродным потенциалам. Во-вторых,

процесс растворения металлов, как результат трения в электролитической среде, был установлен в ряде работ, например, [27].

3. Особое место среди экспериментальных фактов занимает обнаруженная автором анизотропия проводимости граничного слоя на скользящем электроде и устойчивость двойного электрического слоя (ДЭС), не инвертируемого напряжением противоположного знака, в отличие от ДЭС на неподвижном электроде [28]. При изменении полярности приложенного напряжения в 1 В от внешнего источника, скачок потенциала на скользящем электроде, в отличие от неподвижного, не изменяет своего знака, то есть действию внешнего электрического поля противостоит противоположно направленное поле в двойном электрическом слое, который поддерживается на скользящем электроде процессом трения. Симметрию проводимости нарушает неизменная полярность ДЭС на фрикционном контакте, т. к. в одном из направлений тока носители заряда перемещаются по полю ДЭС, а в другом – против поля, преодолевая потенциальный барьер, то есть переход носителей заряда через границу раздела фаз в одном направлении происходит легче, чем в противоположном. Направление такой односторонней проводимости совпадает с падением потенциала в ДЭС и соответствует отрицательному трибо-потенциалу на скользящем электроде. Таким образом, облегчается анодная и затрудняется катодная реакция.



**Рис. 12. Изменение потенциальной энергии катиона при переходе из металла в дисперсионную среду ВДС: 1- при статическом контакте в начале процесса; 2- то же при достижении равновесия; 3- при трении**

Эффект асимметричной проводимости исчезает при остановке движения.

Процесс возникновения разности электрических потенциалов при трении ВДС можно пояснить следующей схемой (рис. 12). В состоянии покоя трибосистемы катион, находящийся в решетке металла на его поверхности, обладает потенциальной энергией, отвечающей в среднем точке *a*. Перемещение катиона влево вглубь решетки требует большой работы на преодоление сил отталкивания. Если граничащей с металлом дисперсионной средой является полярная жидкость, например вода, то ион при переходе в водный раствор, как известно, становится гидратированным. При этом высвобождается энергия гидратации и уровень иона понижается до точки *b* (кривая 1). Для перехода в раствор катион должен преодолеть энергетический барьер  $Q_a$ , а для перехода из раствора в металл энергетический барьер  $Q_k$ , который больше, чем  $Q_a$ . Гидратированный катион удерживается на расстоянии энергетического минимума  $\delta_0$ .

Разность электростатических потенциалов между металлом и раствором  $V$  пропорциональна суммарному заряду катионов, перешедших в раствор:  $V = (\delta_0/\epsilon_a)\sigma$ , где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда;  $\epsilon_a = \epsilon_0\epsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды. Работа, требуемая для переноса заряда  $d\sigma$ , в расчете на единицу площади, равна  $dA = Vd\sigma = (\delta_0/\epsilon_a)\sigma d\sigma$ , что после интегрирования от 0 до  $\sigma$  дает  $A = (\delta_0/2\epsilon_a)\sigma^2$ . В результате имеем  $V^2 = (2\delta_0/\epsilon_a)A$ .

Работа  $A$  равна выигрышу в энергии  $Q_k - Q_a$  от перехода катионов металла в раствор. При этом разность электростатических потенциалов между металлом и раствором составит  $V_{\text{эж}} = [(2\delta_0/\epsilon_a)(Q_k - Q_a)]^{1/2}$ . По мере перехода катионов в раствор  $V_{\text{эж}}$  растет, затрудняя процесс растворения и облегчая обратный процесс (катодный). В результате понижается уровень потенциальной энергии иона на поверхности металла (точка *a* перемещается вниз до точки *c*) и повышается уровень потенциальной энергии иона в растворе (точка *b* перемещается вверх до точки *d*). Через короткое время эти уровни становятся одинаковыми и устанавливается динамическое равновесие, при котором  $Q_a = Q_k = Q_0$  и скорости анодного и катодного процессов равны (кривая 2).

Включение процесса трения нарушает установившееся равновесие вследствие сообщения катиону кинетической энергии. При этом уровень катиона в металле повышается (точка *c* поднимается вверх до точки *e*). С этого момента начинается дополнительный переход катионов из металла в раствор (из точки *e*

в точку  $d$ ), который в итоге дает выигрыш в энергии  $Q_f$  (кривая 3). При разомкнутой внешней цепи процесс перехода будет продолжаться до достижения нового равновесия (кривая 4). Разность потенциалов между металлом и ВДС в результате трения увеличится на величину  $V_f = [(2\delta_o/\epsilon_a)Q_f]^{1/2}$ , которая равна трибо-ЭДС ( $E=V_f$ ). Поскольку трибо-ЭДС возрастает со скоростью скольжения, а также усиливается выпрямляющий эффект, то из уравнения (4.1) следует, что глубина потенциальной ямы, вызываемой трением, является функцией скорости:  $Q_f = Q_f(v)$ . Следовательно,

$$E = [(2\delta_o/\epsilon_a)Q_f(v)]^{1/2}. \quad (4)$$

Отношение  $\delta_o/\epsilon_a$  есть величина, обратная электрической емкости  $C$  на единицу площади ДЭС. Методом перезарядки ДЭС во время трения КМ по схеме I при  $W=12,6\%$ ,  $n=1\text{ с}^{-1}$  и  $P=166\text{ Н}$  получено среднее значение  $C$  для электрода из стали 12X18H10T, равное  $25,4\text{ мкФ/см}^2$ . При  $E=325\text{ мВ}$  это дает работу, затраченную на перенос заряда  $Q_f(v)$ , около  $1,3 \cdot 10^{-6}\text{ Дж/см}^2$ .

Если внешняя цепь замкнута по ней протекает электрический ток за счет перемещения электронов от скользящего электрода к неподвижному. Внутри ВДС устанавливается поток катионов встречного направления (см. рис 7-6). Катионы покидают металл скользящего электрода (трибоионная эмиссия) и откладываются на неподвижном электроде (избирательный перенос). Таким образом, происходит растворение металла при трении (электрохимическое изнашивание), что отмечалось в литературе.

### 13. Тепловой эффект при трении

Методика определения тепловых эффектов описана в работах [1, 29-30]. Экспериментально установлено, что в течение первых 2-6 с трения теплоты  $Q$  выделяется больше, чем затрачивается работы  $A$ . Разность  $\Delta U = Q - A$ , соответствующая понижению внутренней энергии системы, составляет в опытах с КМ значение порядка  $1,6\text{ Дж/см}^2$ . Наличие теплового эффекта, не связанного с диссипацией работы, указывает на переход системы в термодинамически более устойчивое состояние. Изменения силы трения в латентном периоде совпадают с характером таковых при самоорганизации структуры, известной из работ по трению, что позволяет считать структурообразование в пристенном слое ВДС обусловленным не только ориентацией частиц, но и структурированием жидкой фазы в пристенном слое толщиной (по нашим данным для КМ) около  $300\text{ мкм}$ . В связи с обнаруженным тепловым эффектом, связанным предположительно с формированием пристенного слоя упорядоченной структуры [1], следует считать достоверным понижение в этом слое под действием трения потенциальной энергии, включающей и энергию носителей заряда. Это указывает направление, в котором перемещаются заряды при трении, – из металла в ВДС. При отрицательном потенциале скользящего электрода этими зарядами не могут быть электроны. Таким образом, мы получаем еще одно подтверждение того, что механизмом электризации при трении ВДС является переход катионов из металла в раствор, т. е. процесс аналогичный анодному растворению, происходящий также за счет понижения энергетического уровня катиона в жидкой фазе, но не за счет сольватации, а в результате приобретения граничным слоем особых свойств, сообщенных трением.

### 14. Регулирование трения ВДС

Внешнее электрическое поле вызывает перемещение влаги в ВДС (электроосмос), что изменяет силу трения. Установлено, что при отрицательном потенциале на контртеле сила трения возрастает, если  $W < W_f$  и убывает, если  $W > W_f$ . При положительном потенциале – наоборот. Сила трения может быть снижена в несколько раз (рис. 13) [31].

Путем расчетов по величине электрокинетического потенциала  $\zeta$  установлено [32], что под действием электрического поля происходит смещение объема воды, как единого тела, в сторону катода. При этом между анодом и водным телом образуется обедненная влагой зона, шириной  $x$ , а вблизи катода – зона шириной  $\delta$ , обогащенная влагой. За  $0,6\text{ с}$  от начала опыта  $\delta$  составила от  $120$  до  $320\text{ мкм}$  в зависимости от напряженности электрического поля  $H$  составляющей  $3-15\text{ В/см}$ . В средней части образца, длиной  $L - (\delta + x)$ , влажность остается неизменной и равной исходному значению  $W_0$ . Таким образом, электрическое поле, изменяя внешнее трение не влияет на внутреннее трение ВДС.

Указанное распределение влаги подтверждено непосредственным измерением влажности, а также вольтамперными характеристиками различных участков образца, включая граничные слои  $x$  и  $\delta$  [31-32].

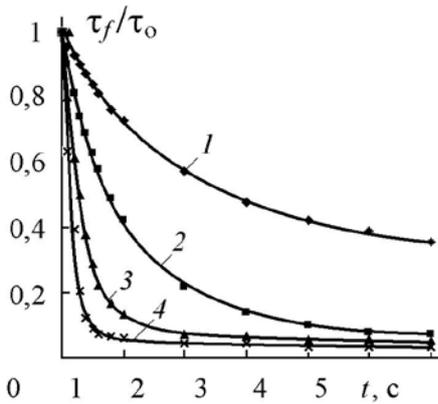


Рис. 13. Изменение удельной силы трения КМ ( $W=17\%$ ) относительно исходного значения при действии электрического поля, напряженностью: 1 -3; 2 -6; 3- 11; 4 -15 В/см (схема I; контртело – латунь;  $p=89$  кПа;  $v=6,3$  см/с)

Смещению влаги под действием силы электрического поля  $qH$  (где  $q$  – объемная плотность положительно заряженных противоионов диффузной части ДЭС) противодействуют: результирующая электростатическая сила, вызванная разделением зарядов на границах ВДС с электродами –  $F_q=dE/dx$  ( $E$  – энергия взаимодействия зарядов), и сила, равная градиенту потенциала влаги  $d\mu_v/dx$ , возникающему между средней частью и слоями  $x$  и  $\delta$ , примыкающими к электродам. Для состояния равновесия можно записать:

$$qH - d\mu_v/dx - F_q = 0.$$

В работе показано, что в случае полного водонасыщения слоя  $\delta$ , можно принять  $d\mu_v/dx \approx \mu_A/\delta$ , где  $\mu_A/\delta$  – градиент потенциала влаги у анода. Поскольку полное равновесие наступает при  $i=0$ , связь между напряженностью электрического поля и толщиной антифрикционного слоя можно представить уравнением

$$H = \mu_A/\delta(1 - \delta/2LW_0)q, \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что необходимая напряженность электрического поля должна быть тем больше, чем выше потенциал влаги, меньше объемная плотность зарядов диффузного слоя и влажность ВДС.

## 15. Оптимальный режим внутреннего трения ВДС

Критерий оптимального режима внутреннего трения ВДС получен на основе предложенной механической модели трибо-реологической системы с переменной вязкостью (рис. 14) [33].

Модель включает  $n$  элементов Шведова-Бингама ( $B$ ) с вязкостью  $\eta'_i$  и пределом текучести  $\tau_i$ ; элемент Гука  $G$  и элемент трения  $Fr$ . Если  $\tau_0=0$  (в случае жидкости), первый элемент Бингама ( $B_0$ ) с элементом Гука образуют тело Максвелла. Каждый элемент  $B_i$ , описываемый уравнением  $\tau = \tau_i + \eta'_i(d\gamma_i/dt)$ , начинает работать при достижении своего предела текучести  $\tau_i$ . При этом подвижность модели  $\phi$  (величина обратная вязкости) возрастает с подключением каждого нового элемента  $B_i$  на величину  $\phi'_i = 1/\eta'_i$ , т. е.  $\phi_i = \phi_{i-1} + \phi'_i$ . Общая

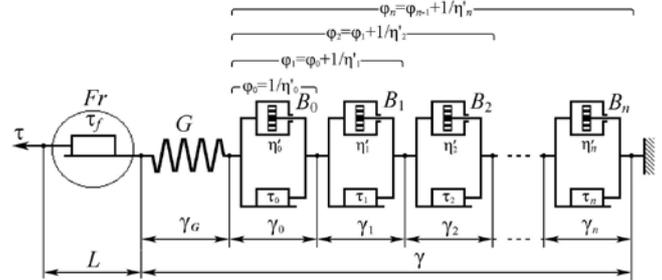


Рис. 14. Модель трибо-реологической системы с переменной вязкостью

подвижность  $\phi$  цепочки из  $n$  элементов  $B_i$  равна  $\phi_k = \sum_{i=0}^k \phi'_i$ . Для каждого элемента можно записать  $d\gamma_0/dt = \phi'_0(\tau - \tau_0)$ ;  $d\gamma_1/dt = \phi'_1(\tau - \tau_1)$ ; ...  $d\gamma_n/dt = \phi'_n(\tau - \tau_n)$ , где  $\phi'_0 = \phi_0$ ;  $\phi'_1 = \phi_1 - \phi_0$ ;  $\phi'_2 = \phi_2 - \phi_1$  и т.д. Легко показать, что  $\sum_{i=0}^k \phi'_i(\tau - \tau_i) = \sum_{i=0}^k \phi_i(\tau_{i+1} - \tau_i)$ . Тогда, при  $n \rightarrow \infty$  и  $(\tau_{i+1} - \tau_i) \rightarrow 0$  получаем  $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \int_0^{\tau_k} \phi(\tau) d\tau$ .

В условиях стационарного течения (когда  $d\tau/dt=0$ ) при оптимальной скорости деформации имеем

$\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_{\text{опт}} = \int_0^{\tau_k} \phi(\tau) d\tau$ . Экспериментально установлено, что при  $d\gamma/dt > (d\gamma/dt)_{\text{опт}}$  имеет место снижение

прочности образцов. В этом случае скорость деформации превышает скорость релаксации напряжения, т.

е.  $\frac{d\gamma}{dt} > \int_0^{\tau_k} \phi(\tau) d\tau$ , что приводит к возникновению дефектов структуры. Мощность, которая необходима,

чтобы поддерживать деформацию пасты с данной скоростью, составляет  $N = \int_0^{\tau_k} \frac{d\gamma}{dt} d\tau$ . Величина  $N$  равна

площади под кривой  $d\gamma/dt=f(\tau)$  на соответствующем интервале напряжений (рис. 15). Аналогичный интеграл от правой части вышеприведенного неравенства представляет собой мощность, затраченную против сил внутреннего трения:

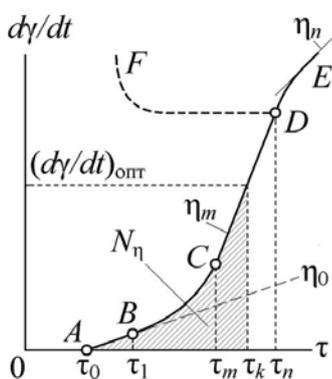


Рис. 15. Реологическая кривая

$$N_{\eta} = \int_0^{\tau_k} \left( \int_0^{\tau_k} \varphi(\tau) d\tau \right) d\tau \quad (6)$$

Из (6) следует, что подвижность пасты равна  $\varphi(\tau)=d^2N_{\eta}/d\tau^2$ . Величину  $N_{\eta}$ , равную скорости диссипации механической энергии, можно определять как скорость производства энтропии по результатам измерения тепловыделения. Поскольку верхним пределом интегрирования в (6) является напряжение  $\tau_k$ , соответствующее оптимальной скорости внутреннего трения, то  $N_{\eta}$  характеризует предельную диссипирующую способность пасты. Условие оптимального режима внутреннего трения запишется в виде  $N=N_{\eta}$ , то есть полезная мощность обрабатываемой машины должна быть равна предельной способности пасты к диссипации.

Внешнее трение является вторым каналом диссипации энергии. При наличии проскальзывания общая мощность диссипации равна

$$N_{\text{дис}}=N_{\eta}+dA_f/dt,$$

где  $A_f = \frac{1}{V} \int_0^L \tau_f S dL$  – количество работы, затраченной на внешнее трение;  $S$  – площадь поверхности трения;  $L$  – путь трения;  $V$  – объем переработанной пасты. Условие оптимального режима трения принимает вид  $N=N_{\eta}/(1-\lambda)$ .

При  $N > (1-\lambda)N_{\text{дис}}$  подводимая энергия не успевает диссипироваться полностью, и избыточная ее часть переходит в поверхностную энергию разрывов сплошности. При  $N < (1-\lambda)N_{\text{дис}}$  падает производительность машины, и возрастают энергозатраты, т. к. внутреннее трение увеличивается с понижением скорости перемещения.

Приведенные теоретические положения подтверждены в результате экспериментальной проверки влияния трения ВДС на прочность и структурные характеристики материалов [34-35].

## 16. Заключение

Исследованы основные закономерности трения ВДС по металлической поверхности. Предложено математическое выражение, учитывающее нелинейный характер трения ВДС. Разработана методика экспериментального определения количественного соотношения между внешним и внутренним трением.

Исследованы основные закономерности электрических явлений при трении ВДС. Предложена физическая и математическая модель, объясняющая механизм возникновения электродвижущей силы при трении ВДС. Показано, что электрические явления лежат в основе электро-химического изнашивания твердого тела более мягким. Установлено что трение вызывает анизотропию электрической проводимости граничного слоя ВДС на скользящем электроде.

Установлено, что при трении керамической массы происходит выделение теплоты, не являющейся результатом диссипации, а связанной с понижением внутренней энергии системы.

Исследованы процессы изнашивания металлической поверхности керамической массой. Предложена математическая модель интенсивности изнашивания.

Разработана механическая модель трибо-реологической системы с переменной вязкостью и критерий оптимального режима механической обработки ВДС, справедливость которого подтверждена экспериментально.

Разработан метод регулирования внешнего трения ВДС. Предложена математическая модель, описывающая связь толщины антифрикционного слоя с влажностью КМ, степенью насыщения пустотного пространства водой, напряженностью электрического поля.

## Литература

1. Барабанщиков Ю. Г. Тепловыделение при трении дисперсных систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2004. № 1. С. 221-226.
2. Барабанщиков Ю. Г. Трибоионная эмиссия // Материалы VIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы (Фундаментальные исследования в технических университетах). СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 64-65.
3. Морозов В. И. Физические основы пластического формования глиняного кирпича. М.: Стройиздат, 1973. 136 с.
4. Механизация процессов формования керамических изделий / Д. Хюльзенберг [и др]. М.: Стройиздат, 1984. 264 с.
5. Захаров А. И. Однородность керамики: связь со способом формования и геометрическими характеристиками изделия // Стекло и керамика. 2003. № 9. С. 35-38.
6. Барабанщиков Ю. Г. О влиянии нормальной нагрузки на коэффициент трения керамической массы // Механика композиционных материалов и конструкций. 2004. Т. 10. № 2. С. 211-223.
7. Барабанщиков Ю. Г., Чурилло А. В. О внешнем трении керамической массы // Межвуз. сб. трудов (Строительные материалы из попутных продуктов промышленности). Л.: ЛИСИ, 1988. С. 21-27.
8. Барабанщиков Ю. Г., Чулкин С. Г. Трение дисперсных смесей на основе портландцемента // Научно-технические ведомости. 2011. № 2 (123). СПб.: Изд-во СПбГПУ. С. 337-346.
9. Барабанщиков Ю. Г. Трение и изнашивающая способность керамической массы // Трение и износ. 2003. Т. 24. № 4. С. 452-457.
10. Bowden F. P. and Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids // "Clarendon Press". Oxford: 1964. P. 544.
11. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: Изд. АН СССР, 1962. 112 с.
12. Марочкин В. Н. Осесимметричное напряженное состояние зоны фактического контакта шероховатых поверхностей в условиях полной пластичности : автореф. дис. на сосик. учен. степ. к.т.н.. ИМАШ АН СССР, 1958. 21 с.
13. Буфеев В. А. Механофрикционный эффект // Трение и износ. 2000. Т. 21. № 3. С. 252-257.
14. Барабанщиков Ю. Г., Чулкин С. Г. Трение керамической массы по металлической поверхности // Научно-технические ведомости. 2011. № 1 (117). СПб.: Изд-во СПбГПУ. С. 268-278.
15. Барабанщиков Ю. Г. Изнашивание металлических поверхностей при трении керамической массы // Научно-технические ведомости. 2003. № 4. СПб.: Изд-во СПбГПУ. С. 47-51.
16. Барабанщиков Ю. Г. О внешнем и внутреннем трении дисперсных систем // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9. № 3. С. 307-320.
17. А.с. № 1420459, СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ контроля износа металлических поверхностей при контакте с влажной дисперсной системой. / Ю.Г.Барабанщиков; заявитель Ленинградский политехнический институт им. М.И.Калинина. № 4200330 ; заявл. 27.02.1987 ; опубл. 30.08.88. Бюл. № 32.
18. Барабанщиков Ю. Г. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.I. Трибо-ЭДС // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 2. С. 155-160.
19. Чураев Н. В. Физико-химия процессов массопереноса в пористых телах. М.: Химия, 1990. 272 с.
20. Духин С. С., Эстрела-Льопис В. Р., Жолковский Э. К. Электроповерхностные явления и электрофильтрование. Киев: Наукова думка, 1985. 288 с.
21. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 396 с.
22. Барабанщиков Ю. Г. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.II. Односторонняя проводимость граничного слоя // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 3. С. 266-270.
23. Леб Л. Статическая электризация. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 408 с.
24. Барабанщиков Ю. Г. Электрические явления при трении дисперсных систем. Ч.III. Трибоионная эмиссия // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 5. С. 481-485.
25. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.-Л.: Химия, 1967. 856 с.
26. Кинетика электродных процессов : монография / А.Н. Фрумкин [и др.]. М.: Изд-во МГУ, 1952. 319 с.
27. Электрохимический фактор изнашивания эндопротезов / Л.С. Пинчук [и др.] // Трение и износ. 2000. Т. 21. № 5. С. 489-493.

28. Барабанщиков Ю. Г., Чулкин С. Г. Анизотропия электрической проводимости керамической массы при трении // Научно-технические ведомости. 2011. № 2 (123). СПб.: Изд-во СПбГПУ. С. 184-191.
29. Барабанщиков Ю. Г. Способ определения фазового состава воды в дисперсных структурах строительных материалов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2003. № 5, Ч. I. С. 224-227.
30. Мионов С. А., Парийский А. А., Барабанщиков Ю.Г. Изменение фазового состава воды и кинетика тепловыделения бетона, твердеющего при отрицательной температуре // Гидротехническое строительство. 1981. № 4. С.18-22.
31. Барабанщиков Ю. Г. Управление трением керамической массы // Строительные материалы. 2004. № 9 : Приложение Наука. № 4. С. 10-12.
32. Барабанщиков Ю. Г., Чулкин С. Г. Влияние электрического поля на триботехнические свойства керамической массы // Научно-технические ведомости. 2011. № 1 (117). СПб.: Изд-во СПбГПУ. С. 101-108.
33. Барабанщиков Ю. Г. Влияние скорости формования на прочность строительных изделий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 6. Т. 1. СПб.: Изд-во СПбГПУ. С. 170-175.
34. Барабанщиков Ю. Г. Роль трения в процессах обработки и формования керамической массы // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2003. № 5, Ч. II. С. 22-24.
35. Барабанщиков Ю. Г., Семенов К. В. О повышении пластичности бетонных смесей в гидротехническом строительстве // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 24-27.

## References

1. Barabanshchikov Iu.G. Teplovydelenie pri trenii dispersnykh sistem // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti. 2004. № 1. SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 221-226. (rus)
2. Barabanshchikov Iu.G. Triboionnaia emissiia // Materialy VIII Vseross. konf. po problemam nauki i vsshei shkoly (Fundamental'nye issledovaniia v tekhnicheskikh universitetakh). SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2004. S. 64-65. (rus)
3. Morozov V .I. Fizicheskie osnovy plasticheskogo formovaniia glinianogo kirpicha. M.: Stroizdat, 1973. 136 s. (rus)
4. Mekhanizatsiia protsessov formovaniia keramicheskikh izdelii / D. Khiul'zenberg [i dr]. M.: Stroizdat, 1984. 264 s. (rus)
5. Zakharov A.I. Odnorodnost' keramiki: sviaz' so sposobom formovaniia i geometricheskimi kharakteristikami izdeliia // Steklo i keramika. 2003. № 9. S. 35-38. (rus)
6. Barabanshchikov Iu.G. O vlianii normal'noi nagruzki na koeffitsient treniia keramicheskoi massy // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii. 2004. T. 10. № 2. S. 211-223. (rus)
7. Barabanshchikov Iu.G., Churillo A.V. O vneshnem trenii keramicheskoi massy // Mezhvuz. sb. trudov (Stroitel'nye materialy iz poputnykh produktov promyshlennosti). L.: LISI, 1988. S. 21-27. (rus)
8. Barabanshchikov Iu.G., Chulkin S.G. Trenie dispersnykh smesei na osnove portlandsementa // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti. 2011. № 2 (123). SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 337-346. (rus)
9. Barabanshchikov Iu.G. Trenie i iznashivaiushchaia sposobnost' keramicheskoi massy // Trenie i iznos. 2003. T. 24. № 4. S. 452-457. (rus)
10. Bowden F. P. and Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids // "Clarendon Press". Oxford: 1964. P. 544.
11. Demkin N.B. Fakticheskaiia ploshchad' kasa-niia tverdykh poverkhnostei. M.: Izd. AN SSSR, 1962. 112 s. (rus)
12. Marochkin V.N. Osesimmetrichnoe napriazhennoe sostoiianie zony fakticheskogo kontakta sherokhovatykh poverkhnostei v usloviakh polnoi plastichnosti : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. IMASh AN SSSR, 1958. 21 s. (rus)
13. Bufeef V.A. Mekhanofriktsionnyi effekt // Trenie i iznos. 2000. T. 21. № 3. S. 252-257. (rus)
14. Barabanshchikov Iu.G., Chulkin S.G. Trenie keramicheskoi massy po metallicheskoj poverkhnosti // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti. 2011. № 1 (117). SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 268-278. (rus)
15. Barabanshchikov Iu.G. Iznashivanie metallicheskikh poverkhnostei pri trenii keramicheskoi massy // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti. 2003. № 4. SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 47-51. (rus)
16. Barabanshchikov Iu.G. O vneshnem i vnutrennem trenii dispersnykh sistem // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii. 2003. T. 9. № 3. S. 307-320. (rus)

17. A.s. № 1420459, SSSR, MKI G 01 N 3/56. Sposob kontrolya iznosa metallicheskih poverkhnostei pri kontakte s vlazhnoi dispersnoi sistemoi. / Iu.G.Barabanshchikov; zaiavitel' Leningradskii politekhnicheskii institut im. M.I.Kalinina. № 4200330 ; zaiavl. 27.02.1987 ; opubl. 30.08.88. Biul. № 32. (rus)
18. Barabanshchikov Iu.G. Elektricheskie iavleniia pri trenii dispersnykh sistem. Ch.I. Tribo-EDS // Trenie i iz-nos. 2004. T. 25. № 2. S. 155-160. (rus)
19. Churaev N.V. Fiziko-khimiia protsessov massoperenosa v poristykh telakh. M.: Khimiia, 1990. 272 s. (rus)
20. Dukhin S.S, Estrela-L'opis V.R., Zholkovskii E.K. Elektropoverkhnostnye iavleniia i elektrofil'trovanie. Kiev: Naukova dumka, 1985. 288 s. (rus)
21. Deriagin B.V., Churaev N.V., Muller V.M. Poverkhnostnye sily. M.: Nauka, 1985. 396 s. (rus)
22. Barabanshchikov Iu.G. Elektricheskie iavleniia pri trenii dispersnykh sistem. Ch.II. Odnostoronniaia provodi-most' granichnogo sloia // Trenie i iznos. 2004. T. 25. № 3. S. 266-270. (rus)
23. Leb L. Staticheskaia elektrizatsiia. M.-L.: Gosenergoizdat, 1963. 408 s. (rus)
24. Barabanshchikov Iu.G. Elektricheskie iavleniia pri trenii dispersnykh sistem. Ch.III. Triboionnaia emissiia // Trenie i iznos. 2004. T. 25. № 5. S. 481-485. (rus)
25. Fetter K. Elektrokhimicheskaiia kinetika. M.-L.: Khimiia, 1967. 856 s. (rus)
26. Kinetika elektrodnykh protsessov : monografiia / A.N. Frumkin [i dr.]. M.: Izd-vo MGU, 1952. 319 s. (rus)
27. Elektrokhimicheskii faktor iznashivaniia endoprotezov / L.S. Pinchuk [i dr.] // Trenie i iznos. 2000. T. 21. № 5. S. 489-493. (rus)
28. Barabanshchikov Iu.G., Chulkin S.G. Anizotropiia elektricheskoi provodimosti keramicheskoi massy pri tre-nii // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti. 2011. № 2 (123). SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 184-191. (rus)
29. Barabanshchikov Iu.G. Sposob opredeleniia fazovogo sostava vody v dispersnykh strukturakh stroitel'nykh materialov // Vestnik BGTU imeni V.G. Shukhova. 2003. № 5, Ch. I. S. 224-227. (rus)
30. Mironov S.A., Pariiskii A.A., Barabanshchikov Iu.G. Izmenenie fazovogo sostava vody i kinetika teplovy-deleniia betona, tverdeiushchego pri otritsatel'noi temperature // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. 1981. № 4. S.18-22. (rus)
31. Barabanshchikov Iu.G. Upravlenie treniem keramicheskoi massy // Stroitel'nye materialy. 2004. № 9 : Prilozhenie Nauka. № 4. S. 10-12. (rus)
32. Barabanshchikov Iu.G., Chulkin S.G. Vliianie elektricheskogo polia na tribotekhnicheskie svoistva keramicheskoi massy // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti. 2011. № 1 (117). SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 101-108. (rus)
33. Barabanshchikov Iu.G. Vliianie skorosti formovaniia na prochnost' stroitel'nykh izdelii // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. 2006. № 6. T. 1. SPb.: Izd-vo SPbGPU. S. 170-175. (rus)
34. Barabanshchikov Iu.G. Rol' treniia v protsessakh obrabotki i formovaniia keramicheskoi massy // Vestnik BGTU imeni V.G. Shukhova. 2003. № 5, Ch. II. S. 22-24. (rus)
35. Barabanshchikov Iu.G., Semenov K.V. O povyshenii plastichnosti betonnykh smesei v gidrotekhnicheskome stroitel'stve // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. 2007. № 5. S. 24-27. (rus)