

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ И РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЯЗКОСТИ ТОНКИХ СЛОЕВ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Представлена реологическая модель смазочного материала, отражающая зависимость вязкости от различных параметров на макро- и микро-уровне. Выполнена оценка влияния высоковязкого граничного слоя на гидромеханические характеристики сложно нагруженного трибосопряжения теплового двигателя.

Ключевые слова: реологическая модель, вязкость, сложно нагруженное трибосопряжение.

При определении работоспособности пар трения теплового двигателя исследователи особое внимание уделяют свойствам смазочного материала. В тоже время при постановке задачи учета граничного слоя в моделях смешанного или граничного трения моделированию подлежат параметры нескольких молекулярных слоев, имеющих свойства твердого пластичного тела. В представленной работе рассматривается влияние тонкого слоя смазки на режим трения, граничащий с гидродинамическим, но характеризующийся полным разделением поверхностей трения граничным слоем смазки (СС). Для моделирования условий жидкостного трения в гидродинамических расчетах необходимо построение реологической модели СС в форме функциональной зависимости коэффициента динамической вязкости от толщины слоя.

Построение адекватной математической модели граничного слоя смазки (ГСС) может быть выполнено только на основе представлений о закономерностях полимолекулярной адсорбции углеводородных жидкостей, содержащих поверхностно-активные вещества определенной структуры.

На основе исследований, выполненных в [1], [2] и других экспериментальных данных, были сформулированы следующие выводы:

1. Структуры ГСС, образованных различными жидкими средами на различных поверхностях могут значительно различаться, что затрудняет их описание в рамках одной модели.

2. Для структурированных граничных слоев характерен градиент физических параметров по нормали к образующей поверхности. Различие таких параметров, как вязкость, наличие или отсутствие предельного напряжения сдвига, зависимость параметров слоя от темпе-

ратуры, делают невозможным применение к смазочным маслам закономерностей, полученных для других жидких сред и описание ГСС, образованных смазочными маслами, как гомогенной жидкокристаллической фазы.

3. Смазочные материалы (СМ), содержащие противоизносные присадки или естественные нефтяные ПАВ, образуют на металлических поверхностях ГСС, имеющие вблизи поверхности металла свойства, близкие к свойствам твердого тела. Расстояние, на котором проявляется высокая вязкость и устойчивость к сдвиговым нагрузкам, измеряется, как правило, несколькими десятками долями микрометра. Максимальное расстояние, на котором обнаруживается структурирующее воздействие поверхности, достигает 5 мкм. Таким образом, представляется оправданным предположение о наличии в ГСС, образованном моторными и аналогичными СМ, по крайней мере, двух структурированных фаз.

В целом, с имеющимися экспериментальными данными, в наибольшей степени согласуется модель ГСС, предложенная в свое время А.С. Ахматовым [3]. Согласно этой модели, в результате хемосорбции молекул ПАВ на поверхности металла и последующей адсорбции нескольких слоев ПАВ или других компонентов масла, образуется полимолекулярный слой, имеющий кристаллическую структуру. Образование такого слоя, вероятно, может быть описано с позиций сходных с теорией адсорбции Поляни.

Последующая адсорбция компонентов жидкости приводит к образованию периферийной части граничного слоя, имеющей жидкокристаллические свойства. Трибологические свойства смазочного масла определяются свойствами внутренней области граничного слоя, близкими к свойствам твердого тела.

Для традиционной модели граничного слоя, как метастабильной жидкокристаллической фазы [4], свойства которой скачкообразно изменяются на границе с обычной жидкостью, зависимость эффективной вязкости от расстояния до образующей поверхности имеет вид:

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu_s \cdot h_s + \mu^* \cdot (h - h_s)}{h} \quad (1)$$

где $\mu_{эфф}$ – средняя эффективная вязкость СМ в слое толщиной h , μ_s – вязкость жидкокристаллической фазы, h_s – толщина жидкокристаллического слоя, μ^* – вязкость СМ на некотором удалении от твердой поверхности.

На основе анализа различных реологических моделей [5] с учетом изменения температуры в СМ в работе авторов [6] была предложена следующая зависимость μ^* от расчетной температуры T_p , второго инварианта скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и гидродинамического давления p в смазочном слое трибосопряжения (ТС):

$$\mu^*(T, p, \dot{\gamma}) = \begin{cases} \mu_1 \cdot C_1 e^{(C_2/(T_p+C_3)) + \beta(T_p)p}, & 1 \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_1; \\ (I_2)^{(n(T_p)-1)/2} \cdot C_1 e^{(C_2/(T_p+C_3)) + \beta(T_p)p}, & \dot{\gamma}_1 \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_2; \\ \mu_2 \cdot C_1 e^{(C_2/(T_p+C_3)) + \beta(T_p)p}, & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_2, \end{cases}$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{I_2}, \quad (2)$$

В диапазоне скоростей сдвига от 1 до $\dot{\gamma}_1$ СМ проявляет свойства ньютоновской жидкости с вязкостью μ_1 . В диапазоне скоростей сдвига от $\dot{\gamma}_1$ до $\dot{\gamma}_2$ наблюдается снижение вязкости по степенному закону. При скорости сдвига больше $\dot{\gamma}_2$ СМ ведёт себя как ньютоновская жидкость с вязкостью μ_2 . Для всесезонных моторных масел, используемых в современных тепловых машинах и энергетических установках, значения $\dot{\gamma}_1$ и $\dot{\gamma}_2$ были определены экспериментально [7] и составили 10^2 с^{-1} и 10^6 с^{-1} , соответственно.

Сдвиговые деформации сосредоточены в СС, имеющем вязкость μ^* . Для плоскопараллельного слоя толщиной h , ограниченного двумя поверхностями,

$$\mu_{эфф} = \mu^* \frac{h}{h - 2h_s} \quad (3)$$

Из представления о квазикристаллическом строении, по крайней мере, некоторой области граничного слоя, и жидкокристаллическом строении периферийной области, следу-

ет, на наш взгляд, оправданное предположение о существовании для некоторой части граничного СС предельного напряжения сдвига. Данное предположение вполне согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [8], [9].

Предполагаем, что для некоторой части граничного слоя, промежуточной между квазикристаллическим адсорбционным слоем и жидкокристаллическим периферийным слоем, характер зависимости предельного напряжения сдвига τ_{np} схож с характером зависимости τ_{np} от температуры для сред, содержащих структурированные загустители (пластичные смазки) или кристаллическую углеводородную фазу [10],

$$\tau_{np} = \alpha \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \quad (4)$$

Здесь α, β – константы материала.

Из представления об обусловленности образования граничного СС скачком энтропии на границе жидкой фазы и адсорбированного слоя, следует вывод о существовании в пределах граничного слоя градиента энтропии и термодинамической температуры по нормали к образующей поверхности. Таким образом, зависимость предельного напряжения сдвига материала граничного слоя от расстояния до образующей поверхности, аналогично (4), представляем в виде

$$\tau_{np} = a \exp\left(\frac{b}{h}\right) \quad (5)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, h – расстояние до поверхности.

Касательное напряжение сдвига, обусловленное в гидродинамическом режиме трения вязкостным сопротивлением жидкого слоя смазки, равно

$$\tau = \frac{V_0 \mu^*}{(h - 2h_s) S_k} \quad (6)$$

где V_0 – скорость смещения ограничивающих поверхностей, S_k – площадь контакта. Таким образом, значение h_s определяется из условий:

$$\left\{ \frac{V_0 \cdot \mu^*}{h - 2h_s} = a \cdot \exp\left(\frac{b}{h_s}\right) \right\}; \mu_{эфф} = \mu^* \frac{h}{h - 2h_s} \quad (7)$$

Модель, описываемая системой уравнений (7) не противоречит известным экспериментальным данным, но применение ее в расчетных методах крайне затруднительно вследствие

необходимости варьирования значений двух параметров, входящих в выражение (5).

Учитывая, по аналогии с (4), наибольшую вероятность экспоненциальной зависимости от расстояния до поверхности таких параметров граничного слоя, как термодинамическая температура и степень упорядоченности, Мухортов И.В. предложил формулу, содержащую один варьируемый параметр [11, 2], согласно которой вязкость в каждой точке с координатой y в направлении по нормали к поверхности определяется выражением

$$\mu = \mu_s \cdot \exp(l_h/y), \quad (8)$$

где l_h – характеристический параметр, имеющий размерность длины, величина которого индивидуальна для каждого сочетания СМ и твердой поверхности; $y \in [0; h]$. В слое, ограниченном двумя поверхностями, имеющими одинаковые свойства h_s (и l_h):

$$\mu = \mu_s \cdot \left[\exp\left(\frac{l_h}{h}\right) + \exp\left(\frac{l_h}{h-y}\right) \right], \quad (9)$$

Вследствие устойчивости внутренней части граничного слоя к сдвиговым нагрузкам, $\mu_{эфф}$ слоя толщиной h , ограниченного двумя поверхностями, определяется выражением:

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu^*}{(h-2h_s)} \int_{h_s}^{h-h_s} \left[\exp\left(\frac{l_h}{y}\right) + \exp\left(\frac{l_h}{h-y}\right) \right] dy. \quad (10)$$

При известном расстоянии h между ограничивающими поверхностями, параметр h_s может быть найден из условия минимума силы жидкостного трения:

$$F = \frac{\mu^* \cdot V_0}{(h-2h_s)^2} \int_{h_s}^{h-h_s} \left[\exp\left(\frac{l_h}{y}\right) + \exp\left(\frac{l_h}{h-y}\right) \right] dy. \quad (11)$$

Таким образом, исходя из таких поддающихся непосредственному измерению параметров, как толщина СС и его $\mu_{эфф}$, параметры h_s и l_h могут быть рассчитаны, исходя из условия:

$$\begin{cases} \mu_{эфф} = \mu(\mu^*, h, h_s, l_h) \\ F(\mu_{эфф}, h_s) = F_{\min} \end{cases}. \quad (12)$$

Наиболее существенным недостатком формул (9) и (10) является несоответствие рассчитанного по ним характера изменения вязкости по толщине граничного слоя многочисленным экспериментальным данным [8], [9], [12] и др. Известные

экспериментальные данные свидетельствуют о существовании явно выраженной границы между высоковязким слоем и обычной жидкостью с $\mu = \mu^*$. Формулы (9) и (10) пригодны для описания некоторой области граничного слоя, находящегося между твердой внутренней и жидкокристаллической внешней областями. Выполняя, совместно с Мухортовым И.В., экспериментальные исследования по замеру вязкости загущенных СМ, был сделан вывод, что характер зависимости вязкости СМ от расстояния до ограничивающей твердой поверхности может быть описан выражением,

$$\mu = \mu^* + \mu_s \exp\left(-\frac{y}{l_h}\right), \quad (13)$$

где μ_s – параметр, имеющий смысл условного значения вязкости на бесконечно малом расстоянии от ограничивающей поверхности.

В слое, ограниченном двумя поверхностями, учитывая возможные различия адсорбционных свойств и структурирующего воздействия различных материалов, описываемого параметрами l_{h1} и l_{h2} :

$$\mu = \mu^* + \mu_s \left(\exp\left(-\frac{y}{l_{h1}}\right) + \exp\left(-\frac{h-y}{l_{h2}}\right) \right). \quad (14)$$

Выражения для $\mu_{эфф}$ слоя и силы трения в этом случае записываем в виде:

$$\begin{aligned} \mu_{эфф} &= \mu^* + \\ &+ \frac{\mu_s}{h-h_{s1}-h_{s2}} \int_{h_{s1}}^{h-h_{s2}} \left(\exp\left(-\frac{y}{l_{h1}}\right) + \exp\left(-\frac{y-h}{l_{h2}}\right) \right) dh_i, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F &= V_0 \left(\left(\frac{\mu^*}{h-h_{s1}-h_{s2}} \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{\mu_s}{(h-h_{s1}-h_{s2})^2} \int_{h_{s1}}^{h-h_{s2}} \left(\exp\left(-\frac{y}{l_{h1}}\right) + \exp\left(-\frac{y-h}{l_{h2}}\right) \right) dy \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Расчет h_s и l_h численными методами может быть выполнен исходя из условия (12). Для таких однотипных СМ, как моторные масла, значение параметра μ_s составляет $10^5 \dots 10^6$ Па·с, что соответствует вязкости углеводорода в твердом состоянии (парафин).

Формулы (14) и (15) предлагаются для расчета вязкости СС в области значений h , наиболее значимых для гидродинамических расче-

тов опор скольжения, т. е. в области условного перехода от жидкостного трения к граничному. Значение h_s зависит как от сочетания свойств СМ и материала поверхности ТС, так и от рельефа (шероховатости) последней. Вследствие этого, формула (15) применима лишь в том случае, если величина h_s превосходит высоту шероховатостей поверхности.

Свойства слоя СМ при высоких контактных давлениях наиболее подробно изучены при разработке методов эластогидродинамических расчетов узлов трения качения [13]. Установлено, что, по крайней мере, при малых напряжениях сдвига, между контактирующими телами существует твердообразный слой смазки толщиной порядка $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м, не выдавливаемый при контактных давлениях, на несколько порядков превышающих давления, достигаемые в подшипниках скольжения. Предполагая сохранение обычной зависимости вязкости масел от давления для эластогидродинамических условий [9], [14], следует считать доказанной чрезвычайно высокую вязкость граничного слоя ($>10^5$ Па·с) масел, содержащих противоизносные присадки, в непосредственной близости от границы с металлической поверхностью. Это обстоятельство согласует модель, предложенную авторами, с известными моделями граничного трения.

Таким образом, значение вязкости по толщине СМ меняется от величины μ_s , лежащей в пределах $[10^4 \dots 10^6]$ Па·с, до значений вязкости в середине СС $\mu^*(T, p, \dot{\gamma})$. На рисунке 1 схематично представлено изменение вязкости СМ по координате y , направленной по нормали к поверхности трения. Координата y_1 соответствует величине граничного СС h_s . Координата x соответствует изменению угловой координаты φ .

Обобщая модели (2) и (13) записываем реологическую модель для вязкости СМ, заключенного между двумя поверхностями трения,

$$\mu = \mu^*(T, p, \dot{\gamma}) + (1 - \vartheta)\mu_s \exp(-y_k/l_h), \quad y_k = 0 \dots h,$$

$$\vartheta = \begin{cases} 0, & h_{\min} < h_{\text{дон.}}; \\ 1, & h_{\min} \geq h_{\text{дон.}} \end{cases}, \quad (17)$$

где $h_{\text{дон}}$ – допустимая толщина смазочного слоя, обеспечивающая гидродинамический режим трения.

Таким образом, влияние граничного СС проявляется лишь в те моменты времени, когда расчетная минимальная толщина СС становится меньше допустимого значения $\inf h_{\min} < h_{\text{дон.}}$, т. е. при возможном переходе из гидродинамического режима трения в смешанный.

При расчете поля гидродинамических давлений в тонком СС неньютоновских жидкостей модель вязкости (17) обеспечивает учет неньютоновских свойств СМ. При этом необходимо принимать во внимание, что наличие адсорбционных слоев ведет к увеличению фактической толщины разделяющего слоя на величину $2y_1 = 2h_s$.

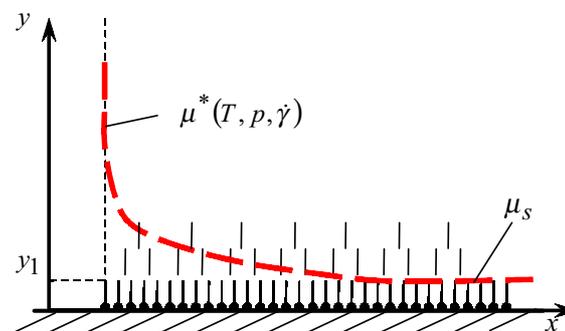


Рисунок 1. К определению границ изменения вязкости по толщине слоя

Таблица 1. Оценка влияния высоковязкого граничного слоя на ГМХ сложнагруженного трибосопряжения

ГМХ	Вариант 1	Вариант 2
Среднее значение потерь мощности на трение N^* , Вт	601,2	722,9
Среднее значение температуры СС T^* , °С	107,3	115,4
Средний торцевой расход через ТС Q^* , л/с	0,01818	0,01479
Среднее значение минимальной толщины СС h_{\min}^* , мкм	4,048	5,006
Максимальное гидродинамическое давление в СС за цикл нагружения supp_{\max} , МПа	276,9	292,6
Наименьшее за цикл нагружения значение минимальной толщины СС $\text{inf}h_{\min}$, мкм	2,215	2,638

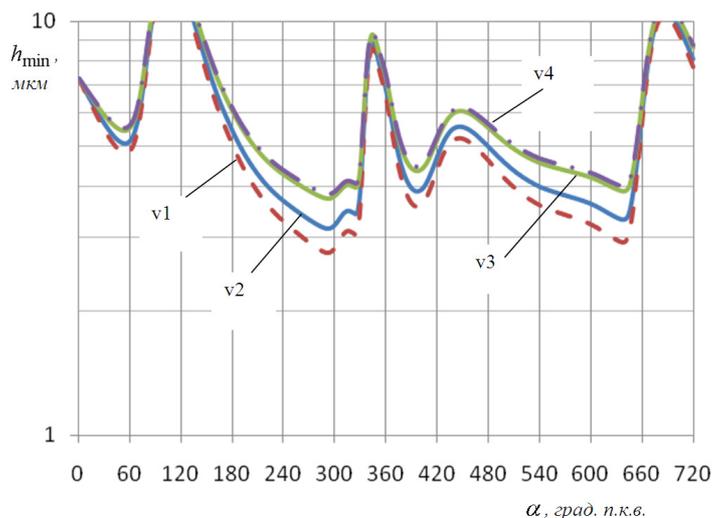


Рисунок 2. Зависимость минимальной толщины смазочного слоя от угла поворота коленчатого вала

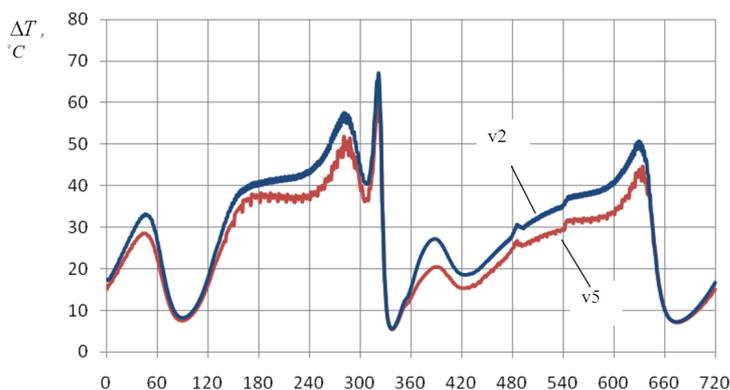


Рисунок 3. Зависимость приращения температуры в смазочном слое от угла поворота коленчатого вала

Оценка влияния высоковязкого граничного слоя.

Для демонстрации влияния высоковязкого граничного слоя на гидромеханические характеристики (ГМХ) сложнонагруженных ТС был выполнен расчет подшипника нижней головки шатуна двигателя ЧН 13/15, производства ОАО «ЧТЗ-Уралтрак». Результаты получены для двух расчетных вариантов:

1. СМ рассматривается как ньютоновская жидкость, температура в СС постоянна $T=100^{\circ}\text{C}$, граничный слой не учитывается.

2. СМ рассматривается как ньютоновская жидкость, температура в СС постоянна $T=100^{\circ}\text{C}$, учитывается наличие граничного слоя с параметрами $\mu_s = 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $l_h = 56 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, полученными экспериментально.

Результаты расчета приведены в таблице 1. Как видно из полученных результатов, при учете высоковязкого граничного слоя в процессе расчета получаем ГМХ, значения которых значительно отличаются от аналогичных данных, полученных без учета адсорбированного слоя. Из-за влияния высоковязкого граничного слоя потери на трение увеличиваются на 20%, а толщина СС – на 23%.

Результаты расчета ГМХ при различных значениях параметров вы-

Таблица 2. Значения расчетных ГМХ шатунного подшипника при возможных изменениях параметров адсорбционного слоя в интервале рабочих температур

№	ГМХ	N^* , Вт	$Q^* \cdot 10^3$, кг/с	T^* , °C	h_{\min}^* , мкм	sup p_{\max} , МПа	inf h_{\min} , мкм
	значения параметров						
v1	$\mu_s = 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $l_h = 0,08 \text{ мкм}$	392,5	9,587	121,3	5,725	179,6	3,156
v2	$\mu_s = 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $l_h = 0,032 \text{ мкм}$	396,8	9,407	121,9	5,375	179,8	2,755
v3	$\mu_s = 10^2 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $l_h = 0,106 \text{ мкм}$	388,5	9,801	120,6	6,245	179,2	3,737
v4	$\mu_s = 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $l_h = 0,056 \text{ мкм}$	388,5	9,850	120,5	6,334	179,3	3,816
v5	$\mu_s = 0$; $l_h = 0$	419,7	11,15	119,6	5,342	169,5	2,088

соковязкого слоя приведены на рисунках 2, 3 и в таблице 2. В расчетах были использованы параметры масел Mobil Delvac XHP (варианты v1, v2) и Shell Rimula R3X (варианты v3, v4). Вариант v5 отнесен к условному СМ без присадок.

Из полученных результатов следует, что учет высоковязких слоев приводит к увеличению расчетной минимальной толщины СС на 40–45%, температуры на 6–7%, максимальных гидродинамических давлений на 4–5%.

Учитывая, что в гидродинамических расчетах сложнагруженных ТС именно значение $\inf h_{\min}$ служит основным критерием работоспособности подшипника скольжения и косвенно характеризует скорость изнашивания поверхностей, то в рассматриваемом контексте оно

служит критерием оценки противоизносных свойств СМ.

Сложность выполнения многовариантных расчетов заключалась в том, что для возможности учета адсорбированного высоковязкого слоя необходимо в процессе построения дискретной сетки по толщине СС увеличивать количество узлов сетки минимум до 100. При более крупном разбиении получить результат, отражающий влияние адсорбированного слоя невозможно, т. к. толщина этого слоя для разных видов СМ колеблется от 0,3 до 10 мкм. В связи с этим варианты расчета, позволяющие учитывать высоковязкий слой, были выполнены на суперкомпьютере «СКИФ-Авропа ЮУрГУ».

22.08.2014

**Представленная работа выполнена при поддержке РФФИ
(проект НК-13-08-00875/14)**

Список литературы:

1. Мухортов, И.В. Полимолекулярная адсорбция смазочных материалов и ее учет в теории жидкостного трения / И.В. Мухортов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – №31 (248). – С.62–67.
2. Muchortov, I. Rheological Model of a Boundary Layer of Lubricant / Muchortov I., Zadorozhnaya E., Levanov I. // STLE 66th STLE Annual Meeting & Exhibition, 15–19 May, 2011, Hilton Atlanta, ~ Atlanta, Georgia (USA).
3. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
4. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / Под ред. Г. Парфита, К. Рочестера: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 488 с.
5. Леванов, И.Г. Обзор реологических моделей моторных масел, используемых при расчетах динамики подшипников скольжения коленчатого вала / И.Г. Леванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – № 10 (186). – С. 54–62.
6. Задорожная, Е.А. Применение неньютоновских моделей смазочных жидкостей при расчёте сложнагруженных узлов трения поршневых и роторных машин / Е.А. Задорожная, И.В. Мухортов, И.Г. Леванов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – №7. – С. 22–30.
7. Леванов, И.Г. Экспериментальные исследования реологических свойств всесезонных моторных масел / И.Г. Леванов, Е.А. Задорожная // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 11 (228). – С. 70–76.
8. Дерягин, Б.В. Поверхностные силы / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, М.В. Муллер. – М.: Наука, 1985. – 398с.
9. Алтоиз, Б.А. Физика приповерхностных слоев жидкости / Б.А. Алтоиз, Ю.М. Поповский – Одесса: Астро-принт, 1996. – 153 с.
10. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г.И. Фукс. – М. Машиностроение, 2003. – 327 с.
11. Мухортов, И.В. Усовершенствованная модель реологических свойств граничного слоя смазки / И.В. Мухортов, Н.А.Усольцев, Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – №5. – С.8–19.
12. Ходаков, Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и её экспериментальное обоснование/ Г.С. Ходаков // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2003. – т. XLVII. – №2. – С.33–44.
13. Kwak, K. Viscosity and thermal conductivity of copper oxide nanofluid dispersed in ethylene glycol / K. Kwak, C. Kim // Korea-Australia Rheology Journal. – 2005. – V. 17. – N 2. – Pp. 35–40.
14. Джейкок, М. Химия поверхностей раздела фаз / М. Джейкок, Дж. Парфит – М.: Мир, 1984. – 269 с.

Сведения об авторах:

Задорожная Елена Анатольевна, доцент кафедры автомобильный транспорт и сервис автомобилей Южно-Уральского государственного университета, кандидат технических наук,
e-mail elena-nea@rambler.ru

Мухортов Игорь Васильевич, доцент кафедры автомобильный транспорт и сервис автомобилей Южно-Уральского государственного университета, кандидат технических наук,
e-mail ivm999amp@yandex.ru

Леванов Игорь Геннадьевич, доцент кафедры автомобильный транспорт и сервис автомобилей Южно-Уральского государственного университета, кандидат технических наук,
e-mail il74-lig@rambler.ru

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, тел. (351) 2679213