

УДК 621.891

В.И. КУБИЧ¹, В.М. ЮРОВ²

¹Запорожский национальный технический университет, Украина

²Казахдинский государственный университет им.Е.А. Букетова, Казахстан

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ПЛЕНОЧНОГО ГОЛОДАНИЯ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ

Рассмотрен вопрос о роли поверхностного натяжения в трибологии. Экспериментально определено поверхностное натяжение некоторых смазочных материалов и его температурная зависимость. Предложена термодинамическая модель вязкости смазочного материала и условие оптимизации работы узлов трения. Показано, что уменьшение толщины пленки смазочного материала ниже критической величины приводит к тому, что смазочный эффект начинает исчезать и происходит переход к режиму сухого трения или пленочному голоданию.

Ключевые слова: трение, смазка, поверхностное натяжение, вязкость, термодинамика.

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АСПЕКТ ПЛІВКОВОГО ГОЛОДУВАННЯ В ТРИБОЗ'ЄДНАННЯХ

Розглянуто питання про роль поверхневого натяження в трибології. Експериментально визначено поверхневе натяження деяких змащувальних матеріалів і його температурна залежність. Запропоновано термодинамічну модель в'язкості змащувального матеріалу і умову оптимізації роботи вузлів тертя. Показано, що зменшення товщини плівки змащувального матеріалу нижче за критичну величину приводить до того, що змащувальний ефект починає зникати.

Ключові слова: тертя, мастило, поверхневе натяження, в'язкість, термодинаміка.

Введение. Разработка мероприятий по автоматизированному управлению процессами смазки в узлах трения транспортных средств является актуальной научно-технической задачей, решаемой для обеспечения их высокой параметрической надежности. Уровень параметрической надежности, безусловно связан с закономерностями изменения геометрических параметров трибосопряжений и толщинами смазочных слоев имеющих динамический характер изменения. Причем на контактных поверхностях, всегда действуют механизмы разрушения и генерации самоорганизующихся пленок, эффективность действия которых обуславливается как микрогеометрией контакта, так и реологическими свойствами использующихся смазочных материалов [1, 2].

Состояние проблемы. Нарушение сплошности смазочного слоя, как установившейся, так и неустойчивой структуры происходит за счет разрыва связей между цепными молекулами, что в целом предопределяет возникновение пленочного голодания [3]. Причем затрачиваемая на это энергия распаковки одного слоя (энергия разрыва связей) пропорциональна поверхностному натяжению смазочного материала и площади разрыва. Особенно важно это рассматривать при работе узлов трения на остаточных смазочных образованиях в зонах трения при задержках подачи компонентов используемого смазочного материала. На сегодня этот вопрос в трибологии пока активно не обсуждается, но

в некоторых областях и, в частности, в микроэлектронике этот вопрос стоит остро и всесторонне анализируется [4].

В условиях нарушения процессов смазки в зонах контакта микро и субмикронеровнейшей значимым влиянием стоит считать не только вязкостную составляющую процесса формирования несущего смазочного образования, но и термодинамическую характеристику поверхности раздела двух фаз, имеющую место при переходах от ламинарного к турбулентному движению потока смазочного материала [5,6]. По мнению ряда исследователей, вязкость и поверхностное натяжение - абсолютно независимые величины: вязкость - это динамическое явление (поперечные силы), а поверхностное натяжение - это статическая величина (силы взаимодействия поверхностей). На наш взгляд, это не так. Две физические величины одного элементарного объема должны быть связаны между собой, тем более, что при любой деформации взаимодействие поверхностей и сама поверхность изменяются. В ряде работ связь вязкости жидкости с ее поверхностным натяжением определена как экспериментально, так и теоретически. Например, в работе [7] получено, что $\nu/\sigma = f(T)$. Существует большое количество зависимостей вязкости от температуры, что говорит о неблагополучии в этой области. Ни одна из предложенных существующих зависимостей не может быть использована для выработки корректирующих или компенсирующих воздействий в процессе измерения результата. Обзор различных моделей приведен в работе [8].

Для инициирования процессов предотвращения нарушения сплошности смазочных слоев, например, в трибосопряжениях кривошипно-шатунного, газораспределительного механизмов двигателя внутреннего сгорания, зубчатых передачах трансмиссии, гидравлических передачах автомобиля, необходимы сведения о характере соотношений вязкости и поверхностного натяжения используемых смазочных материалов (товарные моторные масла на разных основах, трансмиссионные масла, гидравлические жидкости) при изменении теплового режима взаимодействия. Этому вопросу внимание должным образом не уделялось. Сведения, касающиеся характера изменения вязкостных свойств и сил упругости в тончайших локальных приповерхностных смазочных образованиях в зависимости от их температурного состояния на разных периодах эксплуатации узла трения (приработка, нормальное трение, начало перехода к патологическим разрушениям) будут важны для совершенствования алгоритмов управления его безаварийной работы.

Зависимость физических свойств малых частиц и тонких пленок от их размера является фундаментальной основой нанонауки (нанофизики, нанохимии, нанобиологии и т. д.) и нанотехнологии. Однако в трибологии систем со смазкой размерные эффекты исследованы недостаточно.

Постановка задачи. Исходя из значимости предупреждения пленочного голодания в узлах трения, возникает необходимость в комплексном представлении соотношений вязкости смазочных материалов и их поверхностных натяжений на границе фаз. В данной публикации рассмотрены составляющие развития термодинамического аспекта повышения надежности смазочных слоев при контактном взаимодействии материалов трибологических систем, а именно:

- влияние поверхностного натяжения в целом на работу узлов трения со смазкой;
- термодинамическая модель вязкости напряженно-деформированного объема смазочного материала;

- характер изменения коэффициента поверхностного натяжения смазочных материалов, распространено используемых в объектах машиностроения и их вязкости – как характеристик обеспечения сплошности смазочного слоя в трибосопряжениях;

- значимость учета размерной зависимости поверхностного натяжения.

Цель работы. Представление поверхностного натяжения смазочных материалов как фактора влияния на пленочное голодание.

Влияние поверхностного натяжения на работу узлов трения со смазкой

В работе [9] показано, что для оптимизации узлов трения со смазкой необходимо выполнение условия:

$$\sigma_{жст} \rightarrow \min, \quad \sigma_m - \sigma_{жс} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Здесь $\sigma_{жст}$ - поверхностное натяжение на границе раздела фаз - твердое тело-жидкость; σ_m - поверхностное натяжение твердого тела и $\sigma_{жс}$ - жидкости (смазки).

Поверхностное натяжение твердого тела на порядок больше поверхностного натяжения жидкости и для выполнения условия (1) применяют мелкодисперсные твердые присадки из порошков меди, олова, свинца, серебра, графита, дисульфидов молибдена и вольфрама [10,11], которые, очевидно, приводят к увеличению поверхностного натяжения смазки. Используют и наноразмерные порошки алмазов [12]. Влияние поверхностного натяжения на антифрикционные свойства материала вытекает из молекулярно-кинетической теории трения [13], согласно которой коэффициент трения определяется выражением:

$$k_{тр} = \int_0^L \sigma dl \approx \sigma L, \quad (2)$$

где L - длина пройденного пути.

На фрикционные свойства пар трения влияет большое количество факторов [14], что приводит к трудностям, как в теоретическом осмыслении фрикционного взаимодействия, так и в технологии создания трибологических систем с заданными параметрами и свойствами. Однако ситуация не столь безнадежна и многие исследователи обратили внимание на процессы самоорганизации трибологических систем [11,15,16], когда число управляющих параметров системы резко уменьшается. В работе [9] сделан вывод, что одним из управляющих параметров трибологических систем при их самоорганизации следует считать поверхностное натяжение трибосистем. Там же получен критерий R организованности трибологических систем в форме:

$$R = 1 - F \cdot \frac{\sigma_{жст}}{\sigma_m}, \quad (3)$$

где F - функция ряда параметров трибосистемы [9].

Основная причина в недооценки роли поверхностного натяжения в трибологии связана с тем, что определение поверхностного натяжения твердых тел представляет собой довольно трудную задачу. Экспериментальное определение поверхностного натяжения твердых тел затруднено тем, что их молекулы (атомы) лишены возможности свободно перемещаться. Исключение составляют чистые металлы при температурах, близких к температуре плавления, когда подвижность поверхностных атомов становится заметной. Предложенные в начале-середине XX века различные косвенные методы определения поверхностного натяжения твердых тел [17, 18] не изменились до настоящего

времени [19]. В работе [20] предложены новые методы определения поверхностного натяжения твердых тел, основанные на размерной зависимости их физических свойств и эта величина определена для 55 чистых металлов.

Термодинамическая модель вязкости

Выделим элементарный напряженно-деформированный объем смазочного материала. Будем считать, что он погружен в термостат - невозмущенная часть смазочного материала. Квантовые переходы, связанные с полем деформаций, приводят к диссипации энергии внешнего поля. Если считать, что выделенный объем обменивается с термостатом только энергией, то соответствующий ансамбль частиц выделенного элементарного объема будет каноническим. Функция отклика такого ансамбля на внешнее воздействие получена в работе [21]. Если в качестве функции отклика взять кинематическую вязкость ν , то получим следующее выражение:

$$\nu = C \cdot \frac{A}{G^0}, \quad (4)$$

где G^0 - энергия Гиббса термостата, A - работа внешних сил, C - постоянная.

Энергия внешних сил расходуется на разрыв молекулярных связей смазочного материала и равна $A = \sigma S$ (σ - поверхностное натяжение, S - площадь поверхности элементарного объема). Тогда уравнение (4) примет вид:

$$\nu = C \cdot \frac{\sigma}{G^0}, \quad (5)$$

Уравнение (5) выражает связь между кинематической вязкостью и поверхностным натяжением жидкой среды (смазочного материала).

Торп и Роджер предложили использовать следующую формулу для динамической вязкости $\mu = \nu \rho$, ρ - плотность:

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \alpha t + \beta t^2}, \quad (6)$$

где α , β - экспериментально определяемые параметры.

Кроме того, различными авторами (Кох, Гретц, Гааз, Слот, Дефф и др.) были предложены свои формулы. В настоящее время большинство авторов приходят либо к экспоненциальной зависимости вязкости от температуры [5]:

$$\mu = A e^{\frac{B}{T}} \quad (7)$$

либо к формуле Бачинского:

$$\mu = \frac{C}{V - b}, \quad (8)$$

где A , B , C - постоянные; b - удельный объем вещества, при котором вязкость становится бесконечно большой, т.е. «предельный объем»; $(V-b)$ - «свободный объем».

Температурная зависимость кинематической вязкости раствора может быть получена из формулы (2), аппроксимацией энергии Гиббса функцией [22]:

$$G^0 = A + BT + CT^2, \quad (9)$$

где A , B , C - постоянные.

Тогда формула (5) принимает вид:

$$\nu = C \cdot \frac{\sigma}{A + BT + CT^2}, \quad (10)$$

По форме формула (10) совпадает с уравнением Торпа и Роджера (6). Если учесть температурную зависимость поверхностного натяжения, о которой мы говорили выше, то получаем зависимость $\nu \sim 1/T$, которая неплохо описывает экспериментальные данные по температурной зависимости кинематической вязкости растительных масел, полученные в работе [23].

Уравнение (5) позволяет экспериментально определить важнейшую термодинамическую характеристику смазочного материала, и оценить процессы самоорганизации трибологических систем. Для этого достаточно измерить вязкость и поверхностное натяжение при двух температурах для исключения константы C . Поверхностное натяжение определяется по методике, изложенной ниже, а вязкость, - например, по методике [24].

Поверхностное натяжение смазочных материалов

Для определения коэффициента поверхностного натяжения смазочных материалов использовался расчетно-экспериментальный динамический стагмометрический метод, или метод счета капель. Материалы истекали из мерного сосуда с диаметром шейки $d=1,9$ мм, при этом температура изменялась с помощью нагревателя и холодильника в пределах от -7 °C до 85 °C. Количество опытов в каждом измерении составило пять. Для взвешивания отсчитанных капель использовались электронные весы Digital scale Capacity: 300gX0,01g.

Для исследований использовались следующие смазочные материалы:

- моторные масла: на минеральной основе 15W-40 Lukoil-Super; полусинтетические 10W-40 (Motul Gtoo, Motul 300V); синтетические 5W-40 (Mobil Ralli, Motul X-ess, Special Plus);
- трансмиссионное масло ТАД-17и по ГОСТ 23652-79;
- авиационное масло ИПМ-10 по ТУ 38.101299-90 ;
- индустриальное масло И-20А по ГОСТ 17479.4-87;
- экспериментальные масла на растительной основе: МХ-1000В - масло подсолнечное линолевого типа; Р(0:0) – масло рапсовое с высоким содержанием олеиновой кислоты [25].

Полученные расчетные данные наносились на поле координат YOX с целью последующего определения вида функциональной зависимости $\sigma=f(T)$. Анализ поля рассеивания расчетно-экспериментальных точек для каждого из масел позволил аппроксимировать характер их распределения линейной моделью вида $y=a_0-a_1x$. При этом среднее среднеквадратическое отклонение для каждой их точек лежащих на аппроксимированной прямой составило $\pm 1,7$ мНм⁻¹. Установленный вид закономерности согласуется с результатами, приведенными в работе [26]. Решение систем из двух алгебраических выражений с учетом значений крайних точек полей координат позволило получить математические выражения для расчета значений коэффициента поверхностного натяжения для каждой из групп исследуемых масел, которые приведены в таблице.

Для оценки полученных результатов выполнено следующее. Определены численные значения коэффициентов соотношения коэффициентов поверхностного натяжения моторных масел и их диапазонов кинематических вязкостей при температуре 100 °C: $K_\sigma = \sigma_{max}/\sigma_{min}$ и $K_\nu = \nu_{max}/\nu_{min}$.

Так, для рассмотренного летнего класса вязкости 40 коэффициент диапазона кинематических вязкостей для масел рассмотренных масел $K_\nu = 16,3:12,5 = 1,3$ [27]. С учетом среднего среднеквадратического отклонения диапазон изменения прогнозного значения коэффициента поверхностного натяжения составил $18,1-22,1$

мН·м⁻¹, а коэффициент $K_{\sigma} = \sigma_{max}/\sigma_{min} = 22,1/18,1 = 1,22$ соответственно. Расхождение сравниваемых коэффициентов находится в пределах 7%. Это свидетельствует о следующем. Во-первых, о воспроизведении физической сути процессов, происходящих в смазочных материалах при изменении температуры по термодинамической характеристике поверхности раздела двух фаз «жидкость-газ». Во-вторых, о достоверности полученных результатов, поскольку они логично увязываются с существующими результатами.

Таблица

Сводные данные по группам масел

Наименование масла, класс вязкости, марка	Формула для определения σ , мН·м ⁻¹
Моторное 15W-40 Lukoil-Super	$\sigma = 46,6 - 0,21T$
Моторное 10W-40 (Motul Gtoo, Motul 300V)	$\sigma = 44,8 - 0,25T$
Моторное 5W-40 (Mobil Ralli, Motul X-ess, Special Plus)	$\sigma = 48,4 - 0,28T$
Трансмиссионное ТАД-17и	$\sigma = 43,5 - 0,11T$
Авиационное ИПМ-10	$\sigma = 38,7 - 0,06T$
Индустриальное И-20А	$\sigma = 37,5 - 0,11T$
Растительное МХ-1000В подсолнечное (при T=-3°C твердое агрегатное состояние)	$\sigma = 41,3 - 0,09T$
Растительное Р(0:0) рапсовое	$\sigma = 37,8 - 0,06T$

Графическая интерпретация характера изменения динамической вязкости моторных масел и их коэффициента поверхностного натяжения (пересечение линий графиков одного поля) позволяет определять интервал температуры в зоне контакта для наиболее благоприятного проявления объемно-поверхностных свойств пленочных образований для предотвращения возможного нарушения их сплошности. Так, для рассмотренных моторных масел $T_{раб} \approx 16-39$ °С. Аналогичным образом определяются рекомендованные границы температурного состояния для других смазочных материалов.

Учет размерной зависимости поверхностного натяжения

Основы термодинамики криволинейных границ были заложены еще Гиббсом и затем развиты его учениками. В 1949 г. Р.Толмен [28] вывел уравнение для поверхностного натяжения σ :

$$\sigma / \sigma_{\infty} = (1 + 2\delta / R_s)^{-1} \quad (11)$$

Здесь σ_{∞} - поверхностное натяжение для плоской поверхности; R_s - радиус поверхности натяжения; $\delta > 0$ - расстояние между эквимолекулярной разделяющей поверхностью и поверхностью натяжения для плоской границы.

Считается, что порядок величины параметра δ , называемого толменовской длиной, должен быть сравним с эффективным молекулярным диаметром a . При $R \gg \delta$ формула Толмена может быть переписана в виде:

$$\sigma / \sigma_{\infty} = 1 - 2\delta / R. \quad (12)$$

Для малых R А.И. Русанов [29] получил асимптотическую линейную зависимость:

$$\sigma = KR \quad (13)$$

Здесь K - коэффициент пропорциональности. Формула (13) получена на основе термодинамического рассмотрения и должна быть применима к малым объектам различной природы. Однако, границы применимости формулы (13) и значения параметра K остаются до сих пор практически не исследованными.

В работе [30] на основе термодинамической теории возмущений получены обе формулы (12) и (13), но параметры K и δ также остались не определенными. В работе [18] получено уравнение:

$$\sigma = \sigma_{\infty} \cdot \begin{cases} 1 - d/r, & r \geq d, \\ 1 - d/d + r, & r \leq d. \end{cases} \quad (14)$$

Первое выражение в формуле (14) формально аналогично уравнению (12), но параметр d имеет определенное значение:

$$d = \frac{2\sigma_{\infty} \cdot v}{RT}, \quad (15)$$

где v - молярный объем, R - газовая постоянная, T - температура.

Обратимся к таблице с сводными данными по группам масел и рассчитаем параметр d , например для рапсового масла. Для него из литературных данных известны: молярная масса - 894,3 г/моль; плотность - 0,914 г/см³. Тогда молярный объем $v = 978,5 \cdot 10^{-6}$ м³/моль. При температуре $T = 300$ К из полученного математического выражения для рапсового масла $\sigma_{\infty} = 19,8$ мН/м.

Подставляя все значения в (15), получим $d = 15$ нм. Используя этот результат, мы можем определить величину поверхностного натяжения смазки при любой ее толщине. Например, при толщине пленки масла в 1 нм величина $\sigma_{(1 \text{ нм})} = 1,2$ мН·м⁻¹, а при толщине в 500 нм $\sigma_{(500 \text{ нм})} = 0,5$ мкм величина $\sigma_{(0,5 \text{ мкм})} = 19,2$ мН·м⁻¹, т.е. близка к поверхностному натяжению толстой пленки.

Таким образом, при изменении толщины смазочного материала от 0,5 мкм до 1 нм, поверхностное натяжение уменьшается на порядок. Если обратиться к условию (1), то видно, что уменьшение толщины пленки ниже критической величины приводит к тому, что смазочный эффект начинает исчезать и мы переходим к режиму сухого трения или пленочному голоданию.

Выводы. Рассмотренные подходы к оценке термодинамической модели напряженно-деформированного объема смазочного материала указывают на необходимость учета не только поверхностного натяжения на границах фаз материалов трибологических систем, но и размерной зависимости свойств смазки при уменьшении толщины смазочного слоя. При этом получены формулы для определения поверхностного натяжения некоторых смазочных материалов, что позволяет интерпретировать оптимальный температурный режим исчезновения смазочного эффекта и переход к пленочному голоданию.

Наличие данных о молярных массах смазочных материалов, закономерностей изменения соотношений их коэффициентов поверхностного натяжения и вязкости при применении товарных присадок, например реметаллизантов, геомодификаторов, укажет на особенности поведения смазочных слоев в трибосопряжениях. Причем речь должна идти как о циркулирующем смазочном материале в трибологической системе, так и о структурах, упорядоченно сформированных и связанных между собой и непосредственно с материалами контактируемых поверхностей. Обозначенное представляется как направление дальнейших исследований.

Список литературы

1. Шевеля В.В. Трибохимия и реология износостойкости. / Шевеля В.В., Олександренко В.В. - Хмельницкий: ХНУ, 2006. - 278 с.
2. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. - 368 с.
3. Хайдаров Г.Г., Хайдаров А.Г., Машек А. Ч. Майоров Е.Е. Влияние температуры на поверхностное натяжение // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4. 2012. Выпуск 1. с.24-28
4. Хоботнев О.Ю. Математическая модель формирования сплошных тонких пленок центрифугированием в производстве элементной базы микроэлектроники / Авт. реф. канд. дис., Воронеж, 2006. - 23 с.
5. Березин К.Г. Построение безразмерного критерия для оценки антизадирных свойств поверхностно-активных смазочных материалов /К.Г. Березин, В.А. Годлевкий, Б.Р. Киселев, А.О. Магницкий // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. - №4 (24). - 2010. - С.67-71
6. Солоненко Л.А. Модификация поверхностного натяжения СОЖ присадками из полифункциональных производных органических кислот C₃-C₄ /Л.А. Солоненко, М.А. Тлехусеж М.А., Л.Н. Сорочкая // Фундаментальные исследования. - №, 2008 [электронный ресурс]
7. Марков И.И. О взаимосвязи коэффициента поверхностного натяжения и коэффициента вязкости жидкости /:Марков И.И., Хрынина Е.И. // Вестник СевКавГТУ Серия «Физико-химическая», №1 (8), 2004. - С. 80-82.
8. Малкин А.Я. Реология: концепции, методы, приложения./ Малкин А.Я., Исаев А.И. - СПб. Профессия, 2007. - 560 с.
9. Юров В.М. Некоторые вопросы самоорганизации трибологических систем, содержащих тонкие слои смазочного материала / Юров В.М., Кубич В.И. // Материалы 9-ой междунар. конфер. «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент.», Караганда, 2015. - С. 185-189.
10. Тартаковский И.Б. К расчету деталей машин на износ. Износ и антифрикционные свойства материалов. - М.: Наука, 1968. - 68 с.
11. Гаркунов Д. Н. Избирательный перенос в узлах трения. - М.: Транспорт, 1969. - 104 с.
12. Долматов В.Ю. Детонационные алмазы в маслах и смазках // Сверхтвердые материалы, 2010, №1. - С. 19-28.
13. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
14. Дроздов Ю.Н. Прогнозирование изнашивания с учетом механических, физико-химических и геометрических факторов. / В кн.: Современная трибология: Итоги и перспективы. Отв. ред. К.В. Фролов. - М.: Издательство ЛКИ, 2008. - С. 24-32.
15. Кравчик К. Трибологическая идентификация самоорганизации при трении со смазкой // Автореферат доктора тех. наук, Ростов-на Дону, 2000. - 25 с.
16. Баранов А.В. Самоорганизация трибосистем при граничном трении металлов / Баранов А.В., Вагнер В.А., Тарасевич С.В. // Ползуновский вестник, 2009, №1-2. - С. 155-158.
17. Гегузин Я.Е. Методы определения поверхностной энергии твердых тел / Гегузин Я.Е., Овчаренко Н.Н. // УФН - 1962.-Т.76.-Вып. 2. - С. 283-305.
18. Гохштейн А.Я. Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция.- М.: Наука, 1976.- 256 с.
19. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности. - Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008.-508 с
20. Юров В.М. Размерные эффекты и поверхностное натяжение чистых металлов / Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко В.А. и др. // Успехи современного естествознания, 2012, №7. - С. 88-93.
21. Юров В.М. Поверхностное натяжение твердых тел // Вестник КарГУ, сер. Физика, 2007. - № 1(45). - С. 23-29.

22. Булах А.Г., Булах К.Г. Физико-химические свойства минералов и компонентов гидротермальных растворов / Булах А.Г., Булах К.Г. - Л.: Недра, 1978. - 167 с.
23. Менумеров Э.Р. Влияние антиоксидантных присадок на вязкостно-температурные свойства СОТС растительной природы // www.kpi.kharkov.ua
24. Баланін В.Х. Спосіб визначення залежності динамічної в'язкості мастильних матеріалів від температури і пристрій для його здійснення / Баланін В.Х., Закієв І.М., Запорожець В.В. / Патент України на винахід № 76312, 2006, Бюл. № 7.
25. Кравцов А.Г. Підвищення зносостійкості трибосистем гідромашин використанням робочих рідин рослинного походження. Авт. реф. канд. дис. Харьк. нац. тех універс. сільск. господ. - 2013. - 20 с.
26. Жосан А.А. Впрыск и горение рапсового масла и дизельного топлива в современных дизелях / А.А. Жосан, Ю.Н. Рыжов, А.А. Курочкин // Вестник Орел ГАУ .- 2012. - С.130-132
27. Анисимов И.Г., Бадыштова К.М., Бнатов С.А. и др. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. / Бадыштова К.М., Бнатов С.А. и др. - Справочник / 2-е изд., перераб. и доп. - Под ред. В.М. Школьников. - М.: Техинформ, 1999. - 596 с
28. Tolman R.C. The effect of droplet size on surface tension. // Journal of Chemical Physics. -1949. -V. 17, № 2. - P. 333-337.
29. Русанов А.И. Термодинамика поверхностных явлений. - Л: Изд-во Ленинградского ун-та, 1960. -180 с.
30. Сдобняков Н.Ю. Размерная зависимость поверхностного натяжения наночастиц и проблема их термодинамической устойчивости // Автореферат кандидата физ.-мат. наук, Тверь, 2003. - 23 с.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2016

V.I. KUBICH, V.M. YUROV

THERMODYNAMIC ASPECTS FILM STARVATION IN FRICTION UNITS

The paper considers the role of the surface tension in tribology. The experimentally determined surface tension of certain lubricants and its temperature dependence. It is shown that the graphic interpretation of the nature of changes the dynamic viscosity engine oils and their surface tension (the intersection of the field lines of the graphs) allows to determine the temperature interval in the contact zone for the most favorable manifestations of body-surface properties of film formation in order to prevent violations of their continuity. For the considered motor oils $\text{Trab} \approx 16-39^\circ \text{C}$. A thermodynamic model of the viscosity of the lubricant condition and optimization of friction units. A decrease in the thickness of the lubricant film below the critical value leads to the fact that the lubricating effect begins to disappear, and a transition to a mode of dry friction or film starvation.

Keywords: friction, lubrication, surface tension, viscosity, thermodynamics.

Кубич Вадим Иванович - к-т. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобилей, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Україна, 69063, тел./факс: +38-0612 764 26 47, E-mail: reibubg1@mail.ru.

Юров Виктор Михайлович - к-т физ. мат. наук, доцент, директор Научно исследовательского центра "Ионно-плазменных технологий и современного приборостроения», Карагандинский государственный университет им.Е.А. Букетова, ул. Юбилейная, 33, г. Караганда, Казахстан, +7-7212 78 61 78, E-mail: exciton@list.ru