

А.В. ЗАХАРЧЕНКО, ст. преп. каф. автомобильного транспорта
Университета "Украина", Киев

ТОЛЩИНА СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

На основании современных трибологических источников предлагается аналитический обзор путей решения проблемы выбора по толщине смазочного слоя в трибосопряжении определённого смазочного материала, который соответствует конкретным условиям эксплуатации. Систематизированы требования для нахождения пороговых значений вида смазки, который может быть охарактеризован определённым параметром, поддающимся численной оценке и есть необходимым для технической диагностики трансмиссионных масел.

На підставі сучасних трибологічних джерел пропонується аналітичний огляд шляхів вирішення проблеми вибору за товщиною змащувального шару у трибосопряженні визначеного мастильного матеріалу, який відповідає конкретним умовам експлуатації. Систематизовано вимоги для знаходження порогових значень виду мащення, який може бути охарактеризований за певним параметром, що піддається чисельній оцінці і є необхідним для технічної діагностики трансмісійних олив.

On the basis of tribology sources the analytical review of the ways to resolve the problem of choice according to the thickness lubricant layer in the tribolinkings of oil material appropriate for the specific conditions of operation is suggested. The requirements are systematised for detection of threshold values of the lubricant kind that is characterised with the quantitatively assessed parameter needed for technical diagnostics of gear oils.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный материал о субмикромеханике процесса трения при граничной смазке (ГС), что позволило Спайксу, оценивая успехи трибологии в этом направлении, стимулируемые бурным развитием экспериментальной техники за последние десятилетия, утверждать в 1997г. [1], что "в один прекрасный день мы, наконец, будем представлять ясно, что такое граничная смазка". Но даже сегодня мы не рискуем точно предсказать, когда этот "прекрасный день" настанет. И, разумеется, тем более, трудно определённо назвать день, начиная с которого успехи в изучении и описании процесса ГС позволят довести теорию рассматриваемого процесса до уровня инженерных расчётов, подобно теории гидродинамической смазки. Ясно только, что переход на стадию инженерных расчётов станет возможным лишь после достижения более ясного понимания природы рассматриваемого процесса, и, в частности, после уточнения данных о свойствах и строении граничных смазочных слоёв (ССл) и механизме их образования и разрушения [2-5].

Постановка проблемы. Одной из характеристик процесса трения и состояния смазочного слоя при исследованиях служит толщина слоя масла в месте наибольшего сближения поверхностей контакта [6]. Толщина (ССл) оказывает влияние на работоспособность и долговечность механизмов. От неё зависят контактная прочность, износостойкость, несущая способность по заеданию, силы трения, величина потерь, температура силовых контактов [7].

Анализ последних исследований и публикаций следует начать с того, что многие исследователи проявляли исключительный интерес к измерению

толщины масляной плёнки (МП) между контактирующими поверхностями подшипников скольжения [8-9], зубчатых передач [6, 8, 10, 11], фрикционных передач [12] или на моделирующих машинах трения (МТ) [13-17]. Однако исследователей интересовало не только абсолютное значение толщины МП, но и форма ССл. Наиболее корректно измерения толщины МП на роликовой МТ в условиях фрикционного качения с 10%-ным скольжением провёл В.М. Райко [6, 14]. Многочисленные работы А. Камерона, Мак-Конохи проведены по измерению толщины МП в зубчатых передачах [18] и на специальных установках [16]. Исследования толщины МП на роликовых МТ при качении с проскальзыванием, проведенные С.И. Эль-Сизи и Г.С. Шауки [11], показали, что толщина МП уменьшается с увеличением объёмных $T_{об}$ температур смазочного материала (СМ), нагрузки, скольжения и это совпадает с выводами контактно-гидродинамической теории смазки. Интересным результатом этих экспериментов было то, что увеличение толщины МП происходило при увеличении скольжения из-за встречного вращения роликов. А.В. Крук [19] опубликовал свои многолетние экспериментальные исследования толщины ССл между вращающимися роликами с измерением поверхностных $T_{п}$ температур и силы трения F_T в случае фрикционного качения. Процент металлического контакта и толщину МП при точечном начальном касании определял Фьюри [20]. Работы по изучению смазочного действия на зубчатых колёсах и роликах проводились в Японии [21]. В китайской работе [22] обсуждается влияние времени при смазке тонкими плёнками и показано, что толщина МП, образованной в сосредоточенном контакте, связана со временем формирования и преддисторией.

Свойства граничного ССл значительно отличаются от свойств СМ, составляющего объёмный слой. Толщина граничного ССл h зависит от нагрузки, скорости перемещения, состава и свойств СМ и может варьировать от нескольких единиц до 400-500 молекулярных слоёв и в зависимости от среднего размера молекулы может составлять 0,5-0,8мкм [23, 24].

Известно, что гидродинамические свойства жидкости при ГС проявляются при толщине МП более 0,1мкм [25-27]. Как показывают исследования, h при эксплуатации машин реализуется от 0,2 до 1500мкм. Это указывает на развитие гидродинамических процессов в зоне контакта и возможности описания их общими законами гидромеханики жидкостей. И.В. Крагельским [25] была высказана гипотеза о влиянии шероховатостей в зоне контакта тел на коэффициент трения f и износ при условиях ГС. Развивая эту гипотезу, ряд авторов показали, что в зоне контакта при наличии шероховатостей образуются масляные клинья, повышающие несущую способность пар трения (ПТ) и существенно изменяющие гидродинамику и режим процесса [28]. По оценкам, полученным различными методами, h колеблется в широких пределах: от десятков нм [29, 30] до десятков мкм [26, 31-34]. В работе [35] по полученным данным испытаний вычислены толщина МП и число Даусона, характеризующее отношение минимальной толщины МП к высоте шероховатости. Результаты экспериментальных работ [36, 37], выполненных на роликовых МТ, показали хорошее совпадение толщины ССл, рассчитанного по контактно-гидродинамической теории смазки, с толщиной, полученной в процессе

измерения, что дало некоторым исследователям основание утверждать, что контактно-гидродинамическая теория имеет лучшее экспериментальное подтверждение, чем любой другой аспект теории смазки [38].

Однако более тщательное изучение обнаружило в оценке h значительное расхождение в абсолютной толщине ССл, рассчитанной по контактно-гидродинамической теории смазки и определённой экспериментально. Д. Сэнборн [39] получал толщину ССл, в большинстве случаев, меньше теоретической, тогда как в работах [16, 40-43] показано превышение экспериментальных результатов над теоретическими. Экспериментально полученная авторами работы [16] минимальная толщина МП равна 200\AA , причём существование гидродинамической плёнки зарегистрировано, вплоть до пластической деформации контактирующих поверхностей. По мнению Ю.А. Розенберга суммарная толщина всех возможных граничных плёнок, включая оксидные, обычно не превышает $0,1-0,2\text{ мкм}$. В тяжело нагруженных локальных контактах максимальная толщина ССл не превышает $4-6\text{ мкм}$. Часто встречающиеся в контактах рабочих поверхностей зубчатых передач, подшипников качения, кулачковых механизмов (и других) толщины ССл не превышают значений $1-2\text{ мкм}$ [44].

Г.И. Фуксом проведены исследования с целью выяснения механизма действия пакета присадок, повышающих смазочную способность масла [45]. Им установлено, что граничные свойства жидкостей наблюдаются при толщине ССл менее $0,3-0,4\text{ мкм}$. При большей толщине возникает гидродинамический режим, когда трение определяется вязкостью СМ [46]. Толщина МП на зубчатых колёсах, вычисленная по данным измерения электрического сопротивления, изменяется от 1 до 150 мкм . Исследователи считают, что толщина МП уменьшается с ростом нагрузки и достигает наибольшего значения в окружности зацепления зубьев благодаря низкой скорости скольжения; что подтверждается картиной износа зубьев [47].

М.В. Райко в работе [42] такие расхождения теории с экспериментом объясняет различными условиями трения, приводившими к качественным различиям в процессах смазки, а также принципиальными недостатками применявшихся методов измерения толщины МП [48-50]. Такой значительный разброс свидетельствует о сложности самого процесса их формирования и существенной зависимости от большого количества факторов [51]. В работе [36] значительные превышения экспериментальных значений толщин ССл над теоретическими, в условиях малых скоростей качения и повышенных температур, объясняются эффектом утолщения ССл за счёт проявления негидродинамического (граничного) действия смазки, заслуживающего дальнейшего изучения [52].

Ряд исследований, свидетельствует о плавном росте h в условиях трения качения со скольжением при увеличении скорости качения, вязкости и пьезокоэффициента вязкости СМ в связи с выглаживанием (приработкой) трущихся поверхностей, после чего наступает стабилизация значений толщины ССл в течение многих часов. С ростом толщины ССл изнашивание уменьшается, т.к. при этом уменьшаются сдвиговые напряжения в масляном слое. Эксперименты и расчёты также показывают уменьшение слоя с ростом скорости

скольжения, температуры и контактных напряжений [44], что связано, по-видимому, с десорбцией молекул смазки с поверхности трения и, достигнув минимума при определённой $T_{об}$, толщина ССл вновь начинает увеличиваться в связи с активизацией хемосорбционных процессов [53-58]. Актуальность исследований процесса приработки трущихся поверхностей совершенно справедливо отмечал ранее Д. Хейс [59]. По мнению авторов [60], в общем случае зависимости объёма изношенного материала и скорости объёмного износа от времени в процессе приработки имеют вид, представленный на рисунке 1. Всё многообразие переходных характеристик силы (момента) трения может быть сведено к зависимостям, приведенным на рисунке 2, что вызвано перестройкой структуры поверхностных и подповерхностных слоёв материалов к новым условиям. Время, в течение которого происходит резкое увеличение скорости изнашивания и силы трения от начальных значений до максимальных, несоизмеримо мало по сравнению со временем приработки, которое для реальных узлов трения колеблется от нескольких минут до десятков часов. Логично предположить, что первоначальное (резкое) изменение скорости изнашивания может быть отражено как безинерционность трибосистемы, а дальнейший процесс приработки, как проявление инерционных свойств к изменившимся условиям. Причём, исходя из анализа работ [53-58], когда толщина ССл после приработки в зубчатой передаче достигает максимального значения, f становится минимальным. Доказано, что f зависит от толщины МП (рисунок 3). Следует отметить, что существует оптимальная толщина ССл, которой соответствует минимальное трение [61]. Анализ выражений для толщины МП и их экспериментальная проверка [62, 63] подтвердили правильность теоретических выводов.

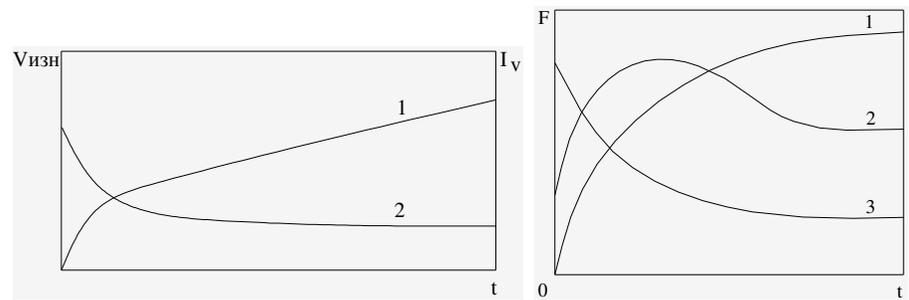


Рисунок 1 – Зависимости объёма изношенного материала $V_{изн}$ (1) и скорости объёмного изнашивания I_V (2) от времени работы трибосопряжения [60]

Рисунок 2 – Различные варианты переходных характеристик силы трения [60]

Однако количественные данные о влиянии толщины ССл на изнашивание в литературе почти отсутствуют. Влияние толщины МП, образуемых минеральным маслом нафтенового основания без присадок, в условиях различных режимов смазки на интенсивность изнашивания трущихся поверхностей изучалось авторами работы [64]. Исходили из представления, что в эксплуатационных условиях при эластогидродинамической смазке плёнки, образуемые маслами и присадками, имеют толщину от $0,5$ до 20 мкм [65]. Высокие

удельные давления в зоне фрикционного контакта вызывают соответствующий резкий рост вязкости СМ, чем и обеспечивается несущая способность плёнки. Однако снижение скорости скольжения, рост нагрузки или применение маловязкого СМ может и в условиях наличия указанной плёнки, толщина которой снижается, приводить к непосредственному контакту микровыступов шероховатостей. Было установлено, что количество продуктов износа и степень их дисперсности резко снижается при удельной толщине плёнки $\lambda > 2$.

Под λ понимается [64-68] отношение h , образуемой смазочными композициями между трущимися поверхностями, к сумме средних квадратичных значений высот микровыступов шероховатостей на этих поверхностях σ :

$$\lambda = h / \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}.$$

Критические значения λ определялись разными авторами [66-68]. Так в работе [68] приведён график (рисунок 4,а), отражающий влияние λ на характер режима смазки. Как видно, при $\lambda < 1$ (область С) создаётся максимальное контактное взаимодействие микровыступов, при котором проявляются противоизносные свойства плёнок, образованных присадкой при химическом модифицировании поверхностей трения. В области А, характеризуемой $\lambda > 4$, и в области ~В ($\lambda > 2$) непосредственное контактное взаимодействие микровыступов шероховатостей исключено и должно отсутствовать адгезионное изнашивание. В работе [66] отмечается, что λ , образуемая маслом и присадкой, является важнейшей характеристикой противоизносных свойств смазочной композиции. Например, на рисунке 4,б показано влияние λ на длительность непосредственного контакта микровыступов шероховатостей (определено методом измерения электрического сопротивления). Видно, что при значении $\lambda > 4$ непосредственный контакт должен отсутствовать.

В связи с тенденцией к использованию маловязких СМ с целью снижения потерь на трение авторы работы [68] изучали, как скажется снижение

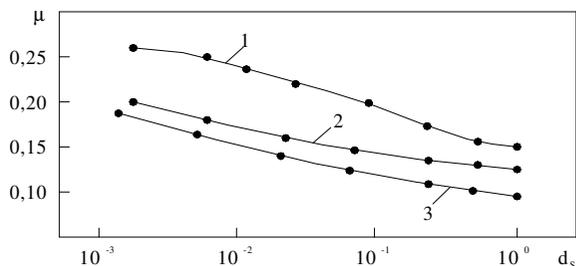


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения μ от толщины масляной плёнки d_s для различных масел [61]

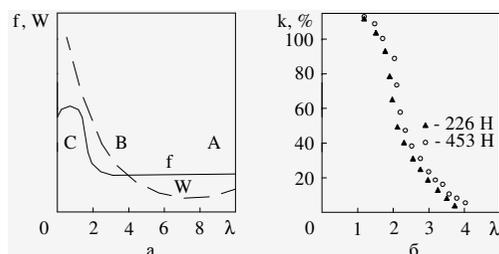


Рисунок 4 – Влияние удельной толщины плёнки λ , образуемой маслом и присадкой: а – на трение f и износ W [68]; б – на число актов непосредственного контактного взаимодействия микровыступов шероховатостей k , определённых методом измерения электрических сопротивлений [66]

вязкости масла на уменьшении λ и, тем самым, на изменении режима смазки и процесса изнашивания. Было установлено, что при снижении вязкости масла до $5-4 \text{ мм}^2/\text{с}$ (при 100°C) скорость изнашивания резко возросла (рисунок 5) несмотря на наличие присадок в масле. А методом феррографии было обнаружено значительно меньше продуктов износа после испытания масла вязкостью $8,3 \text{ мм}^2/\text{с}$, чем после испытания масла вязкостью $2,3 \text{ мм}^2/\text{с}$, и размер частиц был значительно меньшим.

Развивая представления о влиянии λ при различных режимах смазки на трение и износ, авторы работы [69], обобщив результаты собственных исследований и работ других авторов, предложили строить известную кривую Штрибека в координатах: $f=f(\lambda)$ (рисунок 6). Из формы этой кривой, как указывается, можно ожидать, что при $\lambda \geq 3$ будет реализовываться гидродинамическая смазка, при $1 < \lambda < 3$ – смешанная и при $\lambda < 1$ – превалирует ГС. Соответственно, предотвращение или снижение износа можно обеспечивать за счёт: а) полного разделения трущихся поверхностей, исключая непосредственный контакт микровыступов шероховатостей; б) образования на поверхностях трения физически адсорбированных или хемосорбированных плёнок из газов (паров), жидкостей или растворённых в последних химических соединений; в) образования на поверхностях вязких плёнок при химическом взаимодействии СМ с металлом; г) нанесения на одну или обе поверхности твёрдых плёнок или покрытий с высокой адгезией к поверхностям.

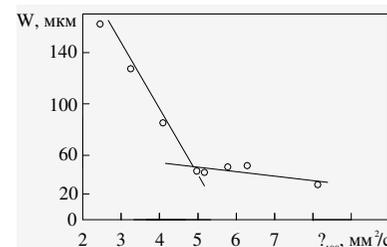


Рисунок 5 – Влияние вязкости v_{100} вазелинового масла с 1% диалкилдитиофосфата цинка на износ W [68]

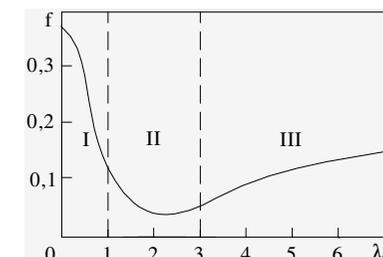


Рисунок 6 – Кривая Штрибека, построенная на основе значений удельной толщины смазочной плёнки λ [69]: I – граничная смазка; II – смешанная смазка; III – гидродинамическая смазка; f – коэффициент трения

Р. Файном выделяются следующие основные процессы изнашивания при ГС, которые развиваются как самостоятельно, так и в сочетании с другими: трибокоррозионный, адгезионный, усталостный и абразивный. К механизму химического трибокоррозионного (коррозионно-механического) изнашивания относят действие противоизносных и противозадирных присадок, химически взаимодействующих с металлами поверхностей трения (органические дисульфиды, органофосфаты и др.). Для условий адгезионного изнашивания при ГС существенно важным для снижения интенсивности изнашивания яв-

ляется превалирование скорости химических реакций противоизносных присадок над скоростью истирания продуктов реакций, являющихся "противоизносной плёнкой". При обратном соотношении этих скоростей над адгезионным изнашиванием превалирует трибокоррозия. При усталостном изнашивании, развивающимся главным образом при циклическом деформировании поверхностей трения, снижению изнашивания способствует увеличение λ . Вместе с тем, отмечается, что поскольку циклическое нагружение передаётся на поверхности трения через слой СМ, с увеличением его толщины не обеспечивается автоматического снижения усталостного износа.

Отвечая на вопрос о том, можно ли считать более перспективным, чем совершенствование противоизносных свойств СМ, изменение металлургии и технологии производства металлов поверхностей трения, авторы [69] подчеркнули, что по их данным совершенствование противоизносных свойств масел позволило увеличить максимальную нагрузку металлов в парах трения до 200-500Н, а совершенствование металлов той же пары трения при работе без масла до 5-10Н.

В ином ключе рассматривается возможный механизм противоизносного действия присадок к маслам в условиях высоких нагрузок и скоростей скольжения в работе [70]. При таких трибологических условиях присадки типа диалкилдитиофосфата цинка образуют продукты, которые формируют более толстые плёнки на поверхностях трения, чем базовые масла, т.е. трущиеся поверхности разделяются в большей мере, при этом меняется характер образующихся продуктов износа. Иными словами происходит не химическое действие при ГС, а реализуется эластогидродинамическая смазка. Это совпадает с точкой зрения Ж. Жорж [71].

Выводы. Приведённые выше соображения и данные указывают на исключительную важность одновременного исследования граничных процессов в контакте и измерения толщины МП на реальных конструкциях, что позволяет уточнить данные, которые получены на моделирующих установках трения, и изучить влияние различных факторов на толщину МП. Таким образом, обзор результатов экспериментальных исследований толщины МП между контактирующими поверхностями, полученных на различных МТ и реальных конструкциях, показывает в связи с этим, что определение толщины смазочного слоя h имеет принципиальное значение как для понимания механизма протекающих процессов во фрикционном контакте, так и для развития расчётных методик.

Список литературы: 1. *Spikes H.* Advances in the study of thin lubricant films // *New Directions in Tribology / Ed. by I.M. Hutchings.* – Bury, St. Edmunds and London: MEP. – 1997. – P.67-82. 2. Современная трибология: Итоги и перспективы / Э.Д. Браун, И.А. Буяновский, Н.А. Воронин и др. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480с. 3. *Биякович О.Н., Захарченко А.В., Корбут Ю.М.* Актуальность трибологических исследований // Пр. Міжнар. наук. конф. "Політ 2004". – К.: НАУ, 2004. – С.173. 4. *Биякович О.Н., Захарченко А.В., Корбут Ю.М.* Современные трибологические представления о процессах в зоне контакта зубчатых зацеплений // *Наука і молодь.* – К.: НАУ, 2004. – С.195-198. 5. *Захарченко А.В.* Современные трибологические представления о технических маслах как основном элементе смазываемого сопряжения // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць.* Тем. вип.

"Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №30. – С.192-199. 6. *Райко М.В.* Смазка зубчатых передач. – К.: Техніка, 1970. – 196с. 7. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. *И.В. Крагельского, В.В. Алипина.* – М.: Машиностроение, 1979. – Кн.2. – 358с. 8. *Кодниц Д.С.* Контакт-гидродинамическая теория смазки. – Куйбышевское книжное издательство, 1963. – 184с. 9. *Коровинский М.В.* О некоторых вопросах эластореологии, имеющих приложение в теории трения // Трение и износ в машинах. – М.: АН СССР, 1962. – Вып.17. – С.121-164. 10. *Реицков В.Ф., Дроздов Ю.Н.* Исследование состояния масляной плёнки в тяжело нагруженном контакте // Динамика и прочность механических систем. – Пермь: Пермский политехнический институт, 1970. – №82. – С.128-137. 11. *El Si-Si S.J., Shaiku G.S.* Measurement of oil film thickness between disks by electrical conductivity // *Journal of Basic Engineering, Trans. ASME.* – 1960. – Ser.D. – Vol.82, №1. – P.48-56. 12. *Красеньков В.И., Смирнов В.И.* Конструкция и расчёт бесступенчатых фрикционных передач // Расчёты на прочность. – М.: Машгиз, 1960. – №5. – С. 59-108. 13. *Петрусевич А.И.* Роль гидродинамической масляной плёнки в стойкости и долговечности поверхностей контакта деталей машин // *Вестник машиностроения.* – 1963. – №1. – С.4-5. 14. *Райко М.В., Павлов В.Н.* Измерение толщины слоя между вращающимися роликами с помощью рентгеновских лучей // *Прикладная механика.* – Киев, 1971. – №4. – С.44-49. 15. *Archard G., Kirk M.T.* The lubrication of the point contact // *Proceedings of the Royal Society.* – 1961. – Ser.A. – Vol.261, №1307. – P.1018-1024. 16. *Cameron A., Cohar R.* Theoretical and experimental studies of the oil film in lubricated point contact // *Proceedings of the Royal Society.* – 1966. – Ser.A. – Vol.291, №1427. – P.1029-1037. 17. *Fleck W.* Beitrag zur Klarung der Fressstragfähigkeit bei wälzgleiten. Teil I // *Maschinenbautechnik.* – 1963. – №4, H.12. – S.215-218. 18. *Камерон А.* Теория и смазка в инженерном деле. – М.: Машгиз, 1962. – 296с. 19. *Crook A.* Lubrication of Rollers // *Philos. Trans. of the Royal Society of London.* – 1958. – Ser.A. – Vol.250, №1. 20. *Furey M.I.* Metallic Contact and Friction between Sliding Surface // *Trans. ASLE.* – 1961. – Vol.4, №1. – P.455-462. 21. *Sacaku T.* Трение качения на большой скорости // *Механика.* – 1964. – №5(87). – С.221-224. 22. *Luo Jianbin, Wen Shizhu, Huang Ping, Sheng Xuanyu.* Qinghua daxue xuebao. Ziran kexue ban // *J. Tsinghua Univ. Sci. and Technol.* – 1999. – Vol.39, №2. – P. 1-5. (Влияние времени на образование тонких смазочных плёнок). 23. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / *Р.М. Матвеевский, В.Л. Лаухи, И.А. Буяновский* и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 224с. 24. *Бадьштова К.М., Шабалина Т.Н., Леонович Г.И., Мирзоянц С.А.* Смазочное масло – конструкционный элемент машин и механизмов // Трение и износ. – 1995. – Т.16, №5. – С.918-924. 25. *Крагельский И.В.* Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480с. 26. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз, 1963. – 472с. 27. *Дерягин Б.В.* Что такое трение? – М.: Машиностроение, 1963. – 320с. 28. *Евдокимов Ю.А., Кондратенко С.А.* Закономерности течения жидкости в зоне контакта сопряжённых тел при граничной смазке // Трение и износ. – 1992. – Т.13, №1. – С.201-205. 29. *Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М.* Поверхностные силы. – М.: Наука, 1987. – 192с. 30. *Зимон А.Д.* Адгезия жидкости и смачивания. – М.: Химия, 1974. – 256с. 31. *Мецик М.С.* Свойства водных плёнок между пластинками слюды // Сб. докл. IV конф. по поверхностным силам. – М.: Наука, 1972. – С.189-194. 32. *Дерягин Б.В.* Двух- и трёхмерные аспекты поверхностных явлений // Исследования в области поверхностных сил. – М.: Наука, 1964. – С.3-10. 33. *Русанов А.И., Сонина Т.В.* Возникновение толстых граничных слоёв в системах жидкий раствор-кварц // Поверхностные силы в тонких плёнках и устойчивость коллоидов. – М.: Наука, 1974. – С.51-56. 34. *Смуругов В.А., Деликатная И.О.* О влиянии поверхности полимера на структуру граничных слоёв масел // Трение и износ. – 1988. – Т.9, №4. – С.739-743. 35. *Yamanake Masashi, Kishi Kazuhiko, Inoue Katsumi* et al. Nihon kikai gakkai ronbunshu // *C=Trans.Jap.Soc.Mech.Eng.C.* – 2001. – Vol.67, №655. – P. 251-256. (Оценка долговечности цементированного зубчатого колеса при питтинге). 36. *Райко М.В.* О состоянии смазочного слоя в контакте с малыми скоростями качения и возможностях некоторых методов измерения этих слоёв // *Прикладная механика.* – К.: КИИГА, 1971. – №4. – С.37-43. 37. *Ченг Х.С., Штернлихт Б.* Численное решение для давления, температуры и толщины смазочной плёнки между двумя бесконечно длинными, катящимися и скользящими цилиндрами при больших нагрузках // Труды Американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчётов. – 1965. – №3. – С.180-194. 38. *Аппелдорн Г.* О современном состоянии теории смазки и её связи с реологией // Проблемы трения и смазки. – 1968. – №3. – С.8-10. 39. *Энборн Д., Виннер В.* Влияние реологических свойств жидкости на упругогидродинамический контакт при скольжении в условиях переменной нагрузки // Проблемы трения и смазки. – 1971. – №2. – С.52-63. 40. *Кадомирский В.П.* Исследование смазочных слоёв и твёрдо-пластичных плёнок, образующихся в контакте деталей при качении со скольжением: Дис... канд. техн. наук: 05.02.04. – К.: КИИГА, 1971. – 140с. 41. *Дмитриченко Н.Ф.* Исследование влияния газовых сред на смазочную способность минеральных масел, их

противоизносного и демпфирующего действия в зацеплении зубьев зубчатых передач: Дис...канд.техн.наук: 05.02.04. – К.: КИИГА, 1979. – 173с. **42.** Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: Дис...докт.техн.наук: 05.02.04. – К.: КИИГА, 1974. – 369с. **43.** Тривайло М.С. Исследование процесса смазки в зубчатых передачах с зацеплением М.Л. Новикова: Дис...канд.техн.наук: 05.02.04. – К.: КПИ, 1966. – 175с. **44.** Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с. **45.** Фукс Г.И. Влияние полимолекулярного граничного слоя на статическое трение // Теория смазочного действия и новые материалы. – М.: Наука, 1965. – С.83-89. **46.** Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механохимические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 172с. **47.** Кламман Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты. – М.: Химия, 1988. – 488с. **48.** Захарченко А.В. Лабораторні методи досліджень мастильних властивостей трансмісійних олиф // Науково-технічна інформація. – 2005. – №1. – С.51-54. **49.** Захарченко А.В. Лабораторное оборудование для исследования смазочных свойств трансмиссионных масел // Наука і молодь. – К.: НАУ, 2005. – С.136-139. **50.** Захарченко А.В. Діагностичний комплекс для досліджень мастильних властивостей трансмісійних олиф // Науково-технічна інформація. – 2005. – №2. – С.48-51. **51.** Смуругов В.А., Деликатная И.О., Чмыхова Т.Г., Савкин В.Г. Теплофизические свойства смазочных материалов при их переходе в состояние граничных слоёв // Трение и износ. – 2002. – Т.23, №4. – С.455-459. **52.** Мельник В.Б. Смазочное действие масел с карбонофторидными присадками при качении со скольжением: Дис... канд.техн.наук: 05.02.04. – К.: КИИГА, 1992. – 181с. **53.** Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оценка эффективности действия пакета присадок Компадит-731 // Пр. Міжнар. наук.-практ. конф. "Нафта і газ України-2000". – Івано-Франківськ: Факел, 2000. – Т.3. – С.139-143. **54.** Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оптимизация концентрации химически активных веществ в трансмиссионных маслах // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2000. – №2. – С.35-41. **55.** Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Оптимизация концентрации пакета присадок при легировании трансмиссионных масел // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірник наукових праць. Тем. вип. "Технології в машинобудуванні". – Харків: ХДПУ, 2000. – №109. – С.208-216. **56.** Запорожец В.В., Билякович О.Н., Захарченко А.В. Сравнительная оценка эффективности смазочного действия различных трансмиссионных масел // Авиационно-космическая техника и технология. Тем. вып. "Тепловые двигатели и энергоустановки". – Харьков: ГАУ "ХАИ", 2000. – №19. – С.473-477. **57.** Запорожець В.В., Билякович О.М., Захарченко А.В. Оцінка мастильної дії трансмісійних олиф в залежності від матеріалу трибоспрязень // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2000. – №4. – С.90-93. **58.** Оптимізація концентрації хімічно-активних присадок у трансмісійних оливах вітчизняного виробництва: Звіт про НДР (завершал.) / Національний авіаційний університет. – 013-ДБ01; № ДР 0101V002732; Інв. №0204U000857. – К., 2003. – 72с. **59.** Hays D.F. Research in mechanical systems: tribology // Journal of tribology. – 1984. – Vol.106, №1. – P.14-23. **60.** Войтов В.А., Исаков Д.И. Моделирование граничного трения в трибосистемах. Ч.3. Математическое моделирование нестационарных процессов при граничном трении // Трение и износ. – 1996. – Т.17, №5. – С.598-605. **61.** Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания. – М.: Машиностроение, 1984. – 264с. **62.** Глаголев Н.И., Томило Э.А. К теории опыта на трение при качении с проскальзыванием // Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1968. – С.56-63. **63.** Петрусевич А.И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки // Известия АН СССР. ОТН. – М.: АН СССР, 1951. – С.41-47. **64.** Jones W.R., Nagaraj H.S., Winer W.O. Ferrographic analysis of wear debris generated in a sliding elastohydrodynamic contact // ASLE Transactions. – 1978. – Vol.21, №3. – P.181-186. **65.** Wedeven L.D. What is EHD // Lubrication Engineering. – 1975. – Vol.31, №6. – P.291-296. **66.** Fowles P.E. EHL film thickness-practical significance and simple computation // Lubrication engineering. – 1976. – Vol.32, №4. – P.166-178. **67.** Tallian T.E. On competing failure modes in rolling contact // ASLE Transactions. – 1967. – Vol.10, №4. – P.418-439. **68.** Baldwin B.A. The effect of base oil viscosity on simulated valve train wear // ASLE Transactions. – 1981. – Vol.24, №1. – P.42-48. **69.** Czichos A., Habig K.H. Lubricated wear of steels // Mixed lubrication and lubricated wear. – London: Butterworth Edition. Editors Dowson D., Godet M., 1985. – P.135-146. **70.** Dorinson A. A basic model for lubricated metallic wear under extreme pressure conditions // Ibid. – P.179-185. **71.** Georges J.M. Colloidal behaviour of films in boundary lubrication // Microscopic aspects of adhesion and lubrication. – Amsterdam: Elsevier Sequoia Publishing Co. Editor J.M. Georges. Tribology Series. – 1982. – Vol.7. – P.729-757.

Поступила в редколлегию 30.05.12