

УДК 621.89.012.7

*Е. В. Березина, А. Г. Железнов, В. А. Годлевский*

### РЕГИСТРАЦИЯ ИНДУЦИРОВАННОЙ СДВИГОМ ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ

Ивановский государственный университет,  
ул. Ермака, 39, 153025 Иваново, Россия. E-mail: antonzhelezn@gmail.com

*Предлагается метод оценки степени анизотропии смазочного слоя, индуцированной стационарным сдвигом. В качестве количественного параметра выбрана интенсивность светового потока плоскополяризованного излучения, прошедшего сквозь слой, содержащий анизометричные мезогенные компоненты. Продемонстрированы различные оптические отклики трибосистемы, зависящие от толщины и состава слоя смазочного материала с мезогенными компонентами. Рассматриваемый подход обеспечивает интерпретацию экспериментальных данных, полученных разработанным методом поляризационной трибометрии. Основа метода – анализ лазерного излучения, прошедшего сквозь слой смазочного материала, содержащего анизометричные молекулы, формирующие на поверхностях трения эпитропные жидкокристаллические слои.*

**Ключевые слова:** *эпитропный жидкокристаллический слой, мезоген, смазочные материалы, смазочный слой, поляризационный трибометр, анизотропия, плоскополяризованное излучение, стационарный сдвиг, надмолекулярная структура, трибоактивные присадки, двойное лучепреломление.*

*E. V. Berezina, A. G. Zheleznov, V. A. Godlevsky*

### REGISTRATION OF LUBRICATION LAYERS' OPTICAL ANISOTROPY INDUCED BY A SHEAR

Ivanovo State University,  
Ermak str., 39, 153025 Ivanovo, Russia. E-mail: antonzhelezn@gmail.com

*The method of a rate evaluation of lubricant layers' anisotropy induced by stationary shear is proposed. The intensity of a plane-polarized radiations' light flux that permeated through the lubricating layer with triboactive mesogenic components is selected as a quantitative parameter. Various optical responses of the tribosystem which depend on thickness and composition of the layer of lubricating material with mesogenic components are demonstrated. The described approach provides an interpretation of the experimental data obtained by the developed polarizing tribometry method. The method is based on the analysis of laser radiation that permeated through the lubricating layer which contains anisometrical molecules forming epitropic liquid crystalline layers on the friction surfaces.*

**Key words:** *epitropic liquid crystalline layer, mesogen, lubricating materials, lubrication layer, polarizing tribometer, anisotropy, plane-polarized radiation, stationary shear, supermolecular structure, triboactive additives, double refraction.*

## Введение

Известно, что интенсивность трения и изнашивания деталей машин определяющим образом зависит от состояния тонкой адсорбционной пленки, разделяющей трущиеся поверхности. Современные высокоэффективные смазочные масла и технологические жидкости содержат ряд функциональных присадок, число которых доходит до 2–3 десятков. Помимо растворимых, некоторые смазочные композиции имеют в своем составе разнообразные мелко- и ультрадисперсные присадки. Подбор присадок производится эмпирически, в результате длительных испытаний, так как отсутствуют фундаментальные научные основы, позволяющие предсказывать взаимосвязи между молекулярной природой смазочного материала и его технологической эффективностью. В природе есть примеры реализации эффективной граничной смазки «структурного» действия – это суставы человека и животных, смазываемые веществом с выраженными мезогенными свойствами – синовиальной жидкостью.

Очевидно, что процесс такой смазки можно описывать, рассматривая граничный смазочный процесс на молекулярном уровне. Молекулярное строение граничных слоев (ГС) в масштабе нескольких размеров молекул до настоящего времени остается малоизученным вопросом как с точки зрения построения адекватных моделей строения ГС, так и с позиций экспериментальных исследований структуры и свойств таких образований. Однако в литературе представлен достаточно широкий спектр пространственных моделей (Харди, Адамсон, Дерягин, Ахматов и др.), описывающих предположительные молекулярные конфигурации, образуемые смазочным материалом (СМ) на межфазной границе с металлом. Однако до настоящего времени существуют лишь косвенные свидетельства в пользу справедливости тех или иных из них [1].

Существует ряд путей, которые, на наш взгляд, позволяют продвинуться на пути к пониманию граничного смазочного процесса:

1) применение к описанию смазочных слоев идеологии физики жидких кристаллов, использующей модели мезогенного состояния и соответствующие экспериментальные методики его исследования (в основном методы поляризационной микроскопии);

2) использование новых экспериментальных методов, позволяющих регистрировать параметры структуры и свойств смазочных слоев непосредственно в процессе трения.

Разработка описанных выше моделей и техники эксперимента позволило бы облегчить и ускорить процесс разработки новых смазочных материалов различного функционального назначения.

В последние годы на рынок моторных и промышленных смазочных масел поступают продукты, в которых многие функциональные свойства обеспечиваются целенаправленным подбором пакета трибоактивных присадок. В состав СМ все реже включают химически-активные присадки, содержащие вредные для человека и природы компоненты, а эффективность смазывания обеспечивается благоприятной надмолекулярной структурой смазочных слоев. Поэтому молекулярные механизмы, обеспечивающие трибологическую эффективность СМ, становятся одними из важнейших вопросов трибологической науки.

Сложность, разнообразие и многофакторность процессов, происходящих при трении различных типов поверхностей в присутствии смазки, препятствуют разработке универсального теоретического обоснования действия СМ в зоне трения. Очевидна необходимость работ в области теории трения со смазкой по созданию различных моделей «структурного» смазочного действия, которые были бы пригодны для описания процессов трения на нано- и мезоскопическом структурных уровнях [1].

Из приведенных в [2] доводов следует, что изменение условий трения ведет к изменению структурного состояния СМ, однако одна лишь гидродинамика не позволяет судить о пространственной структуре смазочного слоя (СС). В работе [3] отмечается, что смазочное действие граничных слоев адсорбционного происхождения определяется, прежде всего, уровнем ориентации молекул смазочной среды относительно поверхностей трения. Таким образом, следует заключить, что и поверхность, и сдвиговое течение играют определяющую роль в возникновении структурной упорядоченности СС в различных режимах смазки.

Для того чтобы выявить, каким образом молекулярные ориентационные эффекты влияют на реологические и трибологические свойства СС,

были предложены устройства типа «поляризационного трибометра», использующие взаимодействие поляризованного света со СМ, в котором происходит сдвиг. Известны попытки получения изображений мезоморфного СМ *in situ* в поляризованном свете при поступательном движении одной поверхности трения относительно другой или при движении поверхностей по эллиптической траектории [4].

Так, В. А. Левченко разработал поляризационный трибометр [1], который позволял измерять коэффициент трения, идентифицировать жидкокристаллическую текстуру и степень упорядоченности граничных слоев СМ при различных нагрузках. Исследования П. Освальда и П. Пирански описывают поведение жидкого кристалла нематического типа при непрерывном сдвиге, для чего определяют вязкий вращающий момент, влияющий на директор [4]. Недостатками данных методик является то, что в описанных экспериментах нет установившегося движения и нельзя контролировать рабочий зазор пары трения. В настоящей работе сделана попытка развить идеологию поляризационных исследований анизотропных сред для целей описания структурного состояния слоев смазочного материала в процессе трения.

### Постановка задачи

В предположении, что степень упорядоченности СС определяет их трибологическую эффективность, актуальной представляется задача получения количественного критерия анизотропии слоя. Можно считать, что параметр анизотропии СС пропорционален световому потоку необыкновенного луча, сформированного при прохождении плоскополяризованного света сквозь слой анизотропного СМ, который, в свою очередь, зависит от среднего слоевого напряжения деформации. Для вращательной пары трения диск – диск, в которой диски контактируют их торцевыми поверхностями, величина сдвигового напряжения пропорциональна крутящему моменту, который измеряется трибометром.

Полезно было бы рассмотреть параметр анизотропии как некоторую интегральную величину, пропорциональную параметру порядка молекул СС в состоянии покоя и вращательной составляющей анизотропии, зависящей от угловой

скорости и расстояния от оси вращения, на котором регистрируется оптический сигнал. Хотя мезоморфный материал в исходном состоянии будет иметь некоторый начальный (статический) уровень анизотропии, для простоты будем считать анизотропию системы в состоянии покоя равной нулю. Анизотропию, определяющую наличие двулучепреломления, возникающего при прохождении плоскополяризованного луча сквозь слой СМ, будем считать зависящей от параллельной и перпендикулярной поверхностям компонент скорости.

Рассмотрим движение СМ между двумя плоскопараллельными пластинами с заданным зазором. Пусть нижняя пластина закреплена жестко, а верхняя вращается с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Положим, что поверхности трения идеально гладкие. Будем рассматривать установившийся режим гидродинамического трения. В данном случае возможно возникновение явления Максвелла, т. е. ориентации оптически анизотропных молекул в механическом поле [5,6]. Такая ориентация молекул обязательно должна влиять на эффективную вязкость СМ. Для проявления данного эффекта необходимо, чтобы форма молекул СМ была геометрически анизотропной, т. е. отличалась бы от сферической, и чем более вытянутой является форма молекул, тем эффект ориентации выше. При выполнении этих условий в потоке СМ возникает градиент скорости движения различных его слоев, при этом ориентирующим полем является градиент скорости потока. Молекулы ориентируются под действием силы трения. Возникающее при этом двулучепреломление называют *динамическим двулучепреломлением*.

Сущность этого эффекта для нашего случая проявляется следующим образом. При возникновении градиента скорости движения потока СМ жидкость становится оптически анизотропной. Она уподобляется двухосному кристаллу с тремя разными показателями преломления. Если через поток СМ пропустить поляризованный луч света в направлении, перпендикулярном плоскости вращения, то он разбивается на два луча с электрическими векторами, распространяющимися с различными скоростями. Благодаря этому между двумя лучами возникает разность фаз, и из потока жидкости выходит эллиптически поляризованный луч.

Будем считать, что параметр анизотропии равен интенсивности необыкновенного луча, которая, в свою очередь, зависит от напряжения деформации, а значит, от скорости относительного перемещения поверхностей трения. Регистрация данного эффекта в количественном выражении и была целью экспериментального раздела настоящей работы.

### Экспериментальная установка

Для повышения достоверности выводов, следующих из анализа экспериментальных трибологических данных, важно регистрировать параметры процессов, происходящих в смазочных слоях непосредственно при трении. Реализация данного принципа возможна при использовании прибора, в котором реализована плоская ротационная схема типа «диск – диск» в сочетании с возможностью регистрации оптического отклика трибосистемы на изменение скорости сдвига, величины рабочего зазора и природы смазочного материала [7, 8].

В качестве пары трения была использована пара оптических стекол, одно из которых устанавливалось неподвижно, а другое было закреплено на валу двигателя и вращалось с заданной угловой скоростью  $\omega$  вокруг вертикальной оси. Необходимость использования прозрачного материала в качестве пары трения обусловлена необходимостью регистрации излучения, прошедшего сквозь подвергнутый сдвигу слой СМ. Линейно поляризованное излучение создается лазерным источником, проходит сквозь слой СМ и регистрируется фотоприемником на выходе из зоны трения.

Согласно представлению об эффекте двулучепреломления, излучение, прошедшее сквозь исследуемый анизотропный образец, разбивается на два луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях и распространяющихся с разными скоростями. В связи с этим между двумя лучами возникает разность фаз, и из жидкости выходит эллиптически поляризованное излучение.

О степени поляризации этого излучения позволяет судить анализатор, помещенный между парой трения и фотоприемником, находящийся в скрещенном состоянии по отношению к плоскости поляризации источника света. Принципиальная схема установки для наблюдения ориентационного

эффекта в потоке смазочного материала приведена на рис. 1.

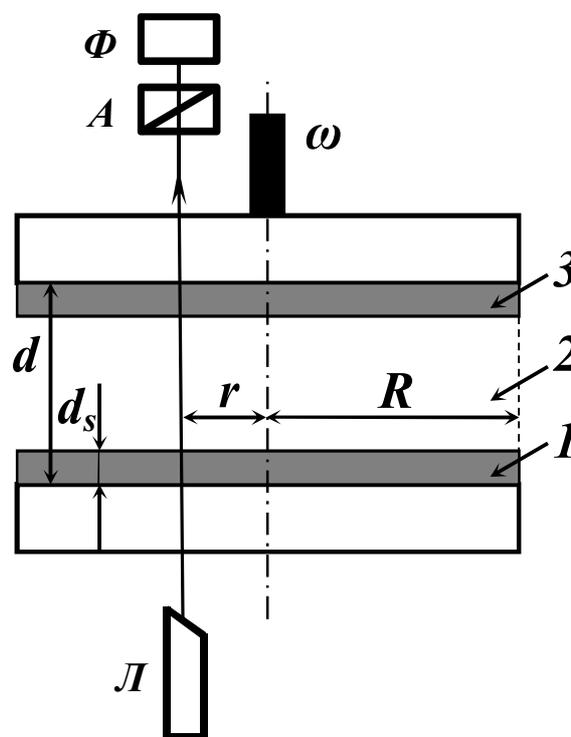


Рис. 1. Схема рабочей ячейки поляризационного трибометра : 1, 3 – эпитропные жидкокристаллические (ЭЖК) слои, 2 – объемная жидкость, Л – лазер, А – поляризатор-анализатор, Ф – фотоприемник

### Теория

Выясним вопрос о том, как ориентируются каламитные (палочкообразные) молекулы трибоактивных присадок в потоке и как это влияет на оптические свойства СС. В [7] показано, что функция распределения осей палочкообразных молекул в ламинарном потоке раствора имеет вид

$$\Phi = \Phi_0 \left( 1 + \frac{|\nabla v(r, z)|}{4D_r} \sin^2 \theta \sin 2\varphi \right), \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол между направлением скорости потока и длинной осью молекулы, отсчитанный в плоскости векторов градиента скорости  $\nabla v(r, z)$  и скорости потока  $v$ ;  $\theta$  – угол, между осью, перпендикулярной плоскости  $(\nabla v(r, z), v)$ , и длинной осью молекулы,  $D_r$  – коэффициент вращательной диффузии.

Плоскость  $(\nabla v(r, z), v)$  наклонена к плоскости неподвижного оптического окна под углом  $\alpha$ , определяемым из соотношения для поля скоростей, полученного в [8], причем тангенс угла наклона равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{z - d_s \left( 1 - \frac{\eta_0}{\eta_s} \right)}, \quad (2)$$

где  $r$  – расстояние от оси вращения до зоны оптических измерений,  $z$  – толщина слоя,  $d_s$  – толщина граничного упорядоченного слоя,  $\eta_0$  – объемная вязкость СМ,  $\eta_s$  – вязкость граничного слоя.

Это означает, что плоскость очень близка к вертикальной, так как  $r \gg z$ . Таким образом, можно заключить, что наиболее вероятно расположение длинных осей молекул в вертикальной плоскости под углом  $\varphi = 45^\circ$ , причем тепловое движение действует как дезориентирующий фактор, противодействующий градиенту скорости. А значит, чем выше будет градиент, тем выше будет степень ориентации молекул, что, в свою очередь, приведет к повышению степени упорядоченности в расположении длинных осей молекул, а значит, тем больше будет оптическая анизотропия образца.

Поясним это, рассмотрев оптическую индикатрису раствора, представленную на рис. 2.

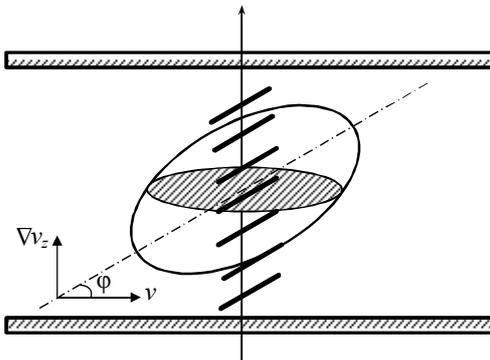


Рис. 2. Оптическая индикатриса смазочного материала с мезогенными каламитными молекулами структурообразующей присадки

Известно [5], что упорядоченный образец представляет собой оптически двухосный кристалл, причем, как известно, максимальный показатель преломления зачастую соответствует направлению длинной оси молекулы, так как

длинной оси соответствует максимальное значение поляризуемости.

В условиях сдвигового течения, реализуемых в сконструированном приборе, длинные оси молекул расположены под углом  $\varphi = 45^\circ$  к направлению скорости потока. Чем выше градиент скорости, тем более упорядоченной становится структура СС, тем большую деформацию испытывает оптическая индикатриса образца и, следовательно, тем более отличается от кругового сечение оптической индикатрисы в направлении распространения луча. Это означает, что увеличивается степень двойного лучепреломления образца и возрастает интенсивность «необыкновенного» луча, регистрируемая прибором.

Для решения задачи об идентификации упорядочения СС, содержащих трибоактивные присадки структурного действия, на поверхностях трения и в объеме СМ воспользуемся результатами, полученными в работах [8, 9]. Для подобного описания могут быть использованы две альтернативные модели: 1) модель жесткого срезаемого слоя и 2) модель ЭЖК-слоя постоянной вязкости.

В модели жесткого срезаемого слоя со структурно-активными частицами [7] полагают, что вязкость  $\eta_s$  структурированного ЭЖК-слоя бесконечно велика, и жидкость с объемной вязкостью  $\eta_0$  совершает движение между двумя дисками в зазоре толщиной:

$$h = d - 2d_s. \quad (3)$$

В этом приближении ранее нами было получено выражение для поля скоростей в зазоре между оптическими окнами [8]:

$$v(r, z) = \frac{\omega}{d - 2d_s} r(z - d_s). \quad (4)$$

Оптическая анизотропия образца пропорциональна среднему значению модуля градиента скорости потока [5], откуда следует зависимость:

$$\begin{aligned} \nabla v(r, z) &= \frac{\partial v}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial v}{\partial z} \vec{e}_z = \\ &= \frac{\omega}{d - 2d_s} (z - d_s) \vec{e}_r + \frac{\omega}{d - 2d_s} r \vec{e}_z, \end{aligned} \quad (5)$$

или после преобразования:

$$|\nabla v(r, z)| = \frac{\omega}{d - 2d_s} \sqrt{(z - d_s)^2 + r^2} = \frac{\omega}{d - 2d_s} r \sqrt{1 + \left(\frac{z - d_s}{r}\right)^2} \quad (6)$$

Расположение оптической измерительной зоны таково, что выполняется условие  $z - d_s \ll r$ . (7)

С учетом этого получим:

$$|\nabla v(r, z)| = \frac{\omega}{d - 2d_s} r \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{z - d_s}{r}\right)^2\right) \quad (8)$$

Для определения среднего значения градиента скорости по толщине образца используем формулу среднего значения для функции модуля градиента (8):

$$\begin{aligned} \overline{|\nabla v(r, z)|} &= \\ &= \frac{1}{d - 2d_s} \int_{d_s}^{d-d_s} \frac{\omega}{d - 2d_s} r \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{z - d_s}{r}\right)^2\right) dz = \quad (9) \\ &= \frac{\omega}{d - 2d_s} \left(r + \frac{(d - 2d_s)^2}{6r}\right) \end{aligned}$$

Тогда величина двойного лучепреломления в рассматриваемой модели будет выражена как:

$$\Delta n_0 = D_0 \eta_0 \overline{|\nabla v(r, z)|} = \frac{\omega D_0 \eta_0}{d - 2d_s} \left(r + \frac{(d - 2d_s)^2}{6r}\right) \quad (10)$$

где  $D_0$  – динамооптическая постоянная.

Вследствие возникновения двойного лучепреломления, в образце распространяются два луча света с взаимно перпендикулярными плоскостями поляризации. Разность хода обыкновенного и необыкновенного лучей имеет вид:

$$\Delta = \Delta n_0 (d - 2d_s) = \omega D_0 \eta_0 \left(r + \frac{(d - 2d_s)^2}{6r}\right) \quad (11)$$

Тогда разность фаз двух лучей с длиной волны  $\lambda$  получится равной

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi \omega D_0 \eta_0}{\lambda} \left(r + \frac{(d - 2d_s)^2}{6r}\right) \quad (12)$$

Поскольку свет, прошедший сквозь анизотропную среду, превращается в эллиптически поляризованный, можно фотоприемником зарегистрировать интенсивность излучения, определяемую выражением:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad (13)$$

что с учетом полученной ранее разности хода (11) дает:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\pi V D_0 \eta_0}{\lambda} \left(1 + \frac{(d - 2d_s)^2}{6r^2}\right), \quad (14)$$

где  $V = \omega r$  – скорость относительного перемещения измерительных поверхностей на расстоянии  $r$  от оси вращения.

Таким образом, в качестве количественного параметра анизотропии СС получили значение интенсивности светового потока, регистрируемой прибором. Следует отметить, что модель жесткого срезаемого слоя может быть справедлива лишь для случаев малых нормальных и касательных напряжений и крайне адсорбционно активных поверхностей, формирующих очень тонкие, а потому сильно связанные с поверхностью и поэтому прочные, граничные СС, что на практике встречается редко. В связи с этим интересно рассмотреть иную модель, учитывающую наличие конечного значения вязкости.

В модели ЭЖК-слоя постоянной вязкости [9] жидкость в зазоре между поверхностями трения содержит пристенные структурированные слои толщиной  $d_s$  с коэффициентом вязкости  $\eta_s$ , между которыми заключен слой объемной жидкости толщиной  $h$  с объемной вязкостью  $\eta_0$ . Определим интенсивность светопропускания в модели ЭЖК-слоя постоянной вязкости.

При решении уравнения Навье – Стокса для рассматриваемой цилиндрической геометрии получено распределение скоростей потока по толщине и в радиальном направлении [8]:

$$v(r, z) = \frac{\omega}{d - 2d_s} \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right) \times \begin{cases} \frac{\eta_0}{\eta_s} r z, & 0 \leq z \leq d_s \\ r \left(z - d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right)\right), & d_s \leq z \leq d - d_s \\ \frac{\eta_0}{\eta_s} r (z - d + \frac{\eta_s}{\eta_0} \left(d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right)\right)), & d - d_s \leq z \leq d_s \end{cases} \quad (15)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} A &= d - 2d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right) \\ B &= \frac{\eta_0}{\eta_s} \\ C &= d_s \left(1 - \frac{\eta_0}{\eta_s}\right) \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда поле скоростей примет вид:

$$v(r, z) = \begin{cases} \frac{\omega B}{A} r z, & 0 \leq z \leq d_s \\ \frac{\omega}{A} r (z - C), & d_s \leq z \leq d - d_s \\ \frac{\omega B}{A} r \left(z - d + \frac{A}{B}\right), & d - d_s \leq z \leq d \end{cases} \quad (17)$$

Найдем координаты вектора градиента скорости потока:

$$\nabla v(r, z) = \frac{\omega}{A} \begin{pmatrix} (Bz, Br) \\ (z - C, r) \\ \left(B \left(z - d + \frac{A}{B}\right), Br\right) \end{pmatrix} \quad (18)$$

Модуль вектора градиента будет иметь вид:

$$|\nabla v(r, z)| = \frac{\omega r}{A} \begin{pmatrix} B\sqrt{z^2 + r^2} \\ \sqrt{(z - C)^2 + r^2} \\ B\sqrt{\left(z - d + \frac{A}{B}\right)^2 + r^2} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Определим среднее по толщине зазора значение модуля градиента скорости:

$$\begin{aligned} \overline{|\nabla v(r, z)|} &= \frac{\omega r}{Ad} \left( 1 + \frac{d^3 + 3d^2 d_s \left(\frac{\eta_s + \eta_0}{\eta_0} - 2\right)}{6r^2 A} + \right. \\ &+ \frac{3dd_s^2 \left( 7 + \left(\frac{\eta_0}{\eta_s}\right)^2 - 4\frac{\eta_s}{\eta_0} - 4\frac{\eta_0}{\eta_s} \right)}{6r^2 A} + \\ &\left. + \frac{2d_s^3 \left( 6\frac{\eta_s}{\eta_0} + 10\frac{\eta_0}{\eta_s} - 3\left(\frac{\eta_0}{\eta_s}\right)^2 - 13 \right)}{6r^2 A} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Среднее значение вязкости по толщине зазора:

$$\eta(z) = \begin{cases} \eta_s, & 0 \leq z \leq d_s \\ \eta_0, & d_s \leq z \leq d - d_s \\ \eta_s, & d - d_s \leq z \leq d \end{cases} \quad (21)$$

$$\bar{\eta} = \frac{1}{d} \int_0^d \eta(z) dz = \eta_0 \left( 1 - 2\frac{d_s}{d} \left( 1 - \frac{\eta_s}{\eta_0} \right) \right) \quad (22)$$

Тогда среднее значение анизотропии показателя преломления смазочного слоя будет равно:

$$\overline{\Delta n} = \overline{D\eta} |\overline{\nabla v(r)}|, \quad (23)$$

где  $\overline{D}$  – среднее значение динамооптической постоянной, а разность хода лучей, поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях, получится равной:

$$\Delta = \overline{\Delta n} d = \overline{D\eta_0} |\overline{\nabla v(r)}| \left( d - 2d_s \left( 1 - \frac{\eta_s}{\eta_0} \right) \right) \quad (24)$$

Тогда разность фаз равна:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi \overline{D\eta_0}}{\lambda} |\overline{\nabla v(r)}| \left( d - 2d_s \left( 1 - \frac{\eta_s}{\eta_0} \right) \right) \quad (25)$$

Рассмотрим два практически важных случая:

1. Случай толстых слоев  $d \gg d_s$

В этом случае  $\delta = \frac{2\pi \overline{D\eta_0} \omega r}{\lambda} \left( 1 + \frac{d^2}{6r^2} \right)$  и с

учетом того, что  $V = \omega r$ , получим:

$$I = I_0 \sin^2 \left\{ \frac{\pi \overline{D\eta_0} V}{\lambda} \left( 1 + \frac{d^2}{6r^2} \right) \right\} \quad (26)$$

2. Случай сверхтонкого смазочного слоя  $d \cong d_s$ :

$$\delta = \frac{2\pi \overline{D\eta_0} \omega r}{\lambda} \left( 1 - 2\frac{d_s}{d} \left( 1 - \frac{\eta_s}{\eta_0} \right) \right); \quad (27)$$

$$I = I_0 \sin^2 \left\{ \frac{\pi \overline{D\eta_0} V}{\lambda} \left( 1 - 2\frac{d_s}{d} \left( 1 - \frac{\eta_s}{\eta_0} \right) \right) \right\} \quad (28)$$

Это означает, что с ростом скорости сдвиговой деформации образца интенсивность светопропускания должна расти до некоторого максимального значения, а затем начать уменьшаться. Однако, учитывая незначительную толщину исследуемых слоев, разность фаз обыкновенного и необыкновенного лучей будет столь невелика, что наблюдать периодичность значений интенсивности в экспериментах по изучению ламинарного течения, по-видимому, возможности нет.

### Результаты эксперимента

Разработанные в теоретическом разделе положения подтверждаются при экспериментальном изучении ряда модельных поверхностно-активных СМ. Например, испытывали 0,1 мас. % раствор олеиновой кислоты в индустриальном масле И-40А. Зависимость регистрируемой интенсивности светового потока от скорости скольжения приведена на рис. 3.

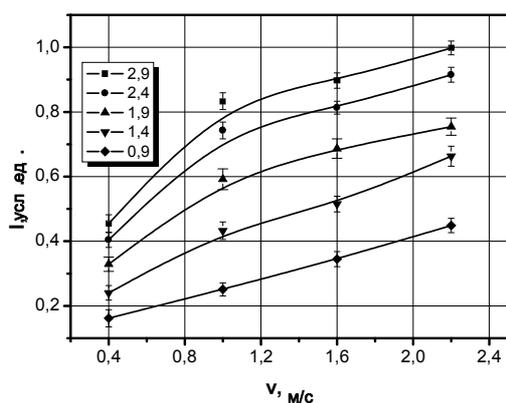


Рис. 3. Зависимость светопропускания в поляризованном свете СС масла И-40А + 0,1 мас. % олеиновой кислоты от скорости взаимного перемещения измерительных поверхностей для СС различной толщины, мм

Вытянутые анизометричные молекулы олеиновой кислоты в растворе индустриального масла ориентируются потоком и создают искусственно анизотропный смазочный слой, что выражается в росте интенсивности светопропускания, а значит, и в росте степени упорядоченности молекулярных слоев, что свидетельствует о справедливости выдвинутых теоретических соображений.

Важные с концептуальной точки зрения результаты получены при изучении оптических свойств пластичного СМ Литол-24, представленные на рис. 4.

С целью расширения области применения разрабатываемого метода было бы интересно рассмотреть возможность его применения для пластичных смазочных материалов, содержащих мезогенные компоненты.

Пластичные смазки представляют собой многофазные, структурно неоднородные, а значит, анизотропные системы. Это означает, что их оптические и реологические свойства даже в толстых слоях должны быть подобны

аналогичным свойствам граничных упорядоченных адсорбционных слоев. А если это так, то их оптический параметр анизотропии – интенсивность светового потока – должен описываться уравнением (28).

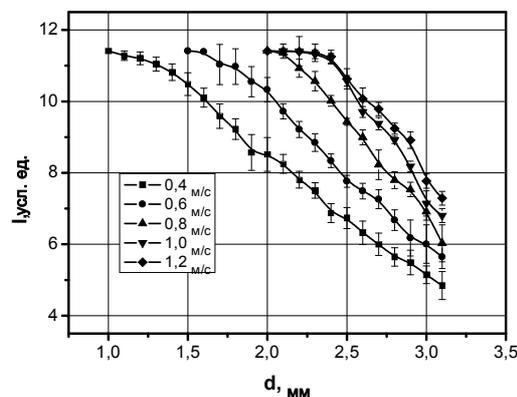


Рис. 4. Зависимость светопропускания в поляризованном свете смазочного слоя Литола-24 от скорости взаимного перемещения поверхностей трения

Тогда стоит ожидать, что при уменьшении толщины слоя регистрируемая интенсивность оптического сигнала должна увеличиваться. Именно такая зависимость и отмечается на рис. 4, что свидетельствует в пользу предлагаемой теоретической концепции.

### Выводы

По результатам теоретических выкладок и проведенных экспериментов можно заключить, что в качестве параметра анизотропии СС, а значит, и трибологической эффективности СМ, можно принять интенсивность светового потока необыкновенного луча, появившегося при прохождении плоскополяризованного лазерного излучения сквозь слой СМ в процессе трения.

Показано, что рассматриваемый параметр существенным образом зависит от скорости взаимного перемещения поверхностей трения, а также от объемного и граничного коэффициентов вязкости СС. Это означает, что предлагаемый метод оценки эффективен для исследования как ньютоновских, так и неньютоновских СС, так как изменение вязкости неньютоновских смазок в изотермических условиях обусловлено структурными изменениями, происходящими в СМ под действием сдвиговой деформации.

Предложенный подход позволил объяснить результаты экспериментов, в ходе которых были получены зависимости, иллюстрирующие оптические свойства СМ. Как и было предсказано теорией, интенсивность света должна возрастать с увеличением толщины исходно изотропных слоев и должна убывать при переходе к тонким упорядоченным адсорбционным или объемным, но изначально структурно неоднородным материалам, например, пластичным смазкам.

*Работа поддержана грантом Минобразования РФ в рамках госзадания в сфере научной деятельности (грант № 9.700.2014/К).*

#### Список литературы / References

1. Современная трибология: Итоги и перспективы / отв. ред. К. В. Фролов. Изд. стереотип. М.: Изд. ЛКИ, 2014. 480 с. [Sovremennaya tribologiya: Itogi i perspektivy (Modern tribology: results and prospects) / otv. red. K. V. Frolov. Izd. stereotip. M.: Izd. LKI, 2014. 480 p. (in Russian)].
2. Кравчик К. Трибологическая идентификация самоорганизации при трении со смазкой: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2000. 282 с. [Kravchik K. Tribologicheskaya identifikatsiya samoorganizatsii pri trenii so smazkoy (Tribological identification of self-organization during friction with lubrication). PhD thesis. Rostov-on-Don, 2000. 282 p. (in Russian)].
3. Буяновский И. А., Игнатьева З. В., Левченко В. А., Матвеев В. Н. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел // Трение и износ. 2008. Т. 29, № 4. С. 375–381. [Buyanovskiy I. A., Ignatieva Z. V., Levchenko V. A., Matveenko V. N. Orientatsionnaya uporyadochennost' granichnykh sloev i smazochnaya sposobnost' masel (Orientational ordering of boundary layers and the lubricity of the oils) // Trenie i iznos (Journal of Friction and Wear). 2008. Vol. 29, Iss. 4. P. 375–381 (in Russian)].
4. Oswald P., Pieranski P. Nematic and cholesteric liquid crystals: concepts and physical properties illustrated by experiments. London: Taylor and Francis Group, 2005. 618 p.
5. Вукс М. Ф. Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 334 с. [Vuks M. F. Elektricheskie i opticheskie svoystva molekul i kondensirovannykh sred (Electrical and optical properties of molecules and condensed matter). L.: Izd-vo Leningr. un-ta, 1984. 334 p. (in Russian)].
6. Березина Е. В., Годлевский В. А., Железнов А. Г., Фомичев Д. С. Аналитическое описание структурированного смазочного слоя // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Т. 14, № 1. С. 74–79. [Berezina E. V., Godlevskiy V. A., Zheleznov A. G. Fomichev D. S. Analiticheskoe opisaniye strukturirovannogo smazochnogo sloya (The analytical evaluation of structured lubricating layer) // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoye ispol'zovaniye (Russ. J. Liq. Cryst. & Appl.). 2014. Vol. 14, Iss. 1. P. 74–79 (in Russian)].
7. Годлевский В. А., Корсаков М. Н., Сандлер В. А., Березина Е. В. Поляризационный трибометр // Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» ПОЛИКОМТРИБ–2011: Тезисы докладов. Гомель, Беларусь, 2011. [Godlevskiy V. A., Korsakov M. N., Sandler V. A., Berezina E. V. Polyarizatsionnyy tribometr (Polarizing tribometer) // International scientific-technical conference «Polymer composites and tribology» POLICOMTRIB–2011: Abstract book. Gomel, Belarus, 2011. (in Russian)].
8. Годлевский В. А., Березина Е. В., Железнов А. Г., Фомичев Д. С. Индуцированная сдвигом анизотропия смазочного слоя // V Международный симпозиум по транспортной триботехнике «Транстрибо–2013»: Сборник трудов. Санкт-Петербург, Россия, 2013. С. 285–289. [Godlevskiy V. A., Berezina E. V., Zheleznov A. G. Fomichev D. S. Indutsirovannaya sdvigom anizotropiya smazochnogo sloya (Shear-induced anisotropy of lubricating layer) // V International symposium on transport science in tribology «Transtribo–2013»: Abstract book. St. Petersburg, Russia, 2013. P. 285–289 (in Russian)].
9. Алтоиз Б. А., Асланов С. К., Бутенко А. Ф. Ротационный вискозиметр для исследования микронных прослоек // Физика аэродисперсных систем. 2005. № 42. С. 53–65. [Altoiz B. A., Aslanov S. K., Butenko A. F. Rotatsionnyy viskozimetr dlya issledovaniya mikronnykh prosloek (Rotational viscometer to study micron layers) // Fizika aerodispersnykh sistem (Physics of Aero systems). 2005. Iss. 42. P. 53–65 (in Russian)].

*Поступила в редакцию 1.12.2014 г.*