

УДК 621.89.099.6, 532.135

М. Н. Попова, М. А. Жарова, Н. В. Усольцева, А. И. Смирнова, В. С. Богданов¹

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ИНДУСТРИАЛЬНОГО МАСЛА
С МЕЗОГЕННЫМИ ПРИСАДКАМИ И УГЛЕРОДНЫМИ
НАНОТРУБКАМИ**

НИИ наноматериалов, Ивановский государственный университет,
ул. Ермака, д. 39, 153025 Иваново, Россия. E-mail : nv_usoltseva@mail.ru

¹Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д. К. Беляева
ул. Советская, 45, 153012 Иваново, Россия

Проведены реологические и триботехнические испытания бинарных и трехкомпонентных систем, содержащих индустриальное масло И-20А с различными присадками. Анализ результатов триботехнических испытаний свидетельствует, что холестерические присадки X-7 и X-20 к И-20А с микродобавкой МУНТ имеют хорошие антифрикционные качества, а X-7 и X-20 являются эффективными противозносными присадками. Введение присадки холестерилового эфира стеариновой кислоты (X-7) в индустриальное масло И-20А, с разными значениями концентраций, способствует существенному увеличению показателей износостойкости пар трения. Проведенные реологические испытания показали, что введение нанотрубок приводит к изменению соотношения между упругой и вязкой составляющими в пользу увеличения влияния упругих свойств образца, что ведет к ухудшению трибологических характеристик масла И-20А.

Ключевые слова: трибологические свойства, присадки, коэффициент трения, площадь пятна износа, холестерические жидкие кристаллы.

M. N. Popova, M. A. Zharova, N. V. Usol'tseva, A. I. Smirnova, V. S. Bogdanov¹

**RHEOLOGICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES
OF INDUSTRIAL OIL WITH MESOGENIC ADDITIVES
AND CARBON NANOTUBES**

Nanomaterials Research Institute, Ivanovo State University,
Ermak st., 39, 153025 Ivanovo, Russia. E-mail : nv_usoltseva@mail.ru

¹Ivanovo State Agricultural Academy named after academician D. K. Belyaev
Sovietskaya str., 45, 153012 Ivanovo, Russia

Rheological and tribological testing of binary and ternary systems containing industrial oil I-20A with various additives was conducted. Analysis of tribological tests indicates that the cholesteric liquid crystals X-7 and X-20 with microaddition of CNT added to I-20A have good antifricition quality while X-7 and X-20 are effective anti-wear additives. Introduction of cholesteryl ester of stearic acid (X-7) additive to the industrial oil I-20A, with different values of concentration, contributes to a significant increase in the levels of wear resistance of friction pairs. Rheological tests showed that introduction of nanotubes leads to a change in the ratio between the elastic and viscous components in favor of increasing of elastic properties of the sample that leads to a deterioration in tribological performance of the oil I-20A.

Key words: tribological properties, additives, friction coefficient, wear spot area, cholesteric liquid crystals.

Введение

Известно, что холестерические жидкие кристаллы (ЖК) проявляют себя как эффективные присадки к смазочным маслам, поскольку оказывают структурирующее воздействие на граничный слой трибосопряженных деталей [1, 2]. Способность ЖК адсорбироваться на поверхностях в процессе динамического контакта и послойное упорядочение, при котором наблюдается легкое течение одного слоя относительно другого, лежат в основе механизма смазочного действия ЖК и ЖК-присадок [1, 2]. Другой присадкой, которая могла бы улучшить свойства масел, является присадка углеродных нанотрубок (УНТ). При добавлении УНТ существенно меняются трибологические характеристики материалов и фрикционных изделий из них [3].

Целью данного исследования являлось:

- установление влияния диспергированных многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) в композиции с холестерическими ЖК на вязкоупругие свойства индустриального масла И-20А;
- определение изменения трибологических характеристик, а именно коэффициента трения и износостойкости пар трения при использовании индустриального масла И-20А с присадками холестерических жидких кристаллов и углеродных нанотрубок.

Экспериментальная часть

Масло И-20А является смазочным материалом общего назначения и используется в самых разнообразных устройствах и механизмах – для снижения силы трения в передаточных узлах агрегатов, в гидравлических системах и благодаря его универсальным характеристикам – в других случаях. Масло И-20А изготовлено на основе минеральных остаточных масел из малосернистой нефти при помощи селективной очистки; оно не содержит присадок. Нижняя температурная граница использования И-20А составляет -15 градусов Цельсия, что позволяет его использовать в зимнее время в слабоотапливаемых помещениях [4].

Углеродные нанотрубки (УНТ) — протяженные структуры, состоящие из свернутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах [5, 6].

Однослойные нанотрубки обычно закручены в ленту в виде цилиндра. Многослойные же УНТ (МУНТ) бывают двух видов: так называемые трубки-матрешки или рулонные многослойные УНТ. Первые состоят из нескольких вложенных друг в друга слоев одностенных УНТ. Обычно число графитовых слоев колеблется от двух до двадцати. Рулонные нанотрубки напоминают рулоны, накрученные из одного графитового листа [7]. Каждый слой представляет собой гексагональную сетку графита, основу которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода. Расстояние между слоями равно $0,34$ нм [5, 6]. В случае если УНТ обладают винтовой осью симметрии, то молекулы обладают свойством хиральности.

Несмотря на свои микроскопические размеры, нанотрубки являются очень прочным материалом как на растяжение, так и на изгиб. Как показывают результаты экспериментов и численного моделирования, модуль Юнга однослойной нанотрубки достигает величин порядка $1-5$ ТПа, что на порядок больше, чем у стали. Кроме того, УНТ демонстрируют целый спектр самых неожиданных электрических, магнитных, оптических свойств. Например, в зависимости от конкретной схемы сворачивания графитовой плоскости нанотрубки могут быть и проводниками, и полуметаллами, и полупроводниками. В них наблюдается и сверхпроводимость [7].

Согласно [5, 6, 8], при добавлении УНТ существенно меняются трибологические свойства материалов и фрикционных изделий из них. Так, коэффициент трения при контакте пластин модифицированного углеродными нанотрубками полиэтилена высокой плотности с вращающимся недеформируемым контртелом при высоких скоростях ($0,87$ и $1,74$ м/с) уменьшается по сравнению с коэффициентом трения для исходного полимера на 80% [8].

В исследовании было интересно рассмотреть влияние присадок МУНТ с жидкими кристаллами на трибологические свойства минерального индустриального масла, так как известно, что жидкие кристаллы являются превосходными «хозяевами» для углеродных нанотрубок. В частности, жидкокристаллический ориентационный порядок может быть наложен на МУНТ, так что можно получить ансамбли из этих частиц [9].

В качестве наноразмерных микродобавок нами был использован углеродный материал «Таунит-М» (чистота > 98 %, ООО «Нанотех-центр»), представляющий собой многостенные углеродные нанотрубки (с наружным диаметром 8–15 нм, внутренним 4–8 нм и удельной поверхностью 300 м²/г), полученные путем газового химического осаждения в процессе каталитического пиролиза углеводородов.

Исследование трибологических свойств смазочных композиций проводилось на машине трения СМТ-1. Машина СМТ-1 предназначена для испытания материалов на трение и износ, для изучения процессов трения и износа металлов, сплавов и жестких конструкционных пластмасс [10]. Обеспечивает работу при линейном контакте

по схеме ролик-ролик (рис. 1, а), при контакте по площади ролик-колодка (рис. 1, б), вал-втулка (рис. 1, в) и ролик-неподвижный шар. В машине введено плавное регулирование частоты вращения образцов, расширен диапазон измерения момента трения и скоростей скольжения, установлены малоинерционные измерители момента трения и температуры [11]. Возможно проведение испытаний смазочных материалов при чистом скольжении, при качении с проскальзыванием и при чистом качении. Нагружение в контакте образцов создается винтовым нагружающим устройством. В процессе испытания регистрируются частота вращения, момент трения, число циклов работы. Износ образцов измеряется взвешиванием и микрометрированием [12].

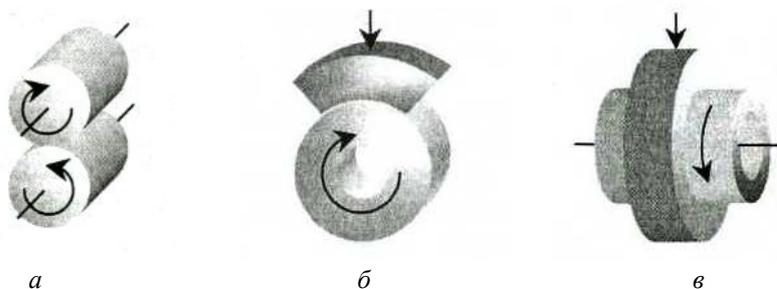


Рис. 1. Схемы контакта образцов, реализуемые на машине трения СМТ-1:
а – ролик-ролик, б – ролик-колодка, в – вал-втулка

Испытания возможно проводить либо ступенчатым нагружением до разрушения смазочного слоя (заедания), либо длительные при постоянных скорости и нагрузке для определения интенсивности изнашивания образцов при сравнительных испытаниях смазочных материалов [12].

Реометр Physica MCR 501 был использован нами для проведения широкого диапазона постоянных и динамических тестов как в режиме контролируемого напряжения (CSS), так и в режиме контроля скорости сдвига (SCR).

Начиная от простых кривых течения и заканчивая динамическими анализами сложных жидкостей, расплавов и сополимеров, реометр Physica MCR 501 прост в работе и управлении и позволяет комбинировать и связывать различные типы тестов в один эксперимент для моделирова-

ния условий производства и применения конечным пользователем (линейное растяжение и сдвливание; релаксация напряжения и т. д.). Схема реометра представлена на рис. 2.

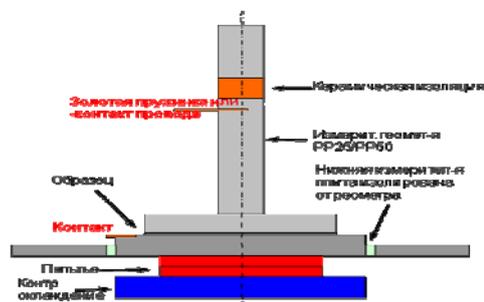


Рис. 2. Основные узлы ротационного реометра Physica MCR 501

Проведение испытаний возможно по четырем системам измерений: 1) измерительные системы с коаксиальными цилиндрами; 2) измерительные системы конус/плоскость; 3) измерительные системы плоскость/плоскость; 4) измерительные системы для больших сдвигов [13].

Вязкость СМ, содержащего частицы мелкодисперсной фазы, – один из важнейших факторов, определяющих их триботехнологическую эффективность и агрегативную устойчивость. Поэтому на первом этапе была поставлена задача определить влияние исследуемых присадок на вязкость и на триботехнические характеристики смазочных композиций. Следует отметить, что реологические свойства мезогенных и немезогенных соединений значительно отличаются. Мезогенные соединения обладают рядом особенностей, отличающих их от обычных изотропных жидкостей: отличительной особенностью вязкости является гигантский диапазон ее изменений в пределах мезофазы [12]. Вязкость в зависимости от температуры в пределах мезофазы может изменяться в 10^6 раз. Эффективная вязкость, кроме того, сильно зависит от скорости сдвига. При увеличении скорости сдвига на 3 порядка вязкость, например, холестериков, может уменьшаться в 100 раз и более. Этот факт, по-видимому, обусловлен слоистой структурой холестерической мезофазы, обладающей свойствами неньютоновской жидкости [14].

Данные особенности реологических свойств мезогенных соединений позволяют предположить изменения реологического поведения традиционных масел и ПАВ при введении в них исследуемых веществ в качестве присадок. Характер этих изменений непредсказуем, так как реология систем, содержащих мезогенные и немезогенные компоненты, не исследована [14, 15].

Вязкое течение нематических ЖК, являющихся неньютоновскими жидкостями, зависит от углов между «директором» и направлением течения, а также между директором и градиентом скорости [16]. Поэтому для его описания используют три коэффициента Мъезовича (η), связанных с шестью коэффициентами Лесли (α) следующими соотношениями:

$$\eta_1 = \frac{1}{2} \cdot (-\alpha_2 + \alpha_4 + \alpha_5) \quad (1)$$

$$\eta_2 = \frac{1}{2} \cdot (\alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_6) \quad (2)$$

$$\eta_3 = \frac{1}{2} \cdot \alpha_4 \quad (3)$$

где η_1 – составляющая вязкости в случае, когда директор параллельный градиенту скорости; η_2 – директор параллельный направлению потока; η_3 – директор перпендикулярный скорости и градиенту скорости.

Зависимость между напряжением сдвига (P) и градиентом скорости устанавливают, исследуя течение жидкостей с помощью капиллярного или ротационного вискозиметра. Капиллярный вискозиметр применяют для исследования реологических свойств не слишком вязких жидкостей. Для ЖК-объектов метод капиллярной вискозиметрии можно использовать только в том случае, когда диаметр капилляра достаточен для того, чтобы поток жидкости был ламинарным.

Кроме описанного выше метода сдвигового течения для измерения вязкости используют ультразвуковые методы, основанные на прохождении через слой ЖК ультразвуковых сдвиговых волн, метод вращающегося магнитного поля, методы, связанные с исследованием динамики переориентации ЖК в магнитном или электрическом поле [16].

Если к слою ЖК, помещенному между двумя подложками, приложить извне магнитное или электрическое поле, то в зависимости от граничных условий на подложках, величины и знака диамагнитной или диэлектрической проницаемости происходит деформация, характеризующаяся переориентацией директора. Этот эффект назван по фамилии впервые наблюдавшего его В. К. Фредерикса. Практически важными и удобными для экспериментального наблюдения являются три частных случая, различающихся ориентацией директора и внешнего поля относительно подложек. Деформации, возникающие после приложения к слою магнитного или электрического поля, напряженность которого превышает некоторую критическую величину – пороговую напряженность H_f или $E_f = U_f / L$ (L – толщина слоя), называются деформациями поперечного изгиба кручения и продольного изгиба или S -, T -, B -эффектами [16]. Анализ температурных зависимостей динамической вязкости показывает, что те или иные молекулярные фрагменты могут радикально влиять на вязкость ЖК-соединений. Наиболее общими являются следующие моменты при сравнении вязкости сходных структур:

- η тем меньше, чем меньше длина молекулы;
- алкильные заместители дают меньшую вязкость по сравнению с алкокси- и ацилокси-группами;
- замена фенильного кольца на *транс*-циклогексановое приводит к уменьшению вязкости;
- введение колец с гетероатомами увеличивает вязкость по сравнению с фенильными аналогами;
- введение заместителя в латеральное положение увеличивает, а в терминальное – уменьшает вязкость;
- увеличение поляризуемости заместителей в ряду нематиков приводит к увеличению вязкости;
- на значение вязкости влияют также объем и дипольный момент заместителя. При последовательной замене атома Н на F, Cl, Br величина натурального логарифма динамической вязкости растет пропорционально дипольному моменту связи атома углерода с атомом галогена или кубу ван-дер-ваальсова радиуса заместителя [16].

Природа влияния молекулярного строения присадки в основном зависит от молекулярного веса и числа атомов углерода в радикале. При равном содержании присадки в смазочные композиции, имеющие присадки с большой молекулярной массой и большим числом атомов углерода, как правило, более вязкие [17].

Приведенные особенности реологических свойств жидких кристаллов позволяют предположить изменения реологического поведения традиционных масел при введении в них мезогенов в качестве присадок. В связи с этим экспериментальные исследования в этом направлении имеют как научное, так и практическое значение.

Как было показано ранее, введение жидких кристаллов в масло приводит к увеличению вязкости. Наблюдается различный характер зависимости вязкости композиций от концентрации жидкого кристалла для масел, растворяющих и не растворяющих его. Для масел, в которых не происходит растворения мезогенов, увеличение их концентрации вызывает более интенсивный рост вязкости композиции масло – жидкий кристалл, чем для масел, растворяющих их [14].

Результаты и обсуждение

Влияние ХЖК с МУНТ на реологические свойства индустриального масла И-20А

Реологические характеристики ХЖК-композиций исследовались методом ротационной вискозиметрии. Деформирование образцов происходило в режиме непрерывного сдвига при постоянной скорости вращения. Вращательная вязкость измерялась при помощи программируемого вискозиметра Physica MCR 501 фирмы Anton Paar с измерительной системой «плоскость – плоскость» (величина зазора – 0,01 мм, температурный контроль от -150 до 1000 градусов, точность температуры до 0,01 градуса) при заданных скоростях сдвига. Каждый реологический эксперимент на ротационном вискозиметре приводили со свежеприготовленным образцом. Систему выдерживали на протяжении 25–30 минут при постоянной скорости сдвига. Интервал между измерениями точек составил 2 минуты. При каждом значении скорости сдвига регистрировали величины вязкости, напряжения сдвига и температуры.

Принцип работы реометра – вращение специальной геометрии, которую опускают на подложку, на которую предварительно нанесена тестируемая жидкость.

Исходными экспериментальными данными для анализа поведения ХЖК-композиций стали данные по температурной зависимости модуля упругости G' и модуля потерь G'' .

Были проведены испытания двухкомпонентных (холестерический жидкий кристалл **X-16** и индустриальное масло И-20А) и трехкомпонентных систем (холестерический жидкий кристалл **X-16**, углеродные нанотрубки и индустриальное масло И-20А) на реометре Physica MCR 501. Были получены следующие кривые течения в зависимости от температуры (рис. 3).

Из графиков следует, что добавление нанотрубок приводит к увеличению значений модуля упругости G' и уменьшению вязкого модуля G'' , что говорит об образовании структуры в образце. Также видно, что при добавлении нанотрубок увеличивается диапазон, где $G' > G''$, что говорит, о том что образец (рис. 3, б) проявляет упругие свойства в диапазоне от 20 °С до 33 °С, в отличие от образца (рис. 3, а), где практически во всем диапазоне температур $G'' > G'$ (вязкое поведение) и только при температуре около 20 °С значения вязкого и упругого модулей уравниваются. Образец (рис. 3, а) переходит в изотропную жидкость при 28 °С. Добавление нанотрубок смещает границу перехода в область более высоких температур (33 °С).

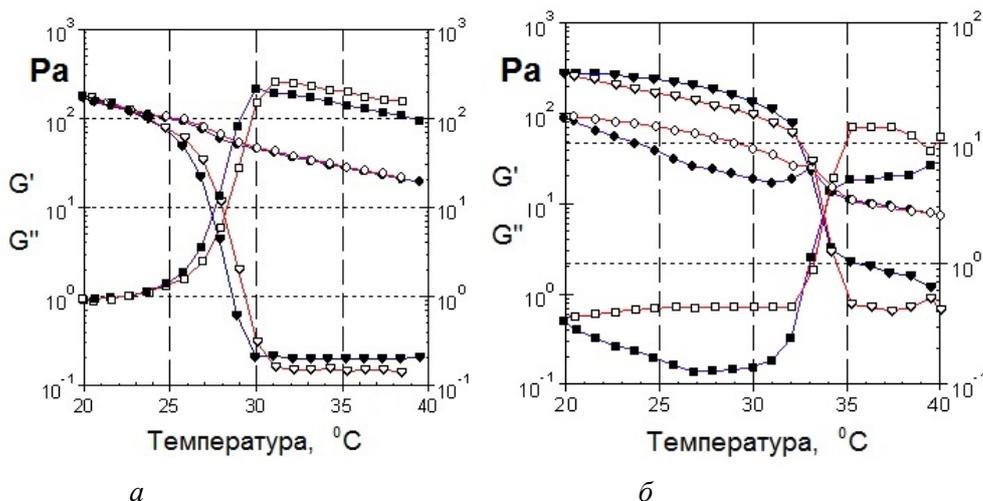


Рис. 3. Кривые течения:

- a* – двухкомпонентной системы: промышленное масло И-20А – ХЖК (Х-16),
- б* – трехкомпонентной системы: промышленное масло И-20А – ХЖК (Х-16) – МУНТ
- ■ – $\tan(\delta) = G''/G'$ (при нагреве и охлаждении);
- ● – G'' , модуль потерь (при нагреве и охлаждении);
- △ ▲ – G' , модуль накопления (при нагреве и охлаждении)

Переход в упорядоченное состояние для образца (*a*) (понижение температуры) приводит к уменьшению значения $\tan(\delta)$ (отношение G''/G') от 154 до 0,9 (уменьшение в 170 раз), для образца с нанотрубками (*б*) уменьшение значения $\tan(\delta)$ (отношение G''/G') от 6,7 до 0,33 (уменьшение в 20 раз). Таким образом, можно утверждать, что добавление МУНТ приводит к изменению соотношения между упругой и вязкой составляющими в пользу увеличения влияния упругих свойств образца, что ведет к ухудшению триботехнических характеристик масла И-20А.

Далее были проведены реологические испытания с двухкомпонентными составами (холестерический жидкий кристалл Х-10 и промышленное масло И-20А) и трехкомпонентными системами (холестерический жидкий кристалл Х-10, углеродные нанотрубки и промышленное масло И-20А) по определению вязкости в зависимости от скорости сдвига, модуля потерь – от угловой частоты вращения, G' и G'' – от температуры.

Из графика (рис. 4) следует, что в начале эксперимента вязкость образца «масло – Х-10 – МУНТ» выше, чем у образца «масло – Х-10».

Добавление МУНТ незначительно влияет на вязкостные свойства смеси, так как с увеличением скорости сдвига кривые практически накладываются друг на друга.

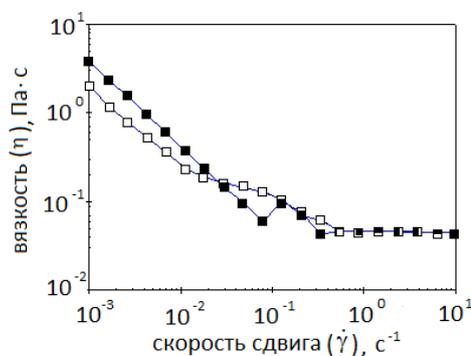


Рис. 4. Зависимость вязкости от скорости сдвига

- – система «И-20А – Х-10 – МУНТ»,
- – система «И-20А – Х-10»

Для смеси с добавкой МУНТ при увеличении угловой частоты вращения, значения модуля потерь (G'') выше, чем для смеси без МУНТ, т. е. трехкомпонентная система обладает большими вязкостными свойствами, чем двухкомпонентная система.

Триботехнические свойства присадок при трении скольжения

Обширные исследования тончайших граничных с поверхностью твердого тела слоев жидкостей позволяют считать доказанным ориентационно упорядоченное расположение молекул в них. Наличие внутренней микроструктуры характерно для жидких кристаллов. Согласно [18, 19], представляется достаточно очевидным, что слоистое расположение молекул в граничных смазочных пленках должно одновременно облегчать скольжение поверхностей, разделенных подобными слоями, т. е. давать снижение коэффициента трения и в то же время увеличивать сопротивление утоньшению зазора под действием нагрузки [12, 20]. Поэтому с целью улучшения триботехнических характеристик, а именно для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости индустриального масла И-20А, нами были приготовлены устойчивые к седиментации двухкомпонентные и трехкомпонентные смеси, в состав которых входили индустриальное масло И-20А как основа, ЖК-присадки и микродобавки многостенных углеродных нанотрубок. Опытные смазочные композиции готовили на ульт-

развуковой бане SONOREX SUPER. Исследование триботехнических свойств смесей проводилось на машине трения 2070 СМТ – 1 по схеме «вращающийся ролик – неподвижный шар». Материал диска – сталь 45, материал шарика – сталь ШХ-15. Скорость скольжения составляла 1 м/с. Частота вращения – 500 оборотов в минуту. Нагрузка на образец постоянная – 200 Н. Температура измерялась ЖК – термпарой. Длительность каждого эксперимента составляла 16 минут.

В качестве ЖК-присадок использовались холестерилловые эфиры карбоновых кислот: стеариновой (X-7), пропионовой (X-10), олеиновой (X-16) и тридекановой (X-20). Критериями достаточной чистоты вышеперечисленных соединений служили постоянство температуры просветления и соответствие значений температур фазовых переходов литературным данным.

Методом поляризационной микроскопии получены фотографии текстур вышеупомянутых ЖК-соединений (рис. 5).

На рис. 6 представлены структурные формулы используемых холестерилловых эфиров, а в таблице 1 даны их физико-химические характеристики.

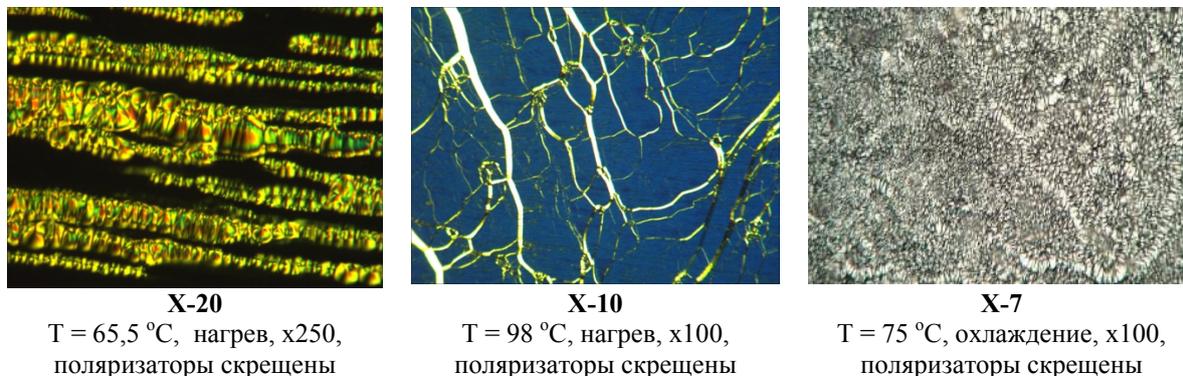
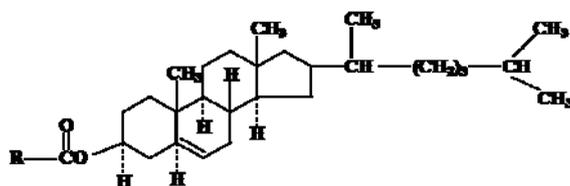


Рис. 5. Текстуры мезофаз используемых холестерилловых эфиров карбоновых кислот



X-7: R = CH₃(CH₂)₁₆COO–;

X-16: R = CH₃(CH₂)₇CH=CH(CH₂)₇COO–;

X-10: R = CH₃CH₂COO–

X-20: R = CH₃(CH₂)₁₁COO–

Рис. 6. Структурные формулы используемых ЖК-присадок

Таблица 1. Физико-химические характеристики исследуемых ЖК-присадок

№	Название ЖК-присадки	Брутто-формула	Температура плавления, °С	Температура просветления, °С
1.	Холестерилловый эфир стеариновой кислоты (X-7)	C ₄₅ H ₈₀ O	≥ 76,0	≤ 86,0
2.	Холестерилловый эфир пропионовой кислоты (X-10)	C ₃₀ H ₅₀ O ₂	96,25 ± 1,75	112,75 ± 1,25
3.	Холестерилловый эфир олеиновой кислоты (X-16)	C ₄₅ H ₇₈ O ₂	20,0	45,0
4.	Холестерилловый эфир тридекановой кислоты (X-20)	C ₄₀ H ₇₀ O ₂	62,0 ± 2,0	84,5 ± 1,5

Составы двух- и трехкомпонентных смесей (в массовых процентах), которые подвергались триботехническим испытаниям, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Составы двух- и трехкомпонентных смесей (мас. %)

Двухкомпонентные смеси	Трехкомпонентные смеси
Индустриальное масло И-20А (основа) с присадками:	
2 % X-7	2 % X-7 и 0,0001 % МУНТ
2 % X-10	2 % X-10 и 0,0001 % МУНТ
2 % X-16	2 % X-16 и 0,0001 % МУНТ
2 % X-20	2 % X-20 и 0,0001 % МУНТ

Для расчета коэффициента трения изначально считали момент трения

$$M = 0,00001 \cdot x^2 + 0,0992 \cdot x + 0,0058, \quad (4)$$

где x – значение, полученное из трибограмм.

Далее рассчитывали коэффициент трения по формуле

$$f = 2 \times \frac{M}{pd}, \quad (5)$$

где M – момент трения; p – нагрузка на образец; d – диаметр диска.

В ходе триботехнических испытаний нами были получены износные показатели, такие как площадь пятна износа шарика и ширина износа дорожки ролика. Результаты расчетов и эксперимента представлены в табл. 3.

Далее с использованием холестерилового эфира стеариновой кислоты (X-7) было исследовано влияние различных количеств присадки (1, 2, 5, 10 и 20 %) на коэффициент трения и площадь пятна износа шарика. Испытания проводились на машине трения 2070 СМТ-1 при нагрузке 200 Н. Результаты представлены на рис. 7 и 8.

Таблица 3. Результаты триботехнических испытаний

Изучаемые образцы	Температура, С°		Износ ролика, мм	Площадь пятна износа шарика, мм	Коэфф. трения, f
	Начало	Конец			
Масло И-20 А	19	50	0,35	0,11	0,051
Масло + X-7	22	55	0,3	0,106	0,088
Масло + X-7 + МУНТ	19	51	0,525	0,28	0,046
Масло + X-20	30	61	0,275	0,102	0,064
Масло + X-20+МУНТ	19	49	0,5	0,165	0,046
Масло + X-10	19	48	0,625	0,298	0,051
Масло + X-10 +МУНТ	21	56	0,6	0,306	0,088
Масло + X-16	24	54	0,6	0,158	0,088
Масло + X-16 +МУНТ	24	53,5	0,575	0,108	0,076

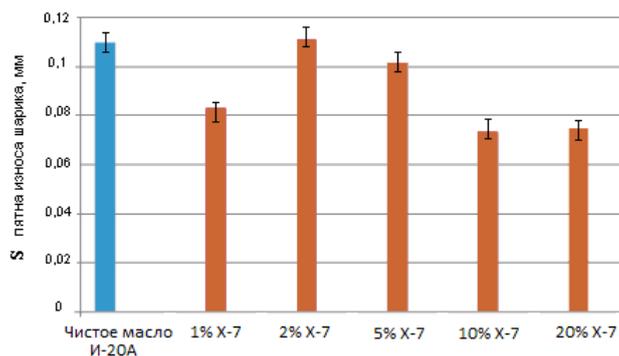


Рис. 7. Зависимость площади пятна износа шарика в бинарной системе «И-20А – X-7» от концентрации X-7 (мас. %)

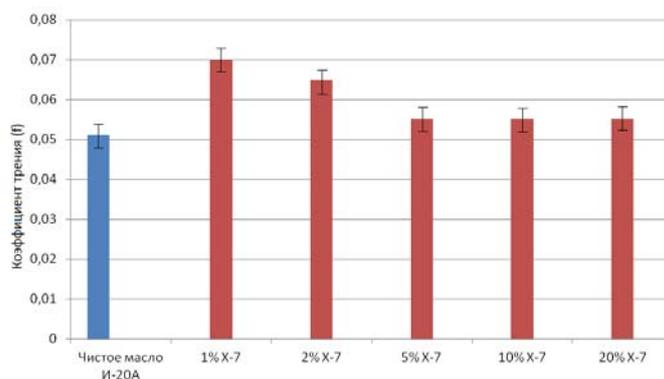


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения в бинарной системе «И-20А – X-7» от концентрации X-7 (мас. %)

Заключение

Проведенные реологические испытания показали, что введение нанотрубок приводит к изменению соотношения между упругой и вязкой составляющими в пользу увеличения влияния упругих свойств образца, что ведет к ухудшению трибологических характеристик масла И-20А.

Анализ результатов триботехнических испытаний свидетельствует, что холестерические присадки **X-7** и **X-20** к И-20А с микродобавкой МУНТ имеют хорошие антифрикционные качества, а **X-7** и **X-20** являются эффективными противоизносными присадками.

Смазочные композиции на основе индустриального масла с ЖК-присадками **X-10** и **X-16** и микродобавками УНТ при весовых соотношениях компонентов, указанных в табл. 2, не дали положительного результата в отношении понижения коэффициента трения и повышения износных показателей.

Установлено, что введение присадки холестерилового эфира стеариновой кислоты (**X-7**) в индустриальное масло И-20А, с разными значениями концентраций, способствует существенному увеличению показателей износостойкости пар трения. Однако при этом наблюдалось некоторое повышение показателей коэффициента трения. Присадка **X-7** с концентрацией 20 мас. % проявила себя как хороший загущающий компонент.

Возможность варьировать состав и весовое соотношение компонентов в опытных смазочных композициях, а также возможность смены режимов проведения триботехнических испытаний позволяют говорить о перспективности исследований в данной области.

Список литературы / References

1. *Ермаков С. Ф.* Трибофизика жидких кристаллов. Гомель : ИММС НАН Беларуси. 2008. 232 с.
2. *Суслов А. А., Ермаков С. Ф.* // *Материалы, технологии, инструменты.* 1977. Т. 2, № 1. С. 5–11.
3. *Томишко М. М., Демичева О. В., Алексеев А. М., Томишко А. Г., Клинова Л. Л., Фетисова О. Е.* // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества имени Д.И. Менделеева).* 2008. Т. LII, вып. 5. С. 39–43.
4. Сайт «Комплексные поставки смазочных масел». (<http://www.ural-kub.ru/industrialnoe/i-20a/>).
5. *Усольцева Н. В., Якемсева М. В.* // *Органические и гибридные наноматериалы : тенденции и перспективы : монография / под ред. В. Ф. Разумова,* М. В. Ключева. Иваново : Иван. гос. ун-т, 2013. Гл. 7. С. 228 – 280.
6. *Усольцева Н.В., Акопова О.Б.* // *Физика, химия и механика трибосистем : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. Н. Латышева.* Иваново : Иван. гос. ун-т, 2011. Вып. 10. С. 14–23.
7. *Дьячков П. Н.* Углеродные нанотрубки. Строение, свойства, применения. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 290 с.
8. *Томишко М. М., Демичева О. В., Данилов В. Д., Покровский, Е. М., Скородумов В. Ф.* // *Научная сессия МИФИ-2007 : сб. науч. тр..* 2007. Т. 9. С. 195–197.
9. Intech Journals. (<http://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes/liquid-crystal-dispersions-of-carbon-nanotubes-dielectric-electro-optical-and-structural-peculiariti>).
10. Сайт лабораторного оборудования компании Милаформ: (<http://www.labotech.ru/catalog/index.phtml?cat=10&id=546>).
11. Большая энциклопедия нефти и газа : (<http://www.ngpedia.ru/id051348p3.html>).
12. *Ермаков С. Ф., Родненков В. Г., Белоенко Е. Д., Купчинов Б. И.* Жидкие кристаллы в технике и медицине. Минск : «Асар», 2002. 407 с.
13. Лабтех. Приборы для анализа нефти и нефтепродуктов. (<http://www.labtex-oil.ru/productID20000.shtml>).
14. *Берёзина Е. В.* Самоорганизация присадок в граничном смазочном слое трибосопряженных машин : дис. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2007. 461 с.
15. *Шрамм Г.* Основы практической реологии и реометрии : пер. с англ. И. А. Лавыгина ; под ред. В. Г. Куличихина. М. : КолоСС, 2003. 312 с.
16. *Гребенкин М. Ф., Иващенко А. В.* Жидкокристаллические материалы. М. : Химия, 1989. 288 с.
17. *Маршалов М. С.* Улучшение технологических свойств СОТС для сверления конструкционных сталей за счет присадок мезогенных соединений холестерина : дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2011. 155 с.
18. *Дерягин Б. В.* К теории граничного трения // *Развитие теории трения и изнашивания.* М., 1957. С. 15–26.
19. *Годлевский В. А., Усольцева Н. В.* Поверхностные явления и мезоморфизм : учеб. пособие. Иваново : Иван. гос. ун-т, 2010. 184 с.
20. *Усольцева Н.В., Годлевский В.А.* Наноматериалы в трибологических процессах // *Сборник научн. трудов Междунар. науч.-техн. конф. имени Леонардо да Винчи (10–14 мая 2013).* Берлин : Изд-ль: *Wissenschaftliche Welt e. V.*, 2013. № 1. С. 202–209.

Поступила в редакцию 14.12.2013 г.