



УДК 541.182.022:532.135

Е. В. Берёзина, М. Н. Корсаков, А. С. Павлов, В. В. Быкова, Н. В. Усольцева**

**КРИВЫЕ ТЕЧЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ПРИСАДКАМИ**

**CURVE CURRENTS OF VISCOUS LUBRICANTS
WITH LIQUID CRYSTAL ADDITIVES**

Ивановский государственный университет

*Научно-исследовательский институт наноматериалов

153025 Иваново, ул. Ермака, д. 39.

E-mail: elena_berezina@mail.ru

Методом ротационной вискозиметрии на приборе системы «конус-плоскость» исследованы реологические характеристики пластичных смазочных материалов с жидкокристаллическими присадками – сложные эфиры жирных кислот холестерина. Определен тип течения расплавов соединений и проведен анализ зависимости характеристик течения образца от строения молекул соединений.

Ключевые слова: жидкокристаллические присадки, жирные кислоты холестерина, пластичные смазочные материалы.

The rheological characteristics of viscous lubricants with liquid crystal additives – esters of cholesterol fatty acids were studied by the rotation viscosimetry method using «cone – plane» system equipment. The type of compound melt current was determined and the analysis of the dependence of sample current characteristics from compound molecule structure was carried out.

Key words: liquid crystal additives, cholesterol fatty acids, viscous lubricants.

Создание трибологически эффективных и экологически безопасных смазочных материалов (СМ) позволяет уменьшить энергозатраты при трении, замедлить изнашивание трибосопряжений и металлорежущего инструмента, повысить производительность технологических процессов, уменьшить вредное влияние на окружающую среду и персонал. Выбор трибоактивных присадок для СМ в большинстве случаев происходит эмпирически. Поэтому требуются новые научные исследования, направленные на дальнейшее повышение эффективности трибосопряжений на базе использования современных технологий.

Вязкость измеряется легче, чем некоторые другие из свойств, что делает ее ценным инструментом для изучения материалов. Идентифицируя специфическое реологическое поведение материала, мы можем задаваться вопросом, как эта информация связана с другими характеристиками. Вязкость не может рассматриваться вне зависимости от внутреннего строения системы. Структура определяет вязкость системы, а вяз-

~~~~~

кость – развитие в ней структуры. Реологические свойства технологических сред определяются особенностями их химической структуры. Вязкость смазок зависит не только от температуры и давления, но и от скорости сдвига. С ростом скорости сдвига вязкость, например, пластичных смазочных материалов (ПСМ) снижается, потому что разрушается внутренняя структура смазки. Влияние температуры на вязкость ПСМ меньше, чем для масла, потому что главную роль в сопротивлении течению играет разрушение скелета загустителя, а его прочность сравнительно мало зависит от температуры [1].

Пластичные смазки представляют собой структурированные коллоидные системы, свойства которых зависят, прежде всего, от особенностей трехмерного структурного каркаса, образующегося из дисперсной фазы, который в своих ячейках удерживает относительно большое количество (80 – 90 %) дисперсионной среды. Устойчивость структурированной системы зависит от прочности структурного каркаса, сил взаимодействия между его отдельными частицами, между элементами структурного каркаса и дисперсионной средой на границе раздела фаз, числа контактов частиц каркаса в единице объема, от критической концентрации ассоциации (мицеллообразования) различных мыл и ряда других коллоидно-химических факторов. Пластичные смазки выделяют в особый класс реологических систем [1], для которых характерно сочетание хрупкости, обусловленной разрывом жестких связей в каркасе, и пластичности (способности течь подобно жидкости) за пределами определенной критической нагрузки (статического предельного напряжения сдвига  $\tau_s$ ).

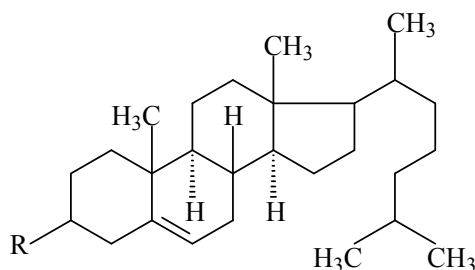
На реологические свойства оказывают влияние структурные характеристики мезогенных присадок, которые непосредственно связаны с молекулярными взаимодействиями, особенностями строения и теплового движения структурных элементов, взаимодействием этих элементов друг с другом и с молекулами дисперсионной среды и т. д. Известно, что вязкость СМ, содержащего частицы мелкодисперсной фазы, – один из важнейших факторов, определяющих их трибологическую эффективность и агрегативную устойчивость.

Следует отметить, что реологические свойства мезогенных и немезогенных соединений значительно отличаются. Мезогенные соединения обладают рядом особенностей, отличающих их от обычных изотропных жидкостей. Отмечается [2], что отличительной особенностью вязкости является гигантский диапазон ее изменений в пределах мезофазы. 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 характерной структурой холестерической мезофазы, обладающей свойствами неньютоновской жидкости [3].

Данные особенности реологических свойств мезогенных соединений позволяют предположить изменения реологического поведения традиционных масел, ПСМ, ПАВ при введении в них исследуемых веществ в качестве присадок. Характер этих изменений непредсказуем, т. к. реология систем, содержащих мезогенные и немезогенные компоненты, исследована слабо.

Как известно [4], холестерол образует сложные эфиры с высшими жирными кислотами (рис. 1). В качестве объектов исследования выбраны пять представителей ряда сложных эфиров холестерола марки «ХЧ» – холестерилпеларгонат (I), холестерилкапринат (II), холестерилтридецилат (III), холестерилпальмитат (IV), холестерилстеарат (V), являющиеся жидкими кристаллами, так как изучение их свойств имеет огромное

значение для практики [4]. Температуры фазовых переходов эфиров жирных кислот холестерина I – V представлены в таблице 1.



- I** R = CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>7</sub>COO-    **II** R = CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>8</sub>COO-  
**III** R = CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>11</sub>COO-    **IV** R = CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>14</sub>COO-  
**V** R = CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COO-

Рис. 1. Структурная формула сложных эфиров холестерина I – V

Таблица 1

**Температура фазовых переходов эфиров жирных кислот холестерина I – V**

| № соединения | Температура фазовых переходов               |
|--------------|---------------------------------------------|
| <b>I</b>     | Cr • 80,5 °C Sm (• 77,5 °C) Ch • 92, 0 °C I |
| <b>II</b>    | Cr • 85,5 °C Sm (• 81,5 °C) Ch • 92, 5 °C I |
| <b>III</b>   | Cr • 63,5 °C Sm • 78,8 °C Ch • 84, 8 °C I   |
| <b>IV</b>    | Cr • 70,0 °C Sm • 78,3 °C Ch • 82, 9 °C I   |
| <b>V</b>     | Cr • 83,0 °C Sm (• 75,5 °C Ch • 79, 9 °C I  |

Примечание: (• ) – при охлаждении

В качестве основы смазочной композиции использовали Литол-24 – многоцелевая водостойкая консистентная смазка на литиевой основе для нагруженных узлов трения (табл. 2).

Таблица 2

**Технические характеристики пластично смазочного материала «Литол-24»**

| ПСМ      | Загуститель   | Температура каплепадения, °C | Пенетрация при 25 °C, мм | Предел прочности при 20 °C, Па | Вязкость при 0 °C и 10 °C, Па*с, не более | Коллоидная стабильность, %, не более |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|
| Литол-24 | Литиевое мыло | >185                         | 22 – 25                  | 500 – 1000                     | 280                                       | 12                                   |

~~~~~

Методика измерения вязкости СМ на ротационном вискозиметре

В работе использовался вискозиметр Брукфильда (модель Brookfield Programmable DV-II+, производства Brookfield Eng. Labs., Inc., USA). Экспериментальные исследования проводились на оборудовании фирмы *Brookfield*. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. Программируемый вискозиметр LVDV-II+PRO компании *Brookfield* предназначен для измерения вязкости жидкости при заданных скоростях сдвига. Вискозиметр предлагает многообразие режимов контроля, позволяющих производить как традиционные автономные, так и автоматические операции посредством установленных на компьютере программ или при полном компьютерном контроле при использовании программы Rheocalc32.

Диапазоны измерения вязкости измерительной системы «конус – плоскость» (С/Р) представлены в табл. 3.

Таблица 3 [2]

Диапазоны измерения вязкости

Шпиндель	Объем пробы, мл	Скорость сдвига, с ⁻¹	Угол, гр.	Радиус, см	Вязкость, сПз
CP-51	0,5	3,84 N*	1,565	1,2	2,4 – 47990
CP-52	0,5	2,0 N*	3	1,2	4,6 – 92130

*N – скорость в оборотах в минуту

При проведении измерений на вискозиметре необходимо учитывать следующие ограничения по нижнему пределу вязкости:

1. Измерение вязкости приемлемо, если момент кручения находится в пределах от 10 до 100 % (независимо от комбинации шпиндель/скорость вращения).
2. Измерение вязкости должно проводиться в условиях ламинарного течения.

Первое ограничение относится к точности измерения. Вискозиметр имеет относительную точность измерения (относительно полной шкалы) $\pm 1\%$ при любой комбинации шпиндель/скорость вращения, следовательно, при отсчете момента ниже 10 % потенциальная ошибка определения вязкости может стать неприемлемо высокой.

Второе ограничение учитывает механику потока жидкости. Все измерения реологических характеристик жидкости должны проводиться в условиях ламинарного течения, когда все движения элементов жидкости происходят в слоях, параллельных направлению напряжения сдвига. Для ротационных измерительных систем это означает, что все элементарные движения должны быть концентрическими. Когда инерциальные силы в жидкости превышают некоторый предел, возникает турбулентность, и в этом случае течение нельзя анализировать по обычным математическим моделям. Турбулентное течение дает аномально высокие отсчеты вискозиметра с нелинейной зависимостью отсчета от степени турбулентности потока.

Переменные в измерениях вязкости. Как и в любых инструментальных измерениях, при измерении вязкости существуют переменные, влияющие на показания вискозиметра. Эти переменные могут относиться как к самому вискозиметру, так и к тестируемой жидкости. Переменные, относящиеся к тестируемой жидкости, связаны с реологическими свойствами жидкости, в то время как инструментальные переменные связаны с дизайном прибора и геометрией выбранного шпинделя.

~~~~~

*Переменные, связанные с прибором.* Большинство вискозиметров предназначено для неньютоновских жидкостей. Результаты исследования таких жидкостей зависят от скоростей сдвига и конфигурации шпинделя. Спецификации шпинделей вискозиметра и их геометрических форм будут влиять на значения вязкости. Если одно измерение произвести при скорости 2,5 об/мин, а второе – при 50 об/мин, полученные значения будут отличаться друг от друга, потому что показания считывались при различных скоростях. Чем выше скорость шпинделя, тем больше скорость сдвига. Скорость сдвига данного измерения определяется следующими факторами: скоростью вращения шпинделя, размером и формой шпинделя, размером и формой используемого контейнера и, таким образом, расстоянием между стенкой контейнера и поверхностью шпинделя [2].

*Термостатирование испытательного узла.* Термостатирование испытательного узла на вискозиметрах происходит с помощью устройств, называемых «циркуляционными банями». Программируемые циркуляционные бани предназначены для прецизионного регулирования температуры жидкости в бане и/или во внешней аппаратуре (циркуляционном контуре). Резервуар бани можно использовать для погружения проб одновременно с циркуляцией теплоносителя во внешнем контуре. Баня модели ТС-102D укомплектована резервуаром емкостью 6 л. Все части бани, контактирующие с жидкостью, выполнены из коррозионно-стойкой нержавеющей стали (серия 300) [2].

Каждый реологический эксперимент на ротационном вискозиметре приводили со свежеприготовленным образцом. Систему первоначально выдерживали на протяжении 10 – 15 минут при постоянной скорости сдвига. Измерения начинали при максимальной скорости сдвига и продолжали, ступенчато снижая её. При каждом значении скорости сдвига регистрировали величины крутящего момента и напряжения сдвига.

Вязкостные характеристики структурированных систем, которые относятся к неньютоновским жидкостям, не могут быть выражены одной лишь константой, подобно коэффициенту вязкости ньютоновских жидкостей. Их принято оценивать функциональной зависимостью скорости сдвига от напряжения сдвига. Свободнодисперсные системы, содержащие частицы дисперсной фазы палочкообразной или плоской (диско-тической) формы, или же макромолекулы, деформирующиеся в потоке, относятся к классу неньютоновских жидкостей, так как их сопротивление течению существенно зависит от скорости сдвига. Для систем, содержащих мезогенные присадки, зависимость  $\eta$  ( $\gamma$ ) приобретает более сложный характер, что можно связать с особенностями структурирования и ассоциации компонентов в дисперсной среде.

Нами исследованы реологические характеристики систем «ПСМ – ЖК-соединение» при концентрации присадки: 0,5 %, 1,0 %, 1,5 %, 3,0 %, 5,0 %. В качестве ПСМ использовался Литол-24. Реограммы показывают, что вязкость системы непропорционально уменьшается с повышением скорости сдвига ротора вискозиметра, что позволяет отнести исследуемые системы к псевдопластическим материалам. Исследованные ПСМ с ЖК-присадками являются тиксотропными дисперсными системами. Это проявляется в гистерезисе кривых течения «напряжение сдвига – скорость сдвига», получаемых при увеличении и уменьшении скорости сдвига, а также в уменьшении значения вязкости при увеличении скорости сдвига. Зависимость вязкости от величины скорости сдвига – это отражение процесса разрушения структуры при увеличении скорости сдвига и восстановления структуры при обратном процессе. Следует особо подчеркнуть, что введение ЖК-соединений приводит к понижению пределов текучести. При незначительных напряжениях сдвига структурный каркас смазочного материала испытывает упругие, вполне обратимые деформации. При напряжениях сдвига выше некоторого предела, деформации начинают принимать необратимый характер. Дефор-

мазии, происходящие до предела текучести, протекают без нарушения целостности структурного каркаса, не нарушая взаимодействия. При этом связь между напряжением сдвига и скоростью сдвига хорошо описывается моделью *Шведова-Бингама*.

Полученные результаты, описывающие аномально-вязкое поведение при течении, объясняются наличием трехмерных пространственных структур, формирующихся в процессе потери агрегативной устойчивости. Рост или разрушение агрегатов происходит при изменении скорости сдвига. Решающим фактором, влияющим на реологию структурированных систем, является прочность и природа взаимодействий между частицами. Адсорбционные слои теряют прочность и проявляют свойства неньютоновских жидкостей. Введение ЖК-присадок приводит к изменению реологических свойств системы, что связано с формированием менее прочной пространственной структуры. Такое поведение кривых течения можно объяснить тем, что в неподвижной среде частицы коллоидной системы расположены довольно хаотично, а под действием возрастающих сдвигающих сил происходит все большая ориентация частиц в направлении течения. Повышение напряжения сдвига снижает силу взаимодействия между частицами и приводит к более быстрому разрушению структуры при повышении скорости сдвига.

Использовался основной графический метод анализа неньютоновского потока – график значения вязкости в зависимости от числа оборотов шпинделя вискозиметра. На рис. 2 – 12 приведены примеры кривых течения, построенных с применением различных методов для ПСМ Литол-24 с разными по своему химическому строению жидкокристаллическими соединениями. Характерным является то, что при малых скоростях сдвига наблюдаются перегибы в ходе кривых, свидетельствующие о структурных изменениях в системе. Как видно из полученных зависимостей, при добавлении присадки значительно уменьшается вязкость. При анализе кривых течения использована концепция *Ребиндера* о полной реологической кривой, где на разных участках реализуются различные механизмы течения [5] (рис. 13). На участке 1 структура практически не разрушена, течение отсутствует. На участке 2 происходит течение по Шведову и постепенный переход к течению по Бингаму на участке 3. После полного разрушения структуры возникает ньютоновское течение на участке 4. На каждом участке такой полной реологической кривой предполагается свой отдельный механизм течения.

Полученные закономерности изменения реологических показателей в зависимости от содержания и размера частиц присадок можно объяснить с позиций физико-химической механики дисперсных систем [5], согласно которой действия присадок характеризуются той или иной степенью агрегирования частиц. В процессе определения реологических показателей под воздействием напряжения сдвига происходит разрушение части агрегатов, в результате чего вязкость состава уменьшается и тем интенсивнее, чем выше напряжения сдвига. Агрегаты из более крупных частиц разрушаются легче.

Для всех исследованных образцов на измеренных кривых течения (зависимостях вязкости от напряжения сдвига (скорости сдвига)) наблюдался более или менее заметный спад (т. е. неньютоновское поведение), указывающий на присутствие протяженных молекулярных структур, разрушаемых при увеличении механической нагрузки. Возникновение заметного неньютоновского спада кривых течения свидетельствует о механическом разрушении части слабо связанных молекулярных сеток. У ПСМ разрушение структурного каркаса происходит в значительном диапазоне скоростей сдвига, вплоть до выхода системы на ньютоновский режим течения. Под воздействием напряжения сдвига происходит разрушение части агрегатов (ассоциатов), в результате чего вязкость композиций уменьшается и тем интенсивнее, чем выше напряжение сдвига [6]. Вязкость непропорционально уменьшается с повышением скорости сдвига, что позволяет

отнести ПСМ с исследуемыми ЖК-присадками к псевдопластичным материалам. В логарифмических координатах вязкости от напряжения сдвига для неньютоновских материалов линейна.

Разность между наибольшей предельной вязкостью практически неразрушенной структуры и наименьшей вязкостью предельно разрушенной структуры составляет больше 300 Па·с, что характерно для сильноструктурированных дисперсных систем (по П. А. Ребиндеру) [5]. Когда разность снижается до 200 – 100 Па·с, исследуемые жидкости можно определять как слабоструктурированные составы. Такое поведение кривых течения можно объяснить тем, что в неподвижной среде частицы системы расположены хаотично, а под действием возрастающих сдвигающих сил происходит все большая ориентация частиц в направлении течения, что снижает силу взаимодействия между частицами и приводит к более быстрому разрушению структуры при повышении скорости сдвига.

Наиболее заметный наблюдаемый нами эффект – существенное снижение величины динамической вязкости пластичных смазок с ЖК-присадками. Увеличение вязкости можно приписать формированию сравнительно сильно связанных надмолекулярных ассоциатов, которые разрушаются лишь при высоких температурах потока. Основываясь на имеющихся экспериментальных и теоретических сведениях о закономерностях взаимосвязи молекулярной структуры с реологическими характеристиками, мы предполагаем, что основной причиной наблюдавшихся вязкостных аномалий является надмолекулярная перестройка в системе.

Все еще остаются не выясненными конкретные механизмы взаимодействия мезогенных присадок в исследуемых базовых средах. Проведенные исследования подтверждают эффективность реологических измерений как средства выявления особенностей внутренней надмолекулярной структуры. Формирование смазочных композиций при введении мезогенных присадок сопровождается реализацией кривых течения структурированных растворов, имеющих предел прочности, а также непрерывным изменением вида кривых, величин вязкости и критических напряжений сдвига. Ориентационные явления, происходящие в системе, приводят к значительному снижению вязкости исследуемых соединений [6]. Ориентированные структуры в присутствии ЖК-соединений обладают меньшим сопротивлением течению, чем неориентированные молекулы ПСМ, что выражается в снижении вязкости (при определенных концентрациях присадки). Мы видим улучшение реологических свойств – пластическая вязкость уменьшается, также уменьшается и напряжение сдвига.

Реологические исследования могут быть положены в основу описания закономерностей физико-механических свойств смазочных материалов. Введения даже очень малого количества добавок приводит к снижению эффективной вязкости в несколько десятков раз. Это объясняется тем, что введение присадок сохраняет неизменными те структуры, посредством движения которых осуществляется течение системы. Повышение вязкости при дальнейшем увеличении концентрации присадки, вызвано переходом от меж-, к внутримолекулярной пластификации, с разрыхлением существующих структурных образований по мере увеличения количества добавляемой присадки. Таким образом, используя метод введения малых количеств присадок, можно при этом добиться резкого изменения свойств смазочной композиции.

Снижение вязкости с ростом скорости сдвига позволяет отнести данный материал к вязкопластичному типу и применить для описания течения модель Кэссона:

$$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \eta_c^{1/2} \cdot \dot{\gamma}^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\tau_c$  – динамическое предельное напряжение сдвига по Кэссону;  $\eta_c$  – коэффициент вязкости по Кэссону.

При каждом значении скорости сдвига регистрировали величины крутящего момента. Чтобы проверить справедливость применения к описанию кривых течения исследуемых систем модели Кэссона, были вычислены кэссоновские коэффициенты. По полученным данным построены кривые течения исследуемых соединений в координатах Кэссона  $\dot{\gamma}^{1/2} - \tau^{1/2}$ .

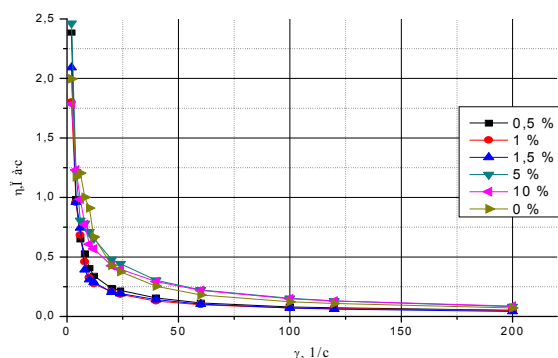


Рис. 2. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение I различной концентрации: зависимость вязкости (Па\*с) от скорости сдвига ( $c^{-1}$ )

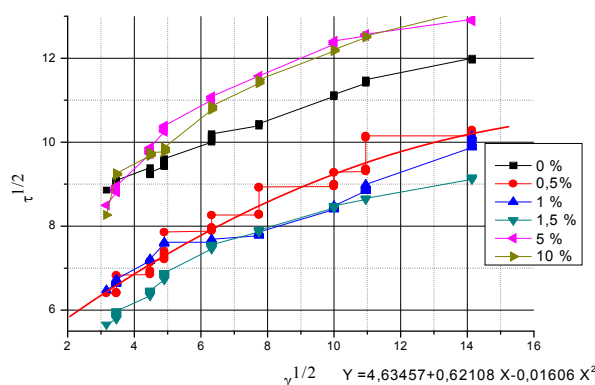


Рис. 3. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение I: кривые течения в «кэссоновских координатах»

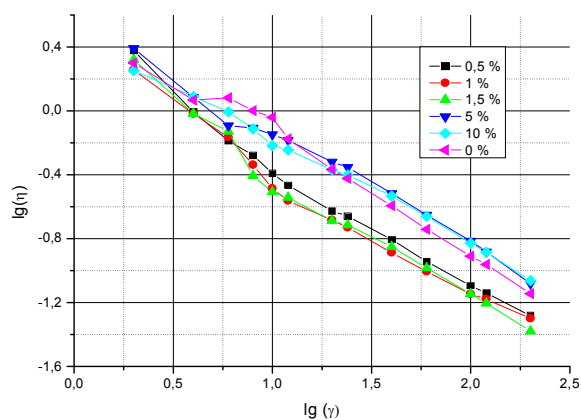


Рис. 4. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение I: кривые течения в «логарифмических координатах»



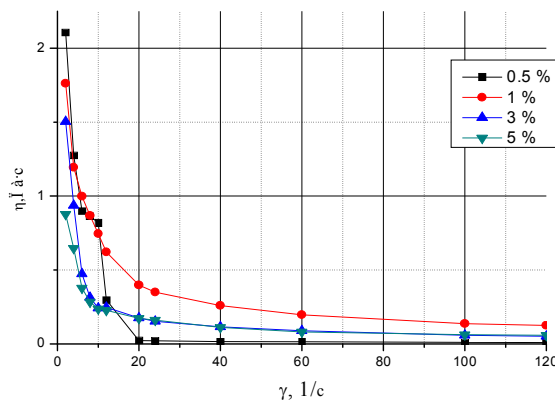


Рис. 5. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение V различной концентрации: зависимость вязкости (Па\*с) от скорости сдвига (с<sup>-1</sup>)

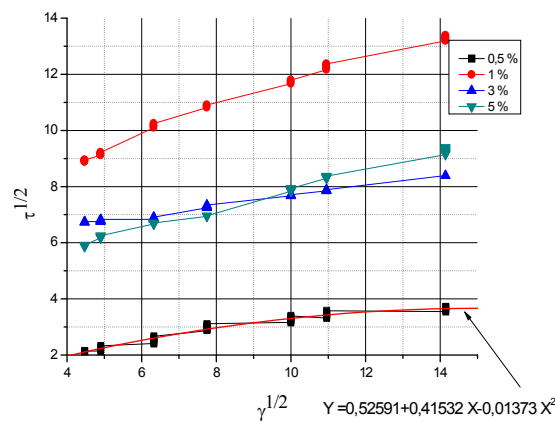


Рис. 6. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение V: кривые течения в «кэссоновских координатах»

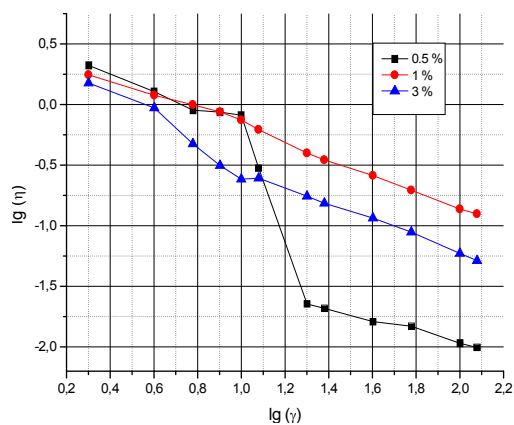


Рис. 7. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение V: кривые течения в «логарифмических координатах»

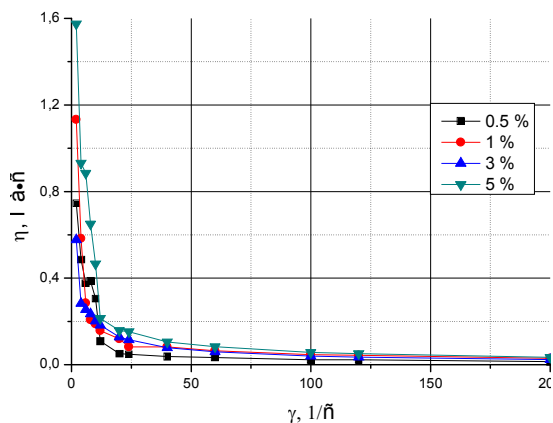


Рис. 8. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение III различной концентрации: зависимость вязкости (Па\*с) от скорости сдвига (с<sup>-1</sup>)

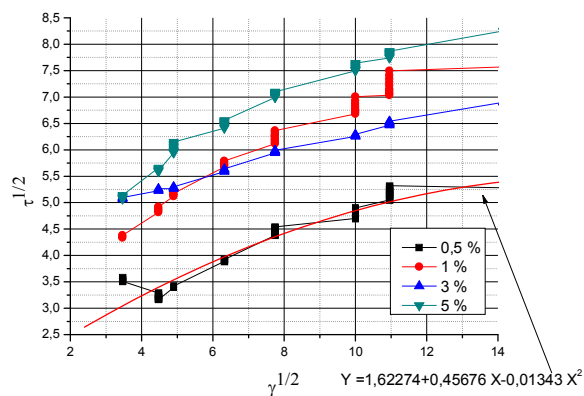


Рис. 9. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение III: кривые течения в «кэссоновских координатах»

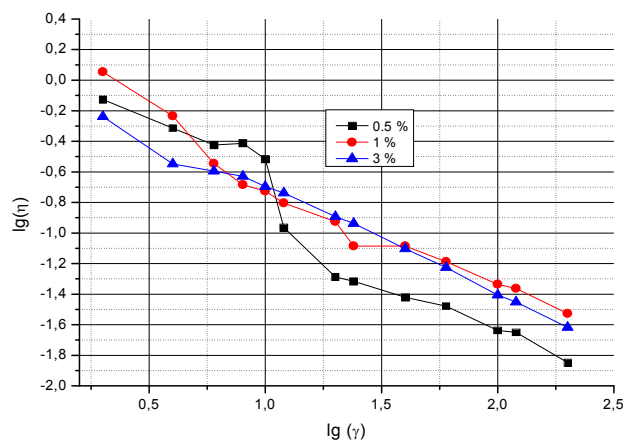


Рис. 10. Кривые течения для композиции Литол-24 – соединение III: кривые течения в «логарифмических координатах»

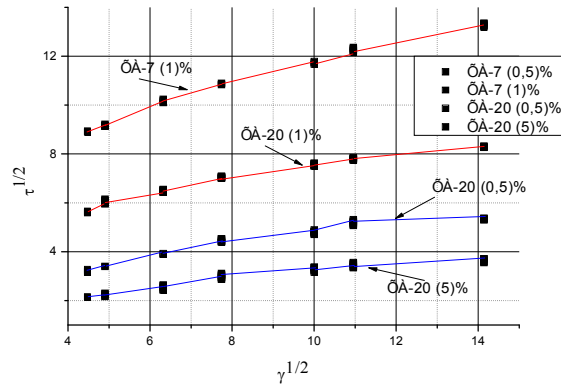


Рис. 11. Сравнение кривых течения исследуемых образцов в базовой композиции Литол-24: кривые течения в «кэссоновских координатах»

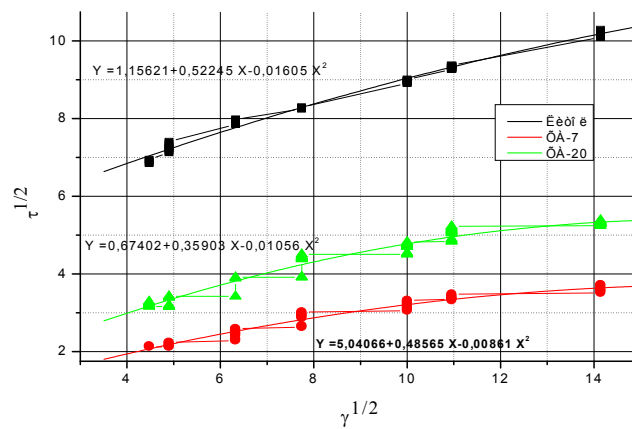


Рис. 12. Сравнение кривых течения исследуемых образцов в базовой композиции Литол-24 при концентрации 0,5 %: кривые течения в «кэссоновских координатах»

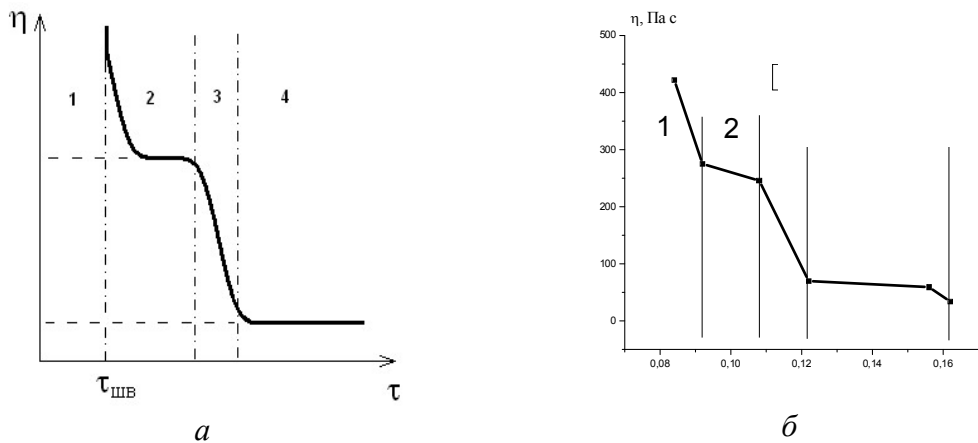


Рис. 13. Реологические кривые:  
 а – теоретическая полная реологическая кривая по П. А. Ребиндеру [23];  
 б – реальная для системы Литол-24 – ЖК-присадка

Кривые течения исследуемых соединений представляют собой прямые линии, что свидетельствует о том, что исследуемый образец подчиняется модели Кэссона во

~~~~~

всем исследованном температурном диапазоне. Регрессионный анализ при помощи программы ORIGIN позволил определить аналитические выражения для кривых течения в координатах $\dot{\gamma}^{1/2} - \tau^{1/2}$. Коэффициенты регрессии, соответствующие предельному динамическому напряжению сдвига и коэффициенту вязкости по Кэссону, как и следовало ожидать, снижаются с ростом скорости сдвига.

Выводы

1. Добавка ЖК-присадки к ПСМ Литол-24 приводит к уменьшению параметра роста вязкости.

2. Выделяются области, в которых реализуется течение, близкое к ньютоновскому, и область резкого снижения вязкости за счет разрушения структуры (неньютоновское течение).

3. Коэффициенты регрессии, соответствующие предельному динамическому напряжению сдвига и коэффициенту вязкости по Кэссону снижаются с ростом скорости сдвига.

4. Вязкость системы «ПСМ Литол-24 – холестерический жидкий кристалл» растет с увеличением длины концевого заместителя мезогена.

5. Введение ЖК-присадок приводит к изменению реологических свойств системы, что связано с формированием менее прочной пространственной структуры, что должно благотворно сказаться на трибологических свойствах смазочного материала.

Работа поддержана грантом РФФИ № 10-03-00881.

Список литературы

1. Фройштетер Г. Б., Трилиский К. К., Ицук Ю. Л., Ступак П. Н. Реологические и теплофизические свойства пластичных смазок / под ред. Г. В. Виноградова. М.: Химия, 1980. 175 с.
2. More solutions to sticky problems // Brookfield Engineering Laboratories, Inc. 11 Commerce Boulevard Middleboro, MA 02346 – 1031. USA, 2001. 40 с.
3. Ермаков С. Ф., Родненков В. Г., Белоенко Е. Д., Купчинов Б. И. Жидкие кристаллы в технике и медицине. Минск: Асара. М.: ЧеРо, 2002. 411 с.
4. Усольцева Н. В. Лиотропные жидкие кристаллы: химическая и надмолекулярная структура. Иваново: Иван. гос. ун-т, 1994. 220 с.
5. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 428 с.
6. Берёзина Е. В. Производные фталоцианина как присадки к смазочным композициям. Иваново: Иван. гос. ун-т, 2007. 240 с.

Поступила в редакцию 29.03.2010 г.