

Е. В. Березина, М. В. Богомолов, В. А. Годлевский, Д. С. Фомичев

ПЛАСТИЧНЫЕ СОТС С ДОБАВКАМИ СТРУКТУРНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Приведены результаты исследования технологических и физико-химических характеристик пластичных СОТС с добавками структурного действия – дискотическими мезогенами. Показана возможность применения исследованных материалов в качестве смазок разового применения на операции сверления. *СОТС; резание; дискотические мезогены*

В области исследования и разработки новых СОТС отмечают две тенденции. Первая из них сводится к отказу от химически активных присадок и замены их присадками «структурного действия», работа которых связана с эффектом поверхностной надмолекулярной самоорганизации [1]. Вторая тенденция – ограниченная подача СОТС: т. е. не непрерывным поливом, а небольшими количествами, дозами, необходимыми и достаточными для выполнения конкретной технологической операции. При этом существенно снижается потребность в СОТС и практически исчезает необходимость в утилизации и регенерации использованного смазочного материала. СОТС, подаваемые в минимизированных количествах, мы предложили называть смазочными материалами «разового применения» («once only lubricants») [2]. В последнее время популярным становится термин «почти сухое резание» (near dry machining) [3].

Тот факт, что эффективное смазочное действие СОТС может быть обеспечено подачей даже очень небольшого количества смазочной среды, обусловлено микрокапиллярным смазочным механизмом [4]. В рамках данного механизма становится возможным объяснить, почему смазочное действие СОТС при резании зависит не столько от количества подаваемой среды, сколько от поведения ее трибоактивных компонентов на смазываемых поверхностях стружки и инструмента. В данном контексте на первый план выходят адсорбционная активность и мезоморфизм присадок. Этими свойствами обладают, в частности, дискотические мезогены группы производных фталоцианина (Фц-соединения).

Способность к мезоморфизму производных Фц-соединений связана с возможностью формирования надмолекулярных ансамблей, а наличие в составе их молекул ряда функциональных групп определяет химическую и трибологическую активность данных соединений как компонентов СОТС. Различия в физико-химических и функциональных свойствах этих соединений обусловлены, по-видимому, количеством и химической природой боковых заместителей. Производные фталоцианина, если они нерастворимы в базовой основе СОТС и образуют твердотельные взвеси, можно отнести по механизму действия к твердым смазочным материалам.

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

В качестве добавок структурного действия был использован ряд красителей, обладающих требуемой молекулярной структурой дискотического мезогена и соответствующими мезоморфными свойствами (см. таблицу). В качестве базовых составов для приготовления модельных СОТС использовали серийные пластичные смазки с различными типами загустителя: Литол 24, СолидолС, ЦИАТИМ 221. Для сравнения применяли инактивную присадку – коллоидный графит марки С20, а также металлоплакирующую медьсодержащую смазку «МС вымпел». В качестве обрабатываемых материалов применяли сталь 45 и коррозионностойкую сталь 12Х18Н10Т. В качестве режущего материала использовали быстрорежущую сталь Р6М5.

ПОЛЯРИЗАЦИОННО- МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поляризованный свет дает возможность выявления в материале мезоморфных структур. В выполненных нами поляризационных исследованиях пластичных СОТС была установлена

Контактная информация: 8(4932) 32-62-10

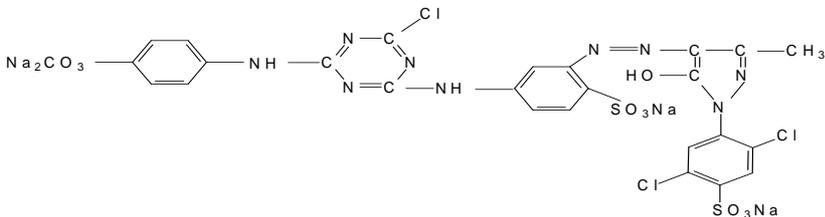
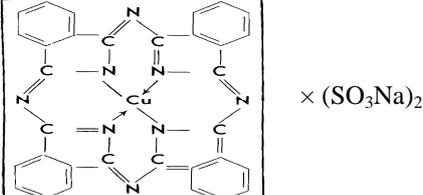
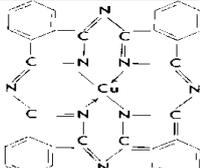
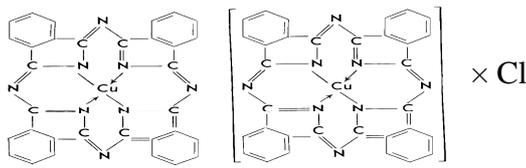
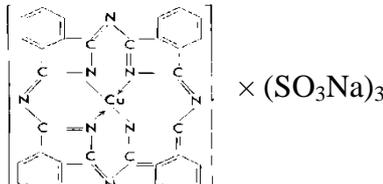
Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-08-01102-а)

неизменяемость в течение длительного времени застывших картин «чистых» смазок (рис. 1), а также смазок с добавками гетероциклических соединений (рис. 2). Также подвергались исследованию вещества после остановки течения. Результаты говорят о том, что у смазок существует практически мгновенная возможность восстановления нарушенных связей в смазках. При

остановке течения часть между элементами структурного каркаса восстанавливается практически мгновенно.

Следует отметить, что по данному параметру существует различие у смазок с добавками гетероциклических соединений, которые обнаруживают так называемую тиксотропную «усталость».

Наименование и молекулярная структура исследуемых присадок к пластичным смазочным материалам

Структурная формула	Наименование по производственной номенклатуре и условное обозначение
$\text{Cu Фц} \begin{cases} (\text{SO}_3 \text{A})_n \\ (\text{SO}_3 \text{NH} - \text{C}_6\text{H}_4 - \text{SO}_2 \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{OSO}_3 \text{A})_m \end{cases}$ <p>где А – водород или углеводородная цепь различной длины</p>	Активный бирюзовый 2"3"Т (КАБ 2 "3"Т) – Гц 1
	Активный ярко-желтый 5 "3" (КАЯЖ) – Гц 2
	Прямой бирюзовый светопрочный (КЛБС) – Гц 4
$\text{Cu Фц} \begin{cases} (\text{SO}_3 \text{A})_n \\ \text{SO}_2 \text{NHCH}_2 \text{CH}_2 \text{N} \begin{cases} \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{OSO}_3 \text{A} \\ \text{CH}_2 \text{CH}_2 \text{OSO}_3 \text{A} \end{cases} \end{cases} \quad m$ <p>где А — водород или углеводородная цепь различной длины</p>	Активный бирюзовый "К" (КАБ "К") – Гц 5
	Пигмент голубой фталоцианиновый УНФ (ПФФц УНФ) – Гц 6
	Пигмент голубой фталоцианиновый 2"3"У (ПФФц 2"3"У) – Гц 7
	Активный ярко-голубой 5"3"Ш (КАЯ-Г 5"3"Ш) – Гц 8

Видимо, содержание Фц-соединений приводит не только к разрыву связей между дисперсными частицами, но зачастую и к дроблению самих дисперсных частиц. При этом анизотричность частиц является фактором, способствующим восстановлению структуры.

На фотографиях (рис. 1, 2) мы видим, что иногда разрушается лишь структурный каркас, а сами дисперсные частицы остаются неразрушенными; это может происходить при блокировке активных поверхностей элементарных частиц частицами Фц-соединений. При этом у некоторых смазок с Фц-соединениями отмечается агрегирование дисперсных частиц, приводящее к резкому уменьшению их анизотричности. При наличии в смазке Фц-соединений, особенно молекул с разветвленной протяженностью, большей интенсивности механического воздействия может соответствовать более высокая равновесная прочность. Кинетика восстановления разрушенных связей (при действиях нагрузок) зависит от степени блокировки дисперсных частиц смазки частицами исследуемых соединений, различной на разных стадиях разрушения.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из наиболее важных в технологическом отношении свойств растворов является их динамическая вязкость. Эта величина, характеризующая внутреннее трение жидкости, отражает энергию взаимодействия частиц и структурные превращения, которые происходят при

изменении концентрации и температуры раствора [5]. Известно [6], что величина динамической вязкости может быть чувствительна к осуществлению тонких изменений надмолекулярной структуры, которые зачастую оказываются недоступными для изучения с помощью других экспериментальных методов. Для большинства исследованных образцов на измеренных кривых течения (зависимостях вязкости от напряжения сдвига) наблюдался более или менее заметный спад (т. е. неньютоновское поведение), указывающий на присутствие некоторых протяженных молекулярных структур, разрушаемых при увеличении механической нагрузки.

Использовали основной графический метод анализа неньютоновского потока – график вязкости в зависимости от скорости сдвига (рис. 3). Наклон линии показывает степень неньютоновской характеристики потока, а тангенс наклона к оси x используется как эмпирическая константа (степень псевдопластичности).

При проведении визкозиметрического эксперимента было обнаружено:

- по сравнению с чистым пластичным смазочным материалом наличие мезогенных добавок приводит к понижению кривой (снижению вязкости);
- угол наклона кривой при этом увеличивается, что свидетельствует об усилении эффекта псевдопластичности, что, по нашему мнению, ведет к улучшению трибологических свойств смазочных композиций;

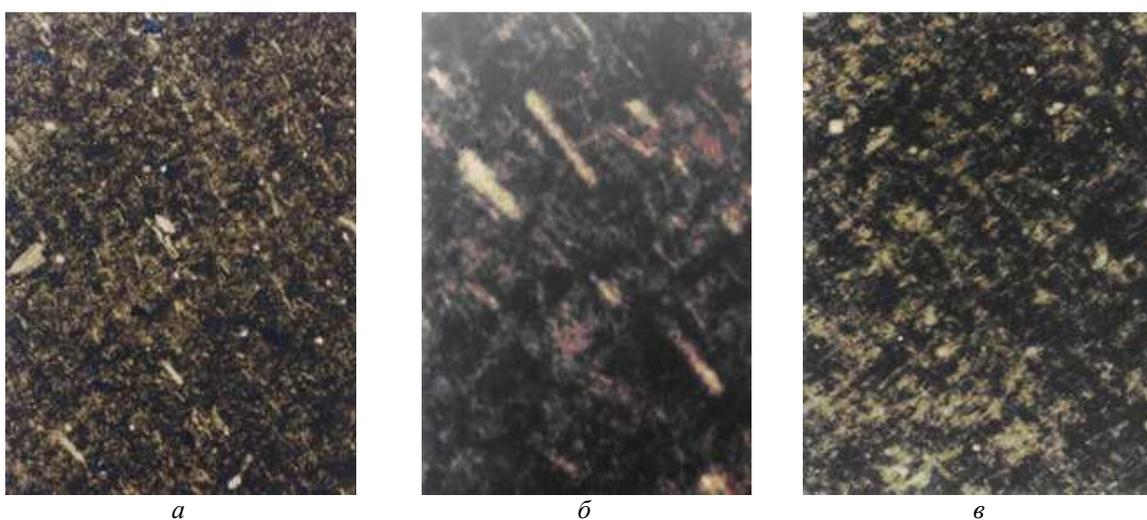


Рис. 1. Микрофотографии текстур пластичных смазок без добавок, $T = 23$ °С, николи скрещены, $\times 100$: *a* – Литол-24; *б* – Солидол; *в* – ЦИАТИМ-201

- физико-химический механизм действия присадок обусловлен ориентацией молекул в направлении приложенного силового поля, и это, в свою очередь, приводит к перераспределению нагрузок с контактирующих поверхностей вглубь смазочной композиции;

- добавка Фц-соединений ведет к уменьшению вязкости, поскольку молекулы внедряются в каркас пластичного смазочного материала и разупорядочивают его; в свою очередь, увеличение напряжения и скорости сдвига также уменьшает значение вязкости, что, по нашему мнению, улучшает проникновение смазочной композиции в зону контакта согласно модели микрокапиллярного проникновения смазочной среды;

- при трении в режиме гидродинамической смазки коэффициент трения определяется вязкостью, поскольку он отражает сдвиговое напряжение. Область неньютоновского состояния соответствует наибольшей трибологической эффективности для режима гидродинамического трения.

ИСПЫТАНИЯ СОТС НА ОПЕРАЦИИ СВЕРЛЕНИЯ

Сверление отверстий осуществляли сверлами диаметром $d = 4,2$ мм на глубину $l = 8$ мм, при подаче $S = 0,08$ мм/об. Исследовались смазочные композиции на основе Литол-24, Солидол, ЦИАТИМ-201 с гетероциклическими присадками, а также с коллоидным графитом. Испытания проводились на динамометрическом стенде. В ходе эксперимента измеряли интегральную работу резания, произведенную крутящим моментом в течение всей обработки отверстия. По результатам исследований были построены зависимости величины коэффициента эффективности присадки $k_{эф-1}$ от концентрации присадки в составе смазочной композиции:

$$k_{эф-1} = \frac{W_0 - W}{W_0},$$

где W_0 – работа резания при сверлении с базовым СОТС без присадки, W – работа резания при добавлении в ПСМ гетероциклических соединений.

На основе анализа полученных зависимостей для СК на основе базового пластичного смазочного материала (ПСМ) Литол-24 можно сделать предположение о хорошей проникающей способности частиц твердой фазы (присадок) ПСМ в зону сверления через сеть межповерхностных капилляров, что способствует ре-

лизации данными присадками в зоне сверления механизма смазочного действия.

Выявлено, что практически для всех присадок, независимо от их химического строения, повышение скорости резания оказывает положительный эффект на снижение работы резания. Поскольку реальная температура в зоне сверления заведомо превышает температуру коллоидной устойчивости базового ПСМ, следует считать, что достигаемая эффективность определяется в основном составом и концентрацией добавки.

Результаты испытания (рис. 4) показали, что эффективность смазочной композиции зависит не только от типа добавки, но и от природы базового ПСМ: от типа загустителя, вводимого в масляную основу СОТС. ЦИАТИМ-201 оказался наиболее удачным для применения в качестве основы СОТС для сверления, так как смазочные композиции на его основе дают более высокую эффективность и большее число из испытанных добавок проявляют в нем свой эффект, нежели в ПСМ Литол-24, и тем более – Солидоле. Исследования реологических свойств СК также дает право полагать, что наиболее эффективной базовой основой является ЦИАТИМ-201 с присадками Фц-соединений, которые показали значительное снижение вязкости и переход к псевдопластическому течению.

ВЫВОДЫ

Наблюдавшиеся значительные вариации вязкостей указывают на осуществление существенных изменений молекулярных структур исследованных систем. Эти структурные изменения можно связать с конкретными физико-химическими процессами с участием молекул Фц-соединений.

Структурные преобразования агрегатов Фц-соединений могут осуществляться, если происходит «десорбция» молекул присадки с поверхности. Основываясь на имеющихся экспериментальных и теоретических сведениях, мы предполагаем, что основной причиной наблюдавшихся аномалий является структурный фазовый переход в молекулярной подсистеме.

Один из механизмов – фазовый переход первого рода между плотноупакованной и слабо связанной структурами адсорбированного слоя молекул. Второй из возможных иницирующих механизмов – изменение поверхностной энергии столбчатых π -агрегатов Фц-соединений в результате фазового перехода в их внутримолекулярной структуре.

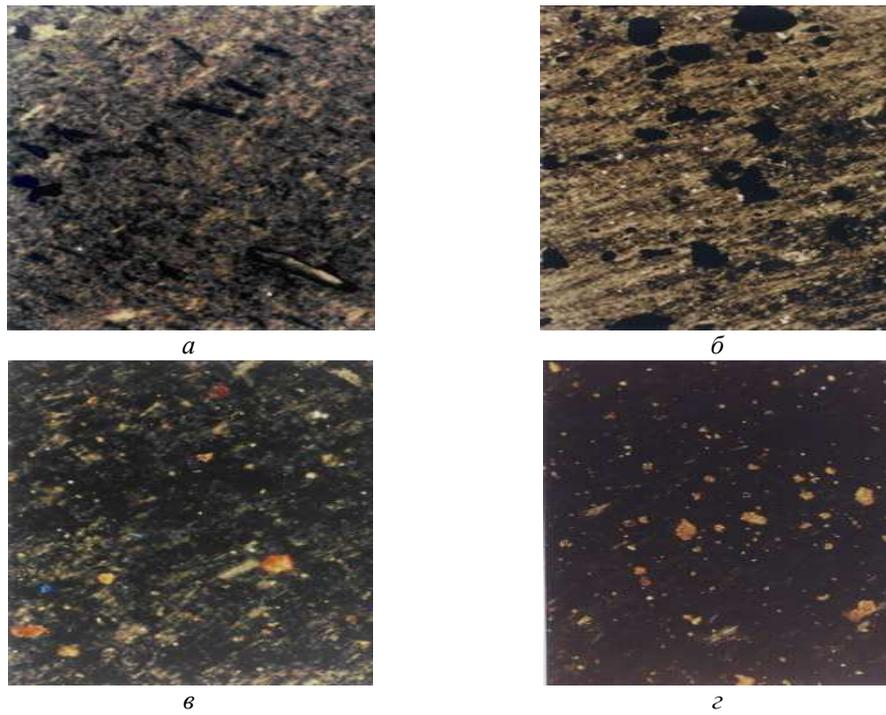


Рис. 2. Микрофотографии текстур пластичных смазок с добавками, $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, николи скрещены, $\times 100$: а – Литол-24 + графит; б – ЦИАТИМ-201 + графит; в – Литол-24 + КАЯ-3 4''Ж''Ш; г – Литол-24 + КАЯ-Ж 5''З''

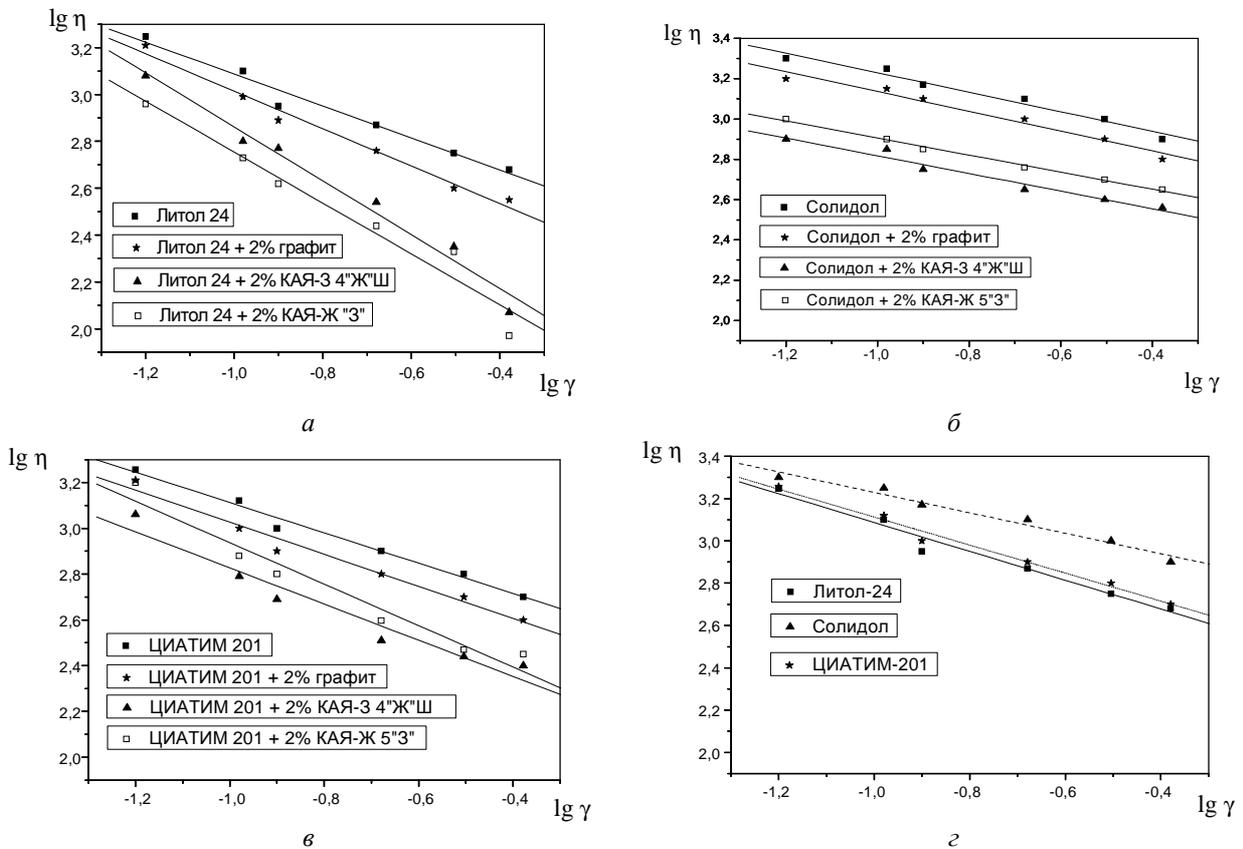


Рис. 3. Зависимость вязкости ПСМ от скорости сдвига при использовании различных присадок: а – Литол-24; б – Солидол; в – ЦИАТИМ-201; г – сравнение базовых ПСМ

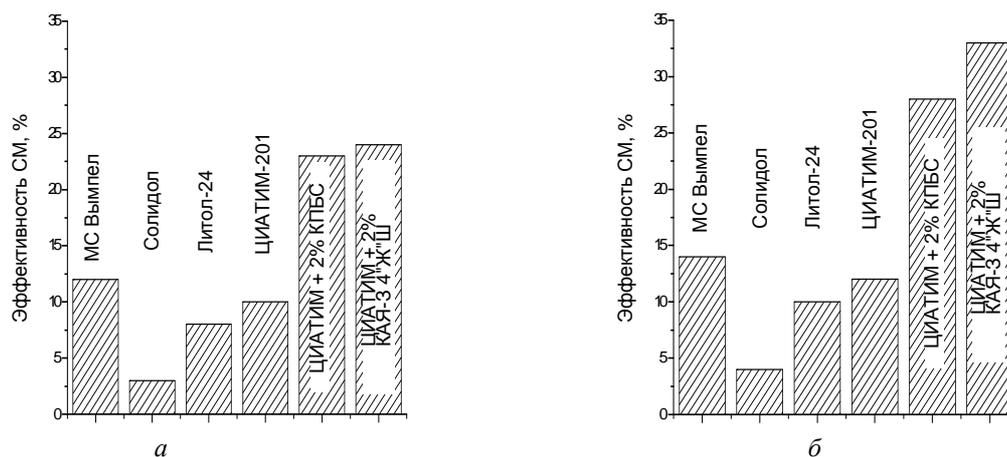


Рис. 4. Зависимости эффективности СК по сравнению с сухим сверлением при различных скоростях: $a - 0,026$ м/с; $b - 0,155$ м/с

Все еще остаются не выясненными конкретные механизмы взаимодействия Фц-соединений в исследуемых системах, однако, в качестве наиболее вероятной можно рассмотреть ассоциацию путем образования π - π комплексов с переносом заряда [7]. При помощи этих нековалентных взаимодействий молекулы добавки могут влиять на внутреннюю структуру граничного смазочного слоя. Ориентационные явления, происходящие в смазочном слое, приводят к значительному снижению граничной вязкости. Ориентированные структуры обладают меньшим сопротивлением течению, чем молекулы пластичных смазок, что выражается в снижении вязкости (при определенных концентрациях добавки). Испытания показали (рис. 4), что наиболее эффективным составом для выбранных условий практически не наблюдается. Это может означать, что температурный предел разрушения ПСМ не достигается в исследованном диапазоне скорости резания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березина Е. В., Годлевский В. А., Усольцева Н. В. Явления надмолекулярной организации в граничном смазочном слое // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2007. № 4. С. 30–36.
2. Godlevskiy V. A., Latyshev V. N., Molodsov A. M. Application of «Once only» lubricants in machining // Tribologia. 1996. № 6. P. 693–699.
3. Astakhov V. P. Metal cutting theory foundations of near-dry (mq1) machining // Int. J. Machining and Machinability of Materials. 2010. V. 7. № 1/2. P. 3–16.

4. Проникающая способность СОТС как фактор эффективности процесса обработки резанием / В. А. Годлевский [и др.] // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 5. С. 938–949.

5. Speight J. G. Complex Greases // J. Petrol Sci. Eng. 1999. № 22. P. 3–15.

6. Эрден-Груз Т. Явления переноса в водных растворах. М.: Мир, 1976. 596 с.

7. Евдокимов И. Н., Елисеев Н. Ю. Особенности вязкого течения жидких углеводородных сред с повышенным содержанием смолисто-асфальтовых веществ // Химия и технология топлив и масел. 1999. № 6. С. 32–34.

ОБ АВТОРАХ

Березина Елена Владимировна, д-р техн. наук, проф. каф. общей физики и методики преподавания Ивановск. гос. ун-та. Иссл. в обл. трибологии мезогенных смазочных материалов для узлов трения и процессов обработки металлов.

Богомолов Михаил Валентинович, канд. техн. наук, нач. каф. пожарной техники Ивановск. ин-та гос. противопожарн. службы МЧС РФ. Иссл. в обл. долговечности и надежности пожарной техники.

Годлевский Владимир Александрович, д-р техн. наук, проф. каф. экспериментальной и технической физики Ивановск. гос. ун-та. Иссл. в обл. трибологии резания.

Фомичев Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, ст. преп. каф. высшей математики и информатики того же ин-та. Иссл. в обл. физикохимии смазочного действия присадок.