

Для цитирования:

Мурашова Н.М., Дамбиева А.А., Юртов Е.В. Влияние нано- и микрочастиц оксида железа (III) на вязкость ламеллярных жидких кристаллов лецитина. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 5. С. 41-46.

For citation:

Murashova N.M., Dambieva A.A., Yurtov E.V. Effect of nano- and microparticles of iron (III) oxide on viscosity of lamellar liquid crystals of lecithin. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 5. P. 41-46.

УДК 544.77: 532.783

Н.М. Мурашова, А.А. Дамбиева, Е.В. Юртов

Наталья Михайловна Мурашова (✉), Аюна Александровна Дамбиева, Евгений Васильевич Юртов
Кафедра наноматериалов и нанотехнологии, Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева, Миусская пл., 9, Москва, Российская Федерация, 125047
E-mail: namur_home@mail.ru (✉), ailinfelton@mail.ru, nanomaterial@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ НАНО- И МИКРОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА (III) НА ВЯЗКОСТЬ
ЛАМЕЛЛЯРНЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ ЛЕЦИТИНА**

Показано, что введение низких концентраций (0,001-0,1 мас. %) наночастиц оксида железа (III) диаметром 10-20 нм приводит к повышению вязкости ламеллярных жидких кристаллов в системах лецитин – вода и лецитин – додекан – вода на 35-60% и 15-20% соответственно, в то время как введение микрочастиц размером 1-5 мкм не влияет на вязкость образцов. При повышении концентрации наночастиц от 0,001 до 0,1 мас. % наблюдалось возрастание вязкости жидких кристаллов. Предполагается, что наночастицы играют роль «мостиков» между бислоями в ламеллярном жидком кристалле.

Ключевые слова: ламеллярные жидкие кристаллы, лецитин, наночастицы оксида железа, вязкость

N.M. Murashova, A.A. Dambieva, E.V. Yurtov

Nataliya M. Murashova (✉), Ayuna A. Dambieva, Evgeniy V. Yurtov
Department of Nanomaterial and Nanotechnology, D. Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia, Miusskaya sq., 9, Moscow, 125047, Russia
E-mail: namur_home@mail.ru (✉), ailinfelton@mail.ru, nanomaterial@mail.ru

**EFFECT OF NANO- AND MICROPARTICLES OF IRON (III) OXIDE ON VISCOSITY
OF LAMELLAR LIQUID CRYSTALS OF LECITHIN**

The addition of low concentrations (0.001 – 0.1 wt. %) of iron (III) oxide nanoparticles with diameter of 10-20 nm was shown to result in the increase in a viscosity of lamellar liquid crystals in the systems of lecithin – water and lecithin – dodecane – water by 35-60% and 15-20%, respectively, whereas the addition of 1-5 μm microparticles does not affect the viscosity. An increase in a viscosity of the liquid crystals with the growth of the nanoparticles concentration from 0.001 to 0.1 wt. % is observed. It is assumed that the nanoparticles act as "bridges" between the bilayers of the lamellar liquid crystal.

Key words: lamellar liquid crystals, lecithin, iron oxide nanoparticles, viscosity

ВВЕДЕНИЕ

Самоорганизующиеся наноструктуры, образованные лецитином и другими фосфолипидами – органогели, микроэмульсии и лиотропные жидкие кристаллы, могут использоваться в качестве носителей для трансдермальной доставки лекарственных веществ, наряду с широко известными липосомами.

Лиотропные жидкие кристаллы лецитина существуют в бинарных системах лецитин – полярный растворитель и в тройных системах лецитин – вода – масло в области высоких концентраций фосфолипида и средних концентраций воды и масла. Среди жидкокристаллических фаз в системах лецитин – вода и лецитин – вода – масло при невысоких температурах преобладает ламеллярная фаза (L_a); повышение температуры, увеличение числа ненасыщенных углеводородных «хвостов» в молекуле лецитина или введение в систему короткоцепочечных алканов способствует появлению обратной гексагональной фазы (H_{II}) [1-3]. Жидкие кристаллы обладают высокой вязкостью, в десятки и сотни Па·с, что замедляет процесс диффузии из них веществ и позволяет создавать лекарственные препараты пролонгированного действия. Например, в качестве основы для медицинских и косметических средств предлагались ламеллярные жидкие кристаллы в системе лецитин – вазелиновое масло – вода [4].

Известно, что введение неорганических наночастиц в ламеллярные жидкие кристаллы с целью создания гибридного функционального наноматериала приводит к изменению как свойств введенных частиц (например, оптических), так и свойств всего материала [5]. Влияние неорганических наночастиц на вязкость ламеллярных жидких кристаллов практически не изучено, имеются только фрагментарные сведения. Показано, что вязкость жидких кристаллов в системе соевый фосфолипидный концентрат – вазелиновое масло – вода возрастает при введении наночастиц серебра размером 6-10 нм в чрезвычайно низкой концентрации 3·10⁻⁴ мас. % [4]. Введение наночастиц H₃PW₁₂O₄₀ диаметром примерно 1 нм в концентрации 1-4 % об. в ламеллярные жидкие кристаллы в системе неионогенное ПАВ Brij 30 – вода приводило к снижению вязкости [6].

Цель данной работы – сравнить влияние неорганических частиц микронного и нанометрового размера на динамическую вязкость лиотропных жидких кристаллов лецитина. В качестве неорганических частиц были использованы микро- и наночастицы Fe₂O₃, методика получения которых

хорошо отработана [7, 8]. Отметим, что наночастицы оксидов железа, в том числе и оксида железа (III), являются перспективными для применения в медицине в качестве носителей лекарственных веществ [9].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения образцов жидких кристаллов использовали соевый лецитин «Lipoid S100» (содержание лецитина 96,3 мас. %) и «Lipoid PPL 400» (содержание лецитина 76 мас. %) производства «Lipoid GmbH» (Германия), а также яичный лецитин (содержание лецитина 60 мас. %) «Fluka» (Германия). Додекан производства «Компонент-реактив» (Россия) был квалификации «эталонный» и использовался без дальнейшей очистки. Дистиллированная вода была получена по стандартной методике. Для синтеза наночастиц γ-Fe₂O₃ использовали FeSO₄·7H₂O и FeCl₃·6H₂O квалификации «ч», «ЛабТех» (Россия) и 25 %-ный водный раствор аммиака «осч» «Сигма Тек» (Россия). Для получения микрочастиц использовали порошок α-Fe₂O₃ квалификации «ч» «Компонент-реактив» (Россия).

Наночастицы оксида железа (III) получали модифицированным методом соосаждения из водных растворов солей железа (II) и (III) в щелочной среде при воздействии ультразвука [7, 8]. К водному раствору FeCl₂ и FeCl₃ с мольным соотношением Fe(II)/Fe(III) 1:2 при воздействии ультразвука с мощностью 50 Вт (ультразвуковой гомогенизатор УЗГ 13 – 0,1/22) приливали водный раствор NH₄OH (pH≈10÷11). После окончания ультразвукового воздействия частицы оксида железа оседали, полученный осадок промывали дистиллированной водой до нейтральных значений pH. По данным просвечивающей электронной микроскопии, проведенной с помощью микроскопа JEOL JEM-1011 (Япония) при ускоряющем напряжении 80 кВ, размер полученных частиц составлял 10-20 нм. Согласно данным рентгенофазового анализа и мессбауэровской спектроскопии, полученные таким методом частицы являются частицами γ-Fe₂O₃ и проявляют суперпарамагнитные свойства [7]. К влажному осадку добавляли необходимое количество дистиллированной воды и подвергали воздействию ультразвука (50 Вт) в течение 20 мин. Содержание Fe₂O₃ в полученной суспензии составляло 3,2 г/л. Суспензию добавляли в образцы жидких кристаллов сразу после ультразвукового перемешивания.

Для получения суспензии, содержащей микрочастицы Fe₂O₃, порошок оксида железа III растирали в ступке, затем просеивали через сито

(размер ячейки 160 мкм). Навеску просеянного порошка помещали в стакан, добавляли необходимое количество дистиллированной воды и механически перемешивали с помощью магнитной мешалки IKA RCT basic (Германия) со скоростью 500 об/мин в течение 15 мин до однородного распределения частиц в объеме воды. Содержание Fe_2O_3 в полученной суспензии составляло 3,3 г/л. Размер основного количества частиц (более 90%) по данным оптической микроскопии составлял 1-5 мкм. Суспензию добавляли в образцы жидких кристаллов сразу после перемешивания.

Для получения образцов жидких кристаллов в навеску лецитина добавляли необходимое количество воды или водной суспензии микроили наночастиц Fe_2O_3 и, при необходимости, нужное количество додекана. Образец перемешивали при комнатной температуре с помощью стеклянной палочки до гомогенного состояния. Для достижения равновесия образец выдерживали при комнатной температуре в течение суток. Однородность образца и наличие ламеллярной жидкокристаллической структуры контролировали при помощи поляризационного оптического микроскопа «Axiostar plus» (Zeiss, Германия) с цифровой фотокамерой «Canon».

Измерение динамической вязкости образцов проводили с использованием ротационного вискозиметра Rheotest 2 (Германия) при $25,0 \pm 0,5$ °C с помощью измерительной системы «конус-пластина» в диапазоне скоростей сдвига от 5,56 до 540 с^{-1} . Образцы перед каждым измерением выдерживали при заданной температуре в течение 30 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В работе исследовалось влияние низких (0,1-0,001 мас. %) концентраций наночастиц оксида железа (III) на вязкость ламеллярных жидких кристаллов. Такие концентрации недостаточны для формирования наноконпозиционных материалов, где содержание наночастиц в жидкокристаллической матрице составляет величины от единиц до десятков мас. % [10]. Однако даже незначительное (сотые и тысячные доли мас. %) содержание наночастиц может влиять на реологические свойства жидких кристаллов. Например, введение 0,005-0,02 мас. % наночастиц шунгитного углерода в смектическую и хиральную нематическую фазу тридецилата холестерина влияет на их вязкость, модуль накопления и модуль потерь [11].

Было изучено влияние наночастиц и, для сравнения, микрочастиц Fe_2O_3 на вязкость жидких кристаллов в бинарной системе «лецитин – вода». Чтобы исключить влияние состава лецитина, который не является индивидуальным веществом,

образцы жидких кристаллов получали на основе лецитина, выделенного из различных источников и с разным содержанием основного вещества: соевого лецитина «Lipoid S100» (96,3 мас. %), соевого лецитина «Lipoid PPL 400» (76 мас. %) и яичного лецитина «Fluka» (60 мас. %). Все образцы содержали одинаковое количество воды – 15 % масс. Концентрация Fe_2O_3 в образцах составляла 0,1 % масс., контрольный образец оксида железа не содержал. Согласно результатам оптической поляризационной микроскопии, все полученные образцы имели ламеллярную жидкокристаллическую структуру.

На рис. 1 показаны кривые течения для трех серий образцов, полученных на основе соевого лецитина «Lipoid S100» (рис. 1а), соевого лецитина «Lipoid PPL 400» (рис. 1б) и яичного лецитина «Fluka» (рис. 1в). Для того чтобы лучше продемонстрировать различие в вязкости образцов, на рис. 1 представлены зависимости значений вязкости в натуральных координатах от значений скорости сдвига в логарифмических координатах.

Все исследованные образцы по характеру течения являются неньютоновскими псевдопластическими жидкостями – вязкость существенно уменьшается с увеличением скорости сдвига. Для всех серий образцов наблюдается одинаковая закономерность: при низких скоростях сдвига вязкость жидких кристаллов с наночастицами Fe_2O_3 выше, чем вязкость контрольного образца и образца с микрочастицами. Например, при скорости сдвига $5,56 \text{ с}^{-1}$ вязкость образца с наночастицами возросла по сравнению с контрольным образцом: для соевого лецитина «Lipoid S100» – на 38%; для соевого лецитина «Lipoid PPL 400» – на 60%; для яичного лецитина «Fluka» – на 37%. При высоких скоростях сдвига различия в вязкости контрольного образца и образцов с нано- и микрочастицами пропадают.

Влияние концентрации наночастиц Fe_2O_3 на вязкость жидких кристаллов в системе лецитин – вода было исследовано на примере образцов на основе яичного лецитина «Fluka». Концентрация Fe_2O_3 в образцах изменялась от 0,001 до 0,1 мас. %; при более высокой концентрации происходила агрегация наночастиц и выпадение осадка твердой фазы. При низких скоростях сдвига наблюдается повышение вязкости с ростом концентрации наночастиц в образце, в то время как при высоких скоростях сдвига разница в вязкости образцов была незначительной. На рис. 2 представлена зависимость вязкости жидких кристаллов от концентрации наночастиц оксида железа (III) при низкой и высокой скорости сдвига.

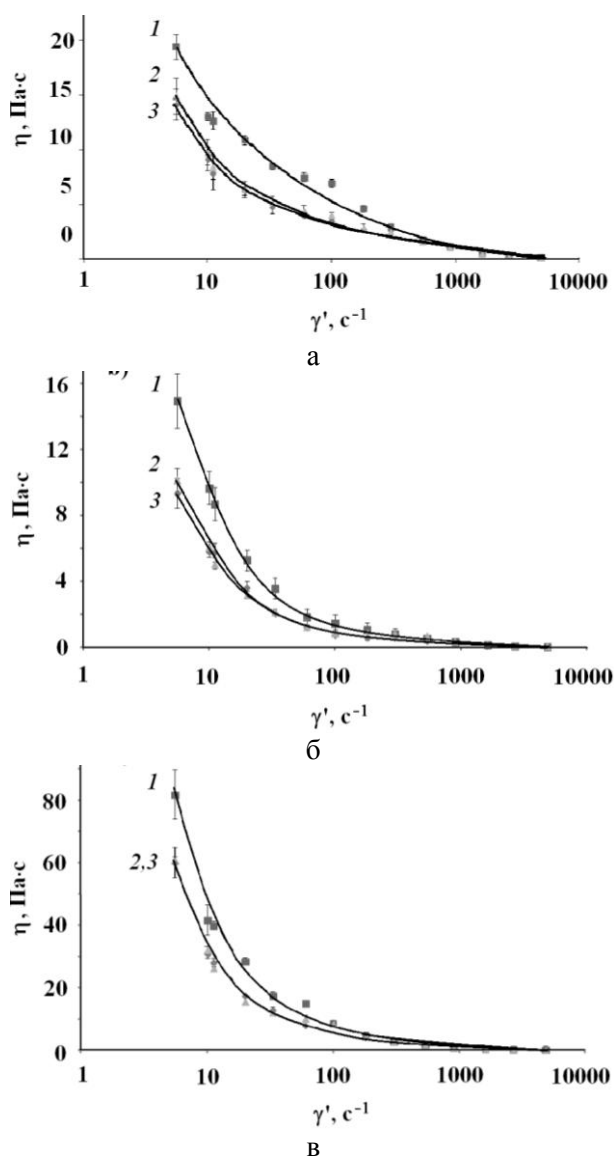


Рис. 1. Зависимость динамической вязкости (η) от скорости сдвига (γ') для образцов жидких кристаллов на основе: а – соевого лецитина «Lipoid S100»; б – соевого лецитина «Lipoid PPL 400»; в – яичного лецитина «Fluka». Образцы содержат: 1 - наночастицы Fe_2O_3 ; 2 - микрочастицы Fe_2O_3 ; 3 - контроль (не содержит Fe_2O_3)

Fig. 1. Dynamic viscosity (η) versus shear rate (γ') for the samples of liquid crystals on the bases of: а – soybean lecithin «Lipoid S100»; б – soybean lecithin «Lipoid PPL 400»; в – egg lecithin «Fluka». The samples contain: 1 - Fe_2O_3 nanoparticles; 2 - Fe_2O_3 microparticles; 3 – control sample (no Fe_2O_3)

Отметим, что даже при концентрации наночастиц 0,001 мас. % наблюдалось заметное повышение вязкости по сравнению с контрольным образцом. При дальнейшем повышении концентрации наночастиц в 10 и в 100 раз рост вязкости замедлялся. Этот эффект можно объяснить агрегацией части введенных наночастиц при увеличении их концентрации в образце. Таким образом, для повышения вязкости жидкого кристалла достаточно присутствия наночастиц в чрезвычайно низких концентрациях – порядка 10^{-3} мас. %. Этот

результат согласуется с описанным ранее повышением вязкости ламеллярных жидких кристаллов в системе соевый фосфолипидный концентрат – вазелиновое масло – вода при введении наночастиц серебра в концентрации примерно $3 \cdot 10^{-4}$ мас. % [4].

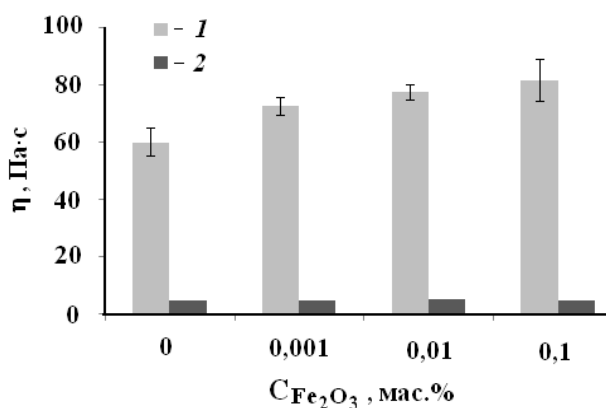


Рис. 2. Влияние концентрации наночастиц Fe_2O_3 на вязкость жидких кристаллов в системе яичный лецитин «Fluka» – вода при скоростях сдвига: 1 - $5,56 \text{ c}^{-1}$; 2- 180 c^{-1}
Fig. 2. Effect of concentration of Fe_2O_3 nanoparticles on viscosity of liquid crystals in the system egg lecithin «Fluka» - water at shear rate: 1 – 5.56 s^{-1} ; 2- 180 s^{-1}

Было изучено влияние нано- и микрочастиц Fe_2O_3 на вязкость жидких кристаллов в тройной системе лецитин – додекан – вода. В качестве источника лецитина использовался яичный лецитин «Fluka». Образцы содержали 85 мас. % фосфолипидов (что соответствует 51 мас. % лецитина), 7,5 мас. % додекана и 7,5 мас. % воды. Концентрация Fe_2O_3 в виде микро- и наночастиц в соответствующих образцах была 0,05 % масс.; при более высокой концентрации наблюдалась агрегация частиц и выпадение осадка твердой фазы. Согласно данным поляризационной оптической микроскопии, изученные образцы имели ламеллярную жидкокристаллическую структуру. Кривые течения образцов представлены на рис. 3.

Полученные результаты аналогичны показанным ранее для бинарной системы лецитин – вода: при низких скоростях сдвига вязкость жидких кристаллов с наночастицами выше, чем вязкость контрольного образца и образца с микрочастицами. В исследованной тройной системе наблюдается менее выраженное, по сравнению с бинарной системой, влияние наночастиц на вязкость жидких кристаллов. Например, в тройной системе при скорости сдвига 10 c^{-1} вязкость образца, содержащего наночастицы в концентрации 0,05 мас. %, выросла на 15% по сравнению с контрольным образцом; при такой же скорости сдвига в бинарной системе с концентрацией наночастиц Fe_2O_3 0,01 мас. % вязкость увеличилась на 43%.

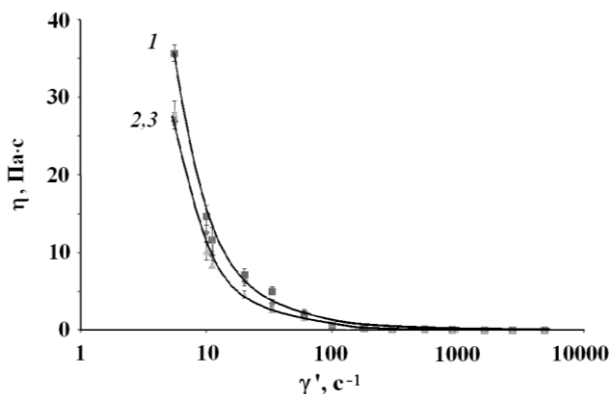


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости (η) от скорости сдвига (γ') для образцов жидких кристаллов в системе яичный лецитин «Fluka» – додекан - вода. Образцы содержат: 1 - наночастицы Fe_2O_3 ; 2 - микрочастицы Fe_2O_3 ; 3 - контроль (не содержит Fe_2O_3).

Fig. 3. Dynamic viscosity (η) versus shear rate (γ') for the samples of liquid crystals in the system egg lecithin «Fluka» - dodecane – water. The samples contain: 1 - Fe_2O_3 nanoparticles; 2 - Fe_2O_3 microparticles; 3 – control sample (no Fe_2O_3)

Влияние наночастиц на вязкость ламеллярных жидких кристаллов можно объяснить следующим образом. Толщина липидного бислоя в ламеллярном жидком кристалле в системе лецитин – вода составляет примерно 3,5 нм, толщина полярной прослойки (вода и полярные «головы» молекул лецитина) между бислоями – от 1,5 до 3,5 нм [12]. Размер введенных наночастиц (10-20 нм) в несколько раз больше, чем расстояние между слоями ПАВ в структуре жидкого кристалла лецитина. Наночастицы, окруженные адсорбированными на них в виде бислоя молекулами лецитина, будут находиться между несколькими бислоями жидкого кристалла, играя роль «мостиков», укрепляющих пространственную структуру (рис. 4).

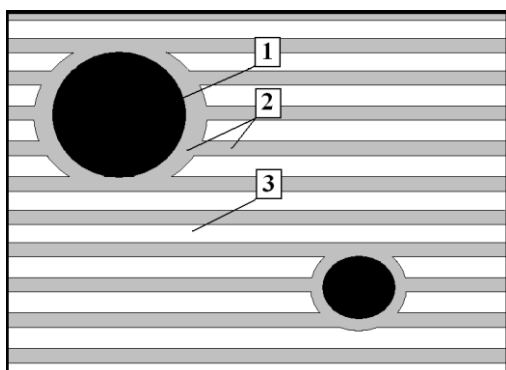


Рис. 4. Схема встраивания наночастиц в структуру ламеллярного жидкого кристалла. 1 – наночастица; 2 – липидный бислой; 3 – вода и полярные «головы» молекул лецитина
Fig. 4. Scheme of embedding of nanoparticles in the structure of lamellar liquid crystal. 1- nanoparticle; 2 – lipid bilayer; 3 – water and polar «heads» of lecithin molecules

Такая схема (рис. 4) позволяет объяснить наблюдаемое повышение вязкости образцов ламеллярных жидких кристаллов лецитина при вве-

дении ничтожно малых (сотые и тысячные доли мас. %) количеств неорганических наночастиц. Если размер наночастиц сопоставим с расстоянием между бислоями ПАВ или в несколько раз превышает это расстояние, можно ожидать повышения вязкости ламеллярных жидких кристаллов. Вязкость будет повышаться тем сильнее, чем меньше размер частиц и, соответственно, больше их количество (при одинаковой массовой концентрации вещества). Например, вязкость ламеллярных жидких кристаллов в системе соевый фосфолипидный концентрат – вазелиновое масло – вода при введении $3 \cdot 10^{-4}$ мас. % наночастиц серебра размером 6-10 нм при низких скоростях сдвига возрастала в 2 раза [4], а в исследованной системе лецитин – додекан – вода при введении $5 \cdot 10^{-3}$ мас. % наночастиц Fe_2O_3 размером 10-20 нм наблюдался рост вязкости всего на 15-20%. Если размер наночастиц существенно меньше, чем расстояние между бислоями ПАВ, то они не смогут формировать «мостики» между несколькими бислоями и повышать вязкость ламеллярных жидких кристаллов, как это описано для системы Brij 30 – вода с наночастицами $\text{H}_3\text{PW}_{12}\text{O}_{40}$ диаметром 1 нм при расстоянии между бислоями порядка 10 нм [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние низких концентраций (0,001-0,1 мас. %) наночастиц оксида железа (III) диаметром 10-20 нм и микрочастиц диаметром 1-5 мкм на вязкость ламеллярных жидких кристаллов лецитина. В бинарной системе лецитин – вода при низких скоростях сдвига вязкость жидких кристаллов, содержащих 0,1 мас. % наночастиц Fe_2O_3 , была на 35-60% выше, чем вязкость контрольного образца и образца с микрочастицами. Этот результат воспроизводится для жидких кристаллов на основе лецитина, полученного из различных источников (соевого и яичного) и с разным содержанием основного вещества (от 60 до 96,3 мас. %). В диапазоне концентраций от 0,001 до 0,1 мас. % наблюдалось возрастание вязкости образцов при повышении концентрации наночастиц. Аналогичные результаты получены для тройной системы лецитин – додекан – вода: при низких скоростях сдвига вязкость жидких кристаллов, содержащих 0,05 мас. % наночастиц, была на 15-20 % выше, чем вязкость контрольного образца и образца с микрочастицами.

В качестве объяснения можно предположить, что наночастицы, покрытые за счет адсорбции бислоем молекул лецитина, встраиваются в пространственную структуру жидких кристаллов, играя роль «мостиков» между бислоями. Полученные результаты помогут лучше понять зако-

номерности влияния наночастиц на свойства ламеллярных жидких кристаллов, в том числе на их вязкость. Это поможет в создании новых наноструктурных органо-неорганических гибридных

материалов на основе самоорганизующихся систем, образованных поверхностно-активными веществами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Seddon J.M., Templer R.H.** // In Handbook of Biological Physics. Vol. 1. Edited. By Lipowsky R. and Sackmann E. Elsevier Science B.V. 1995. P.97-160.
2. **Щипунов Ю.А.** // Усп. химии. 1997. Т. 66. № 4. С. 328-352.
3. **Angelico R., Ceglie A., Colafemmina G., Delfino F., Olsson U., Palazzo G.** // Langmuir. 2004. V. 20. N 3. P. 619-631.
4. **Мурашова Н.М., Юртов Е.В., Кузнецова Е.А.** // Хим. технология. 2013. № 8. С. 492-498.
5. **Constantin D., Davidson P.** // Chem.Phys.Chem. 2014. V. 15. P. 1270-1282.
6. **de Silva J.P., Poulos A.S., Pansu B.** // Eur. Phys. J. E. 2011. V. 34. P. 4.
7. **Lukashova N.V., Savchenko A.G., Yagodkin Yu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V.** // J. Alloys and Compounds. 2014. V. 586. Suppl. 1. P. S298-S300.
8. **Лукашова Н.В., Савченко А.Г., Ягодкин Ю.Д., Мурадова А.Г., Юртов Е.В.** // Металловедение и термич. обработка металлов. 2012. № 10. С.60-64.
9. **Morteza M., Shilpa S., Wang B., Laurent S., Sen T.** // J. Advanced Drug Delivery Reviews. 2011. V. 63. N 1-2. P. 24-46.
10. **Шаталова А.М., Шандрюк Г.А., Мерекалов А.С., Отмахова О.А., Тальрозе Р.В.** // Жидк. кристаллы и их практич. использ. 2015. Т. 15. № 3. С. 41-51.
11. **Usol'tseva N. V., Smirnova M.V., Kazak A.V., Smirnova A.I., Bumbina N.V., Ilyin S.O., Rozhkova N.N.** // J. Friction and Wear. 2015. V. 36. N 5. P. 380-385.
12. **Small D.M.** // J. Lipid Research. 1967. V. 8. N 6. P. 551-557.

REFERENCES

1. **Seddon J.M., Templer R.H.** // In Handbook of Biological Physics. V. 1. Edited. By Lipowsky R. and Sackmann E. Elsevier Science B.V. 1995. P. 97-160.
2. **Shchipunov Yu.A.** // Russ. Chem. Rev. 1997. V. 66. N 4. P. 301-322.
3. **Angelico R., Ceglie A., Colafemmina G., Delfino F., Olsson U., Palazzo G.** // Langmuir. 2004. V. 20. N 3. P. 619-631.
4. **Murashova N.M., Yurtov E.V., Kuznetzova E.A.** // Khimicheskaya Tekhnologiya. 2013. N 8. P. 492-498 (in Russian).
5. **Constantin D., Davidson P.** // Chem.Phys.Chem. 2014. V. 15. P. 1270-1282.
6. **de Silva J.P., Poulos A.S., Pansu B.** // Eur. Phys. J. E. 2011. V. 34. P. 4.
7. **Lukashova N.V., Savchenko A.G., Yagodkin Yu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V.** // J. Alloys and Compounds. 2014. V. 586. Suppl. 1. P. S298-S300.
8. **Lukashova N.V., Savchenko A.G., Yagodkin Yu.D., Muradova A.G., Yurtov E.V.** // Metal Science and Heat Treatment. 2013. V. 54. N 9-10. P. 550-554.
9. **Morteza M., Shilpa S., Wang B., Laurent S., Sen T.** // J. Advanced Drug Delivery Reviews. 2011. V. 63. N 1-2. P. 24-46.
10. **Shatalova A.M., Shandryuk G.A., Merekalov A.S., Otmakhova O.A., Talroze R.V.** // Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie. 2015. V. 15. N 3. P. 41-51 (in Russian).
11. **Usol'tseva N. V., Smirnova M.V., Kazak A.V., Smirnova A.I., Bumbina N.V., Ilyin S.O., Rozhkova N.N.** // J. Friction and Wear. 2015. V. 36. N 5. P. 380-385.
12. **Small D.M.** // J. Lipid Research. 1967. V. 8. N 6. P. 551-557.

*Поступила в редакцию 09.02.2016
Принята к опубликованию 11.05.2016*

*Received 09.02.2016
Accepted 11.05.2016*