

А. И. Галеева, А. Э. Заворотько, Ю. Г. Галяметдинов

**ФАЗОВОЕ ПОВЕДЕНИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
НАДМОЛЕКУЛЯРНО-ОРГАНИЗОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ  
ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА С «ЖЁЛТЫМИ» УГЛЕРОДНЫМИ ТОЧКАМИ**

*Ключевые слова:* лиотропные жидкие кристаллы, фазовое поведение, углеродные точки, вязкость, реологическая модель.

*Самоорганизующиеся лиотропные жидкокристаллические матрицы перспективны для биомедицины как универсальные носители гидрофильных и гидрофобных субстратов. В последние годы интенсивно развиваются работы в направлении их функционализации различными допантами, в частности углеродными точками, обладающими люминесцентными свойствами, что позволяет создавать на их основе гибридные системы с биосенсорными свойствами для тераностики. Для практического применения таких систем в качестве платформ для тераностики необходимы сведения об условиях управления их фазовыми состояниями. В работе получены фазовые диаграммы полифункциональных гибридных систем на основе неионного поверхностно - активного вещества монододецилового эфира тетраэтиленгликоля, деканола и водного раствора, содержащего люминесцентные «жёлтые» углеродные точки. Установлены температурно - концентрационные параметры управления надмолекулярной структурой полученных гибридных сред. Исследована вязкость и реологические свойства гибридных сред в областях формирования лиомезофаз и гелей. Анализ реологических кривых показал, что вязкость лиотропных жидкокристаллических фаз в обоих типах систем — как гибридных с «жёлтыми» углеродными точками, так и базовых систем на основе олигоэтиленоксида — превышает вязкость соответствующих гелеобразных сред. Поведение гибридных систем  $C_{12}EO_4/(H_2O+yCD)/dec$  проанализирована в рамках микрореологических моделей Ньютона, Бингама, Оствальда, Кэссона и Гершеля - Балкли. Выявлено, что течение гибридных лиотропных жидких кристаллов подчиняется модели Кэссона, а гелеобразных систем — модели Оствальда. В работе показаны пути регулирования составом и вязкостными характеристиками таких систем, что открывает возможности для разработки эффективных наносистем доставки лекарственных препаратов и дальнейшего их применения в биовизуализации, тераностике и таргетирования различных биосубстратов.*

А. I. Galeeva, A. E. Zavorot'ko, Yu. G. Galyametdinov

**PHASE BEHAVIOR AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SUPRAMOLECULAR SYSTEMS BASED  
ON A SURFACTANT WITH "YELLOW" CARBON DOTS**

*Key words:* lyotropic liquid crystals, phase behavior, carbon dots, viscosity, rheological model.

*Self-organizing lyotropic liquid crystalline matrices are promising for biomedicine as universal carriers for hydrophilic and hydrophobic substrates. In recent years, research has been intensively developing towards their functionalization with various dopants, particularly carbon dots possessing luminescent properties, enabling the creation of hybrid systems with biosensory capabilities for theranostics. For practical application of such systems as theranostic platforms, knowledge of the conditions for controlling their phase states is necessary. The study presents phase diagrams of multifunctional hybrid systems based on the nonionic surfactant tetraethylene glycol monododecyl ether, decanol, and an aqueous solution containing luminescent "yellow" carbon dots. Temperature-concentration parameters for controlling the supramolecular structure of the obtained hybrid media were established. The viscosity and rheological properties of the hybrid media were investigated in the regions of lyomesophase and gel formation. Analysis of rheological curves revealed that the viscosity of lyotropic liquid crystalline phases in both types of systems—hybrid systems with "yellow" carbon dots and base oligoethylene oxide-based systems—exceeds the viscosity of the corresponding gel-like media. The flow behavior of the  $C_{12}EO_4/(H_2O+yCD)/dec$  hybrid systems was analyzed within the framework of the Newtonian, Bingham, Ostwald, Casson, and Herschel-Bulkley micro-rheological models. It was found that the flow of hybrid lyotropic liquid crystals follows the Casson model, while the gel-like systems conform to the Ostwald model. The work demonstrates approaches for regulating the composition and viscous characteristics of such systems, which opens possibilities for developing effective nanodrug delivery systems and their further application in bioimaging, theranostics, and targeting various biosubstrates.*

**Введение**

Существенным достижением наномедицины является реализация управляемого высвобождения лекарств в заданные участки организма. Для создания таких систем доставки используются органические и неорганические наноносители [1]. «Интеллектуальные» наноносители, высвобождающие препараты в ответ на внутренние (например, pH, окислительно-восстановительное состояние, активность ферментов) или внешние (например, свет, температура, магнитные поля)

раздражители открывают новые возможности для хронотерапии. В обзоре [2] обсуждаются основы циркадной фармакологии, клинические аспекты и перспективные хронозависимые наносистемы. Это представляет собой революционный подход к созданию персонализированной медицины, которая воздействует не только на нужное место, но и на нужное время.

Лиотропные жидкие кристаллы (ЛЖК) находят применение в качестве основы для разработки диагностико-терапевтических систем [3, 4]. В отличие от изотропных жидкостей, лиотропные

жидкие кристаллы (ЛЖК) и гели обладают микроскопической упорядоченностью, приводящей к анизотропии их физических свойств. Это явление представляет фундаментальный интерес и открывает перспективы для практических применений [5, 6]. Изучение материалов, образующих мезофазу, позволяет понять их отличительные физико-химические характеристики и возможности применения в доставке лекарств. В обзоре [7] подчеркивается важная роль лиотропных и термотропных жидких кристаллов в доставке лекарств и отмечается их значительный потенциал. терапии длительного действия, лечении инфекций и заживлении ран. Разнообразие вариантов состава систем на основе ЛЖК, включая гели, наночастицы и образующиеся *in situ* прекурсоры, позволяет использовать их различными способами, в том числе перорально, внутривенно, через кожу, в глаза и интраназально [8]. В работах [9-11] описано применение ЛЖК наноструктур как систем доставки лекарств, платформ для вакцин, биосенсоров в сфере диагностики и клинического применения. Благодаря оптическим свойствам двойного лучепреломления и высокой чувствительности к взаимодействию поверхности и границы раздела фаз биосенсоры на основе жидких кристаллов могут избежать недостатков традиционных биосенсоров, таких как сложность использования и необходимость маркировки биоматериалов [12].

Научный интерес вызывают надмолекулярные системы, содержащие люминесцентные углеродные точки (С-точки) размером менее 10 нм [13-15]. Эти наноматериалы обладают уникальным комплексом свойств: высокий квантовый выход, фотостабильность, низкая токсичность, биосовместимость и экономичность синтеза [16, 17]. Углеродные точки привлекают значительный интерес благодаря способности преодолевать гематоэнцефалический барьер [18]. Благодаря этому С-точки рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным полупроводниковым квантовым точкам [19-21] и находят применение в биовизуализации, электронике, катализе и тераностике [22-24]. Наиболее широко они используются в оптической визуализации для детекции ионов металлов, малых биомолекул и изменений pH среды за счет чувствительности их люминесценции к химическому окружению [25-27]. Углеродные точки рассматриваются как перспективные флуоресцентные метки для биоимиджинга, а также как компоненты гибридных систем для диагностики и визуализации, что обусловлено их хорошей растворимостью в водных средах и биосовместимостью.

Таким образом, разработка и исследование гибридных материалов на основе С-точек является актуальной задачей, направленной на создание новых функциональных систем с заданными свойствами [28].

Реологические свойства значительно различаются в зависимости от лиомезофаз и поэтому могут служить теоретическим обоснованием для идентификации фаз. Устойчивость системы к

сдвиговой деформации служит индикатором изменений в меж- и внутриагрегатных взаимодействиях, вызванных введением добавок. Реологические параметры, измеренные в режиме сдвига, позволяют прогнозировать наноструктурную стабильность и динамику системы до и после введения активных компонентов. Такой подход обеспечивает углублённое понимание и контроль макроскопического фазового поведения системы [29]. Однако подробная информация о влиянии добавленных активных молекул на эти микроскопические изменения в ЛЖК изучена недостаточно.

Целью настоящей работы был синтез и исследование структурно-фазовых превращений, реологических свойств гибридных систем на основе неионного поверхностно-активного вещества (НПАВ) - монододецилового эфира тетраэтиленгликоля ( $C_{12}EO_4$ ) с «жёлтыми» углеродными точками (уCD) в водно-деканольных средах, обладающих наноразмерной структурой и возможностью регулирования оптических свойств для использования их в тераностике.

### Экспериментальная часть

Для получения «жёлтых» углеродных точек выбрана методика, описанная в [30, 31]. Исходным базовым реактивом служил о-фенилендиамин навеску (432 мг) которого предварительно растворяли в воде (80 мл) и помещали в автоклав объёмом 100 мл. Реакцию проводили при 150 °С 9 часов, затем содержимое реактора охлаждалась до комнатной температуры и центрифугировалась при 10000 об/мин и фильтровалась. Осадок подвергали диализу с использованием полимерной мембраны 1000 Да в дистиллированной воде в течение суток.

Синтезированные С-точки демонстрируют интенсивную люминесценцию в «жёлтой» области спектра (565 нм), что представляет особый интерес с биомедицинской точки применения. Излучение в данном спектральном диапазоне в меньшей степени рассеивается и поглощается биологическими тканями, что обеспечивает более высокое соотношение сигнал-шум при оптической визуализации.

Эмиссионные свойства уCD обусловлены электронной структурой ядра и поверхностными состояниями, характерными для высокосопреженных углеродных материалов. Благодаря наноразмерности, химической и фотостабильности, а так же регулируемым оптическим свойствам, углеродные точки представляют собой перспективные компоненты для интеграции в гибридные системы жидкокристаллических матриц. В частности, их внедрение в лиотропные жидкие кристаллы открывает пути для разработки функциональных биосовместимых материалов, сочетающих оптическую активность со структурным порядком.

Гибридные среды были получены на основе НПАВ  $C_{12}EO_4$ , деканола и водного раствора углеродных точек уCD ( $C=0,1$  г/л). Компоненты смешивали в заданных массовых соотношениях,

гомогенизировали центрифугированием (3000 об/мин, 30 мин, 25 °С) и выдерживали в течение 14 суток при  $T=25$  °С.

Идентификацию лиотропных мезофаз и оценку гомогенности проводили методом поляризационной оптической микроскопии (ПОМ) (микроскоп Olympus BX51 («OLYMPUS Co.», Япония)). Температуры фазовых переходов определяли с точностью  $\pm 2$  °С.

Реологические измерения выполнены на ротационном вискозиметре Brookfield DV-II+PRO («Brookfield Engineering Laboratories, Inc.», США, система конус-плита) в диапазоне скоростей сдвига  $0,07\text{--}55$   $\text{c}^{-1}$  (25 °С). Воспроизводимость данных по значениям вязкости составила 98%.

### Обсуждение результатов

В данной работе представлены результаты исследований структурно-фазовых превращений гибридных сред  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/(\text{H}_2\text{O}+\text{yCD})/\text{dec}$  различного состава. По данным ПОМ построена фазовая диаграмма многокомпонентной системы, которая показана на рисунке 1. Образование ламеллярной лиомезофазы происходило в диапазоне концентраций компонентов от от 25 до 75% мас.  $\text{H}_2\text{O}+\text{yCD}$  и 20 до 75% мас.  $\text{C}_{12}\text{EO}_4$  при постоянном содержании деканола в системах, равном 5% мас. Образцы  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/\text{H}_2\text{O} + \text{yCD}/\text{dec}$  состава 15/80/5% мас. и 75/20/5% мас. - гелелеобразные и не обладают двулучепреломлением в поляризованном свете.

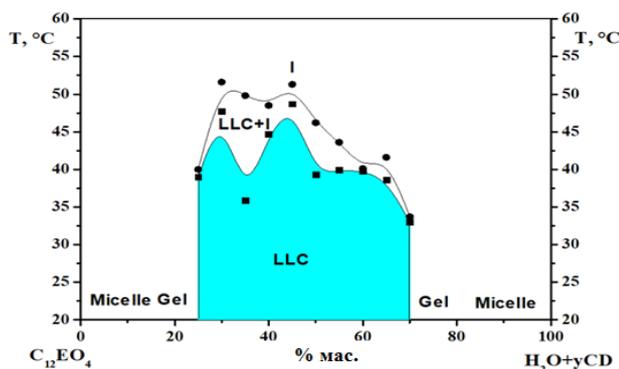


Рис. 1 – Фазовая диаграмма системы  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/(\text{H}_2\text{O}+\text{yCD})/\text{dec}$  (концентрация деканола постоянна и равна 5% мас.)

Fig. 1 – Phase diagram of the  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/(\text{H}_2\text{O}+\text{yCD})/\text{dec}$  system (the concentration of decanol is constant and equal to 5% by weight.)

В качестве примера на рисунке 2 представлены микрофотографии некоторых полученных образцов в поляризованном свете.

Для систем  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/(\text{H}_2\text{O}+\text{yCD})/\text{dec}$  состава 65/30/5% мас., 40/55/5% мас., 35/60/5% мас., 30/65/5% мас. визуализировалась текстура «мальтийский крест», характерная для ламеллярной упаковки молекул в мезофазе.

Как было показано ранее, система  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/\text{H}_2\text{O}/\text{dec}$  (45/50/5% мас.) образует ламеллярную мезофазу с температурой фазового перехода 43,8 °С. Включение в систему «синих» углеродных точек не меняет тип

мезофазы, однако приводит к повышению температуры фазового перехода ( $T_{\text{ф.п.}}$ ) до 45,6 °С [32].

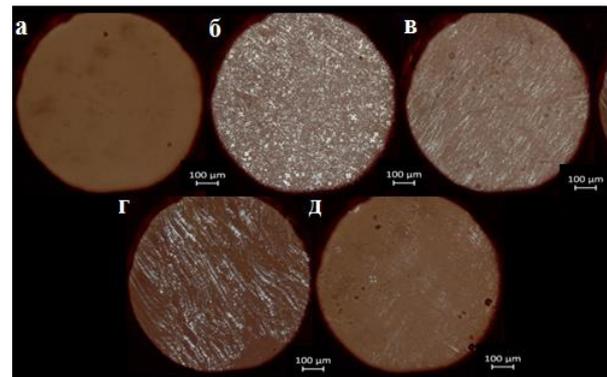


Рис. 2 – Оптические микрофотографии образцов для  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/(\text{H}_2\text{O}+\text{yCD})/\text{dec}$  в поляризованном свете различного состава: а – 75/20/5% мас., б – 65/30/5% мас., в – 55/40/5% мас., г – 45/50/5% мас., д – 35/60/5% мас.,  $\times 100$

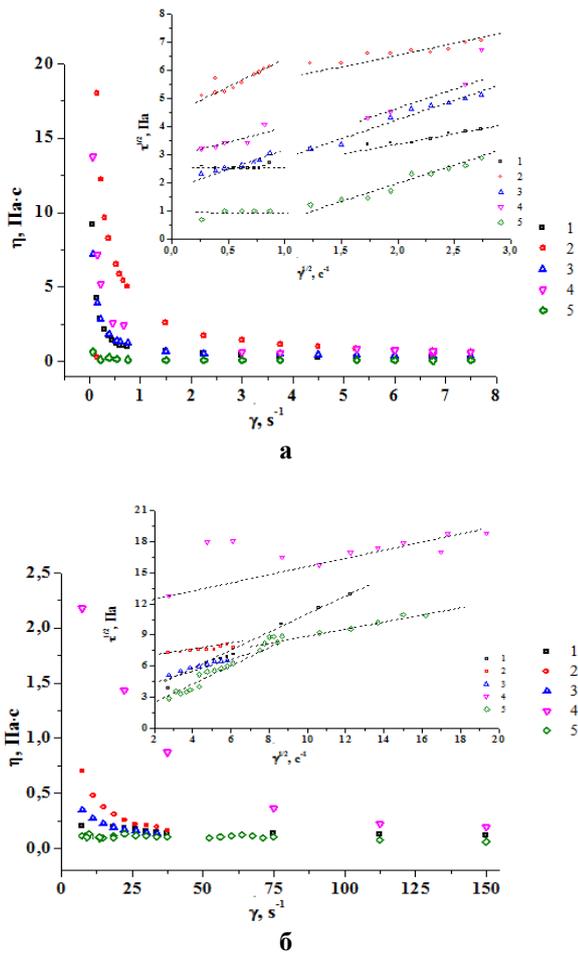
Fig. 2 – Optical micrographs of  $\text{C}_{12}\text{EO}_4/(\text{H}_2\text{O}+\text{yCD})/\text{dec}$  samples in polarized light with different compositions: а – 75/20/5 wt.%, б – 65/30/5 wt.%, в – 55/40/5 wt.%, г – 45/50/5 wt.%, д – 35/60/5 wt.%,  $\times 100$

В настоящем исследовании обнаружено, что введение  $\text{yCD}$  в лиотропные системы на основе  $\text{C}_{12}\text{EO}_4$  расширяет температурно-концентрационную область существования мезофаз по сравнению с базовой системой и значение  $T_{\text{ф.п.}} = 46,4$  °С.

Следовательно, на основе анализа построенных фазовых диаграмм было показано, что, варьируя температуру и концентрацию компонентов в полифункциональных гибридных системах, можно управлять типом их надмолекулярной организации, регулируя при этом геометрические термодинамические параметры и оптические свойства лиотропных фаз.

Для дальнейшего практического применения, как выбор оптимальной упаковки (например, шприца-дозатора или капельницы) и метода дозирования для жидкого препарата напрямую зависит от его реологических характеристик, устанавливаемых методами вискозиметрии [33]. Незначительные изменения в структурных параметрах, стабильности размеров и динамических свойствах на наноуровне при введении ПАВ и других добавок, где преобладает межфазная поверхность, могут играть важную роль в доминирующем макроскопическом поведении фаз, последующем сохранении структуры и физико-химических свойствах образующихся систем.

В настоящей работе методом ротационной вискозиметрии исследовались реологические свойства синтезированных гибридных лиотропных сред, содержащих «жёлтые» углеродные точки, в диапазонах малых ( $0,07\text{--}7,5$   $\text{c}^{-1}$ ) и больших ( $0,07\text{--}50$   $\text{c}^{-1}$ ) скоростей сдвига. На рисунке 3 представлены кривые вязкости и кривые течения образцов гибридных систем, допированных «жёлтыми» углеродными точками.



**Рис. 3 – Реологическое поведение при малых (а) и больших (б) скоростях сдвига для гибридных сред  $C_{12}EO_4/(H_2O+yCD)/dec$  состава: 1 - 45/50/5 % мас., 2 - 50/45/5 % мас., 3 - 55/40/5 % мас., 4 - 35/60/5 % мас., 5 - 25/70/5 % мас.**

**Fig. 3 – Rheological behavior at low (a) and high (b) shear rates for hybrid media  $C_{12}EO_4/(H_2O+yCD)/dec$  of the following composition: 1 – 45/50/5 wt.%, 2 – 50/45/5 wt.%, 3 – 55/40/5 wt.%, 4 – 35/60/5 wt.%, 5 – 25/70/5 wt.%.**

Анализ кривых течения показал, что как в гибридных системах с  $yCD$ , так и в системах  $C_{12}EO_4/(H_2O+bCD)/dec$  для ЛЖК-фаз в основном характерна более высокая вязкость по сравнению с гелеобразными средами. Однако тенденция, характерная для систем с  $bCD$  – увеличение концентрации сурфактанта приводит к образованию более высоковязких ЛЖК – для гибридных сред, допированных  $yCD$  не наблюдается.

Для гибридных сред выявлено поведение, типичное для систем с развитой надмолекулярной структурой: высокие значения вязкости в области малых  $\dot{\gamma}$ , обусловленные наличием крупных структурных доменов, и последующее её снижение вследствие разрушения, сжатия и ориентации этих доменов в сдвиговом поле [34]. Данное сдвиговое разжижение подтверждает неньютоновский характер течения исследованных ЛЖК в ламеллярной фазе ( $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ ), описываемый моделью нелинейного пластичного тела. Схожие реологические свойства

характерны для ряда лиотропных мезофаз, например, на основе Pluronic P123 [35],  $\kappa$ -каррагинана [36], хитозана [37] и неионного ПАВ с  $bCD$  [32].

Согласно работе [38] структурная реологическая модель описывает установившееся (стационарное) течение структурированных систем, чьи реологические характеристики не зависят от времени. Под структурой понимается сеть частиц, объединённая физическими или химическими связями в единое целое (жидкие кристаллы, для которых характерно течение с сохранением внутренней упорядоченности).

Согласно работе авторов [39] ЛЖК системам характерны специфические реологические свойства: немонотонная зависимость вязкости от концентрации с максимумом в двухфазной области, сложная кривая течения с чередованием участков сдвигового разжижения и ньютоновского плато и длительное время релаксации, необходимое для достижения стационарного течения (до сотен единиц сдвига).

В настоящей работе поведение гибридных систем  $C_{12}EO_4/(H_2O+yCD)/dec$  анализировали в рамках микрореологических моделей Ньютона, Бингама, Оствальда, Кэссона и Гершеля–Балкли [40, 41]. Вязкостные свойства гибридных ЛЖК описываются моделью Кэссона, гелеобразные среды — моделью Оствальда. Гибридные системы демонстрируют сложное микрореологическое поведение, о чём свидетельствуют различные показатели вязкости и текучести, проявляющиеся при разных скоростях деформации — низких и высоких. Аналогичные закономерности проявляются для исследуемых гибридных сред, допированных «жёлтыми» и «синими» С - точками.

Предел текучести ( $\tau_0$ ) является количественной величиной прочности структуры, которая определяется в результате межмолекулярных взаимодействий. Максимальные значения  $\tau_0$ , достигающие  $10^5$  Па в высоконаполненных композициях, определяются природой и концентрацией структурообразующих добавок, а теоретический минимум составляет в примерно 0,01 Па [39], что согласуется с экстраполированными экспериментальными значениями нижнего предела текучести и для описанных в текущей работе ЛЖК. Так данные мезогенные гибридные среды являются псевдопластичными системами с установленным пределом текучести ( $\tau_0$ ) и их значения представлены в таблице 1.

Экстраполяцией данных по модели Кэссона установлено предельное напряжение при малых скоростях сдвига 0,01–3,63 Па и при больших – 0,27–2,18 Па, возникающее вследствие уменьшения размера агрегатов и соответствующих вязкостных потерь. Наблюдаемое изменение реологических свойств, по-видимому, определяется совокупностью факторов: микрореологическим поведением системы, взаимодействием функциональных заместителей  $yCD$  с её компонентами и включением углеродных точек в межслоевое пространство лиомезофазы.

**Таблица 1 - Оценка реологического поведения ЛЖК в рамках микрореологических моделей систем C<sub>12</sub>EO<sub>4</sub>/(H<sub>2</sub>O+γCD)/C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>OH****Table 1 - Evaluation of the rheological behavior of VFA within the framework of microrheological models of the systems C<sub>12</sub>EO<sub>4</sub>/(H<sub>2</sub>O+γCD)/C<sub>10</sub>H<sub>21</sub>OH**

Модель Кэссона $\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta_k \cdot \dot{\gamma})^{1/2}$						
Состав	$\dot{\gamma} = 0,07 - 7,5 \text{ c}^{-1}$			$\dot{\gamma} = 7,5 - 33,75 \text{ c}^{-1}$		
	$\eta_k$ , мПа·с	$\tau_0$ , Па	R, %	$\eta_k$ , мПа·с	$\tau_0$ , Па	R, %
55/40/5 % мас. (ЛЖК)	144,1	3,63	97,3	22,0	1,54	98,9
50/45/5 % мас. (ЛЖК)	51,2	2,69	97,4	4,5	4,42	98,8
45/50/5 % мас. (ЛЖК)	38,5	0,49	96,8	87,4	0,27	97,1
35/60/5 % мас. (ЛЖК)	133,8	0,78	94,0	4,27	2,18	95,0
25/70/5 % мас. (ЛЖК)	71,4	0,01	89,4	37,0	0,60	90,1
Модель Оствальда $\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$						
Состав	K, мПа·с	n	R, %	K, мПа·с	n	R, %
75/20/5 % мас. (гель)	65,5	0,72	84,2	35,9	0,88	95,4
15/80/5 % мас. (гель)	67,7	0,96	96,0	77,0	0,92	95,2

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига, Па;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $\text{c}^{-1}$ ;  $\eta_k$  – пластическая вязкость по Кэссону, Па·с; K – коэффициент консистенции; n – индекс течения, R – коэффициент корреляции экспериментальных и расчетных данных.

Таким образом, на основании полученных результатов вискозиметрии, могут быть предложены оптимальные реологические характеристики, которые могут быть достигнуты и рекомендованы при разработке различных устройств и препаратов в зависимости от их назначения.

### Выводы

В работе получены и исследовано фазовое поведение и реологические свойства полифункциональных гибридных систем на основе олигоэтиленоксида C<sub>12</sub>EO<sub>4</sub> и «жёлтых» C-точек в водно-деканольных средах, формирующих лиомезофазы и гели. На фазовых диаграммах данных систем показаны температурные и концентрационные диапазоны управления типом надмолекулярной организации, геометрическими и термодинамическими параметрами лиотропных систем. Установлено, что реологические свойства полученных гибридных ЛЖК описываются моделью Кэссона, гелеобразные среды — моделью Оствальда.

Представленные закономерности полученных мультифункциональных жидкокристаллических сред открывают путь к целенаправленному синтезу наноразмерных контейнеров и делает их перспективной платформой для прикладных задач, таких как таргетированная доставка лекарств, биовизуализация и тераностика.

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и

выполнению научно-исследовательских работ (соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

### Литература

- M.A. abd El-Fattah, *AAPS PharmSciTech.*, **27**(1), 78 (2026). DOI: 10.1208/s12249-025-03316-z.
- D. Singh, A. Thakur, *ASSAY and Drug Development Technologies.* 1540658X251410476 (2026). DOI: 10.1177/1540658X251410476.
- D.K. de Almeida Silveira et al., *Mol. Liq.*, 128630 (2025). DOI: 10.1016/j.molliq.2025.128630.
- R. Balda, G.S. Chakraborty, S. Rathod, *AAPS PharmSciTech.* **26**(2), 58 (2026). DOI: 10.1208/s12249-025-03058-y.
- A. Lange et al, *Physical Chemistry Chemical Physics* (2025). DOI: 10.1039/D4CP03060E.
- Y. Ma et al, *Nano Energy*, 133,110517 (2025). DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110517.
- I. Govindan, A. Paul, A. Rama et al, *AAPS PharmSciTech.* **26**, 6 (2025). DOI: 10.1208/s12249-024-02985-6.
- G. Liu et al., *Acta Pharm. Sin. B*, (2025). DOI: 10.1016/j.apsb.2025.12.008.
- M. Chountoules et al., *Pharmaceuticals*, 15(4), 429(2022). DOI: 10.3390/ph15040429.
- L. Liu, J. Chen, *Functional Inorganic Materials for Tumor Diagnostics and Therapy.*, 89-137 (2025). DOI: 10.1007/978-981-95-0528-9\_3.
- Z. Zhang et al., *Liquid crystal materials for biomedical applications //Adv. Mater.*, **35**(36), 2300220 (2023). DOI: 10.1002/adma.202300220.
- H. Wang et al., *Biosensors*, 12(8), 639 (2022). DOI: 10.3390/bios12080639.
- D. Chang, Z. Zhao, L. Shi, W. Liu, Y. Yang, *Talanta*, **232**, 122423 DOI: 10.1016/j.talanta.2021.122423.
- S. Wang et al., *Mater. Sci. Eng.*, **116**, 111233. (2020). DOI: 10.1016/j.msec.2020.111233.
- A.S. Rasal et al, *ACS Appl. Nano Mater.*, **4** (7), 6515–6541 (2021). DOI: 10.1021/acsnm.1c01372.

16. R.R. Shamilov, A.E. Zavorotko, T.P. Sultanov, I.R. Vakhitov, Y.G. Galyametdinov, *J. Photochem. Photobiol.*, **A**, 115791 (2024). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2024.115791.
17. A. Bezrukov, A. Galeeva, A. Krupin, Yu. Galyametdinov, *Nanomaterials*, **15**(21), 1682 (2025). DOI: 10.3390/nano15211682.
18. J. Zhang et al. *Materials Today Bio*, **29**, 101347 (2024). DOI: 10.1016/j.mtbio.2024.101347.
19. S. N. Baker, G. A. Baker, *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 38, 6726-6744. (2010). DOI: 10.1002/anie.200906623.
20. M. Urbanski et al *Liquid Crystals*, **43**, 2, 183-194 (2016). DOI: 10.1080/02678292.2015.1082651.
21. J. Geys et al, *Environmental health perspectives*, **116**, 12,1607-1613(2008). DOI: 10.1289/ehp.11566.
22. Z. Liu, X. Lu, M. Liu, W. Wang *Molecules*, **28**, 2957 (2023) DOI:10.3390/molecules28072957.
23. M. Zhang et al. *Nano Research*, **12**, 815-821 (2019). DOI: 10.1007/s12274-019-2293-z.
24. Y. Yao et al., *Int. J. Biol. Macromol.*, 135774. (2024). DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135774.
25. G. Kalaiyarasan, J. Joseph, P. Kumar, *ACS omega*, **5**, 35, 22278-22288 (2020). DOI: 10.1021/acsomega.0c02627.
26. Y. Cheng, C. Li, R. Mu, Y. Li, T. Xing, B. Chen, C. Huang, *Analytical chemistry*, **90**, 19, 11358-11365 (2018). DOI: 10.1021/acs.analchem.8b02301.
27. Q. Liu et al., *Biosensors and Bioelectronics*, **64**, 119-125 (2015). DOI: 10.1016/j.bios.2014.08.052.
28. J. Xu, et al., *J. Lumin.*, **266**,120303 (2024). DOI: 10.1007/s00604-024-06607-7.
29. P. Singh, *Liq. Cryst.*, 49(13), 1822–1840. (2022). DOI: 10.1016/j.jcis.2021.09.019.
30. А. И. Галеева, А. Н. Безруков, А. С. Крупин, Ю. Г. Галяметдинов, *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **24**, 2, 32–42 (2024). DOI: 10.18083/LCAppl.2024.2.32.
31. А.Э. Заворотко, И.Д. Максимова, А.С. Крупин, Ю.Г. Галяметдинов, *Вестник технологического университета*, **27**, 12, 18-22 (2024).
32. А.И. Галеева, П. И. Хуснутдинова, А. С. Крупин, Ю.Г. Галяметдинов, *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **25**, 2, 20-29 (2025) DOI: 10.18083/LCAppl.2025.2.20.
33. B. Shriky, A. Kelly, M. Isreb et al., *J. Colloid Interface Sci.*, **565**, 119 (2020). DOI: 10.1016/j.jcis.2019.12.096.
34. S.E. Lastra Ripoll, S.E. Quintana Martinez, L.A. Garcia Zapateiro et al., *ACS Omega*, **6**, 16119 (2021). DOI: 10.1021/acsomega.1c02011.
35. N.M. Selivanova, A.I. Galeeva, M.A. Ziganshin et al., *J. Phys. Chem. B*, **128**, 5127 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c00929.
36. N.M. Selivanova, A.I. Galeeva, Yu.G. Galyametdinov, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **20**(2), 23-34 (2020). DOI: 10.18083/LCAPP.2020.2.23.
37. A.I. Galeeva, N.M. Selivanova, Yu.G. Galyametdinov, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **21**(1), 23-33 (2021). DOI: 10.18083/LCAppl.2021.1.23.
38. V.N. Matveenko, E.A. Kirsanov, *Colloid Journal*, **87**(1), 38-48 (2025). DOI: 10.1134/S1061933X24601227.
39. М.П. Вековищев, Е.А. Кирсанов, *Жидк. крист. и их практич. использ.*, **25**, 3, 66-76 (2025). DOI: 10.18083/LCAppl.2025.3.66.
40. Е.А. Кирсанов Течение дисперсных и жидкокристаллических систем. Иваново: Иван. гос. ун-т 2006. 232 с.
41. Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеевко Неньютонское поведение структурированных систем. – М.: Техносфера, 2016., 384 с.
- 2.D. Singh, A. Thakur, *ASSAY and Drug Development Technologies*. 1540658X251410476 (2026). DOI: 10.1177/1540658X251410476.
- 3.D.K. de Almeida Silveira et al., *Mol. Liq.*, 128630 (2025). DOI: 10.1016/j.molliq.2025.128630.
- 4.R. Balda, G.S. Chakraborty, S. Rathod, *AAPS PharmSciTech*. **26**(2), 58 (2026). DOI: 10.1208/s12249-025-03058-y.
- 5.A. Lange et al, *Physical Chemistry Chemical Physics* (2025). DOI: 10.1039/D4CP03060E.
- 6.Y. Ma et al, *Nano Energy*, 133,110517 (2025). DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110517.
- 7.I. Govindan, A. Paul, A. Rama et al, *AAPS PharmSciTech*, **26**, 6 (2025). DOI: 10.1208/s12249-024-02985-6.
- 8.G. Liu et al., *Acta Pharm. Sin. B*, (2025). DOI: 10.1016/j.apsb.2025.12.008
- 9.M. Chountoulesi et al., *Pharmaceuticals*, 15(4), 429(2022). DOI: 10.3390/ph15040429
10. L. Liu, J. Chen, *Functional Inorganic Materials for Tumor Diagnostics and Therapy.*, 89-137 (2025). DOI: 10.1007/978-981-95-0528-9\_3.
11. Z. Zhang et al., Liquid crystal materials for biomedical applications //Adv. Mater., **35**(36), 2300220 (2023). DOI: 10.1002/adma.202300220.
12. H. Wang et al., *Biosensors*, **12**(8), 639 (2022). DOI: 10.3390/bios12080639.
13. D. Chang, Z. Zhao, L. Shi, W. Liu, Y. Yang, *Talanta*, **232**, 122423 DOI: 10.1016/j.talanta.2021.122423
14. S. Wang et al., *Mater. Sci. Eng.*, **116**, 111233. (2020). DOI: 10.1016/j.msec.2020.111233.
15. A.S. Rasal et al, *ACS Appl. Nano Mater.*, **4**(7), 6515–6541 (2021). DOI: 10.1021/acsnm.1c01372
16. R.R. Shamilov, A.E. Zavorotko, T.P. Sultanov, I.R. Vakhitov, Y.G. Galyametdinov, *J. Photochem. Photobiol.*, **A**, 115791 (2024). DOI: 10.1016/j.jphotochem.2024.115791
17. A. Bezrukov, A. Galeeva, A. Krupin, Yu. Galyametdinov, *Nanomaterials*, **15**(21), 1682 (2025). DOI: 10.3390/nano15211682.
18. J. Zhang et al. *Materials Today Bio*, **29**, 101347 (2024). DOI: 10.1016/j.mtbio.2024.101347
19. S. N. Baker, G. A. Baker, *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 38, 6726-6744. (2010). DOI: 10.1002/anie.200906623
20. M. Urbanski et al *Liquid Crystals*, **43**, 2, 183-194 (2016). DOI: 10.1080/02678292.2015.1082651
21. J. Geys et al, *Environmental health perspectives*,**116**, 12,1607-1613(2008). DOI: 10.1289/ehp.11566
22. Z. Liu, X. Lu, M. Liu, W. Wang *Molecules*, **28**, 2957 (2023) DOI:10.3390/molecules28072957
23. M. Zhang et al. *Nano Research*, **12**, 815-821 (2019). DOI: 10.1007/s12274-019-2293-z
24. Y. Yao et al., *Int. J. Biol. Macromol.*, 135774. (2024). DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135774.
25. G. Kalaiyarasan, J. Joseph, P. Kumar, *ACS omega*, **5**, 35, 22278-22288 (2020). DOI: 10.1021/acsomega.0c02627.
26. Y. Cheng, C. Li, R. Mu, Y. Li, T. Xing, B. Chen, C. Huang, *Analytical chemistry*, **90**, 19, 11358-11365 (2018). DOI: 10.1021/acs.analchem.8b02301.
27. Q. Liu et al., *Biosensors and Bioelectronics*, **64**, 119-125 (2015). DOI: 10.1016/j.bios.2014.08.052.
28. J. Xu, et al., *J. Lumin.*, **266**,120303 (2024). DOI: 10.1007/s00604-024-06607-7.
29. P. Singh, *Liq. Cryst.*, 49(13), 1822–1840. (2022). DOI: 10.1016/j.jcis.2021.09.019.
30. А. И. Галеева, А. Н. Безруков, А. С. Крупин, Ю. Г. Галяметдинов, *Liquid Crystals and Their Practical Uses*, 24, 2, 32–42 (2024). DOI: 10.18083/LCAppl.2024.2.32.
31. А.Е. Заворотко, И.Д. Максимова, А.С. Крупин, Ю.Г. Галяметдинов, *Herald of Technological University*, **27** (12), 18-22 (2024).

## References

- 1.M.A. abd El-Fattah, *AAPS PharmSciTech.*, **27**(1), 78 (2026). DOI: 10.1208/s12249-025-03316-z.

32. A.I. Galeeva, R.I. Khusnutdinova, A.S. Krupin, Yu.G. Galyametdinov, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **25**(2), 20–29 (2025) DOI: 10.18083/LCAppl.2025.2.20. \*
33. B. Shriky, A. Kelly, M. Isreb et al., *J. Colloid Interface Sci.*, **565**, 119 (2020). DOI: 10.1016/j.jcis.2019.12.096.
34. S.E. Lastra Ripoll, S.E. Quintana Martinez, L.A. Garcia Zapateiro et al., *ACS Omega*, **6**, 16119 (2021). DOI: 10.1021/acsomega.1c02011.
35. N.M. Selivanova, A.I. Galeeva, M.A. Ziganshin et al., *J. Phys. Chem. B*, **128**, 5127 (2024). DOI: 10.1021/acs.jpcc.4c00929.
36. N.M. Selivanova, A.I. Galeeva, Yu.G. Galyametdinov, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **20**(2), 23-34 (2020). DOI: 10.18083/LCAPP.2020.2.23.
37. A.I. Galeeva, N.M. Selivanova, Yu.G. Galyametdinov, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **21**(1), 23-33 (2021). DOI: 10.18083/LCAppl.2021.1.23.
38. V.N. Matveenko, E.A. Kirsanov, *Colloid Journal*, **87**(1), 38-48 (2025). DOI: 10.1134/S1061933X24601227
39. M.P. Vekovishchev, E.A. Kirsanov, *Liq. Cryst. and their Appl.*, **25**(3), 66–36 (2025). DOI: 10.18083/LCAppl.2025.3.66.
40. E.A. Kirsanov Flow of dispersed and liquid crystal systems. Ivanovo: Publishing house "Ivanovo State University", 2006. 232 p. (in Russ.).
41. E.A. Kirsanov, V.N. Matveenko Non-Newtonian behavior of structured systems. - M.: Tekhnosfera, 2016., 384 p. (in Russ.).

---

© **А. И. Галеева** – канд. хим. наук, доцент кафедры Физической и коллоидной химии (ФКХ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, galeeva-alija@mail.ru; **А. Э. Заворотько** – аспирант кафедры ФКХ, КНИТУ, zavorotco@mail.ru; **Ю. Г. Галяметдинов** – д-р хим. наук, проф., профессор кафедры ФКХ, КНИТУ; г.н.с. лаборатории Квантовой оптики в алмазах Казанский Физико-Технический Институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия, yugal2002@mail.ru.

© **А. И. Галеева** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, department of Physical and Colloid Chemistry (PCC), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, galeeva-alija@mail.ru; **А. Э. Заворотько** – PhD-student of the PCC department, KNRTU, zavorotco@mail.ru; **Yu. G. Galyametdinov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Full Professor, Professor of the PCC department, KNRTU; Chief Researcher of the Laboratory of Quantum Optics in Diamonds, Kazan Physical-Technical Institute named after E.K. Zavoisky, Federal Research Center of the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia, yugal2002@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 19.01.26

Дата принятия рукописи в печать – 25.01.26