

УДК 532.783; 532.133
PACS 47.50.+d , 47.57.Lj

Экспериментальное исследование реологических свойств жидкого кристалла, модифицированного углеродными нанотрубками

В. Г. Гилев[†], А. А. Каримов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

[†] email: gvg@psu.ru

Приведены результаты экспериментального исследования реологических свойств нематического жидкого кристалла MBBA, модифицированного углеродными нанотрубками в зависимости от массовой концентрации наполнителя. Измерения выполнены на ротационном реометре Physica MCR 501 (Anton Paar, Австрия) методом осцилляций в режиме контролируемой деформации. Показано, что введение в жидкий кристалл модификатора изменяет температуру фазового перехода в изотропную фазу T_i . Построена зависимость T_i от концентрации наполнителя. Измерены кривые течения и кривые комплексной вязкости образцов в интервале концентраций от 0.015 до 0.085 масс.%. Показано, что все кривые течения можно аппроксимировать одной функциональной зависимостью: реологическим уравнением Чеушнера (Tscheuschner D.). Рассчитаны параметры аппроксимирующих кривых. Показано, что допированные образцы, в отличие от дисперсионной среды, проявляют вязкоупругие свойства, величина которых тем больше, чем больше концентрация наполнителя. Исследованы зависимости угла сдвига фаз между касательными напряжениями и величиной деформации δ от концентрации модификатора. Показано, что по мере увеличения скорости сдвигового течения, значения $\delta \rightarrow \pi/2$, что соответствует чисто вязкому течению. Рассчитаны значения касательных напряжений, при которых происходит переход к вязкому течению в зависимости от концентрации модификатора.

Ключевые слова: жидкий кристалл; комплексная вязкость; углеродные нанотрубки; температура фазового перехода

Поступила в редакцию 26.07.2021; после рецензии 02.08.2021; принята к опубликованию 02.08.2021

Experimental investigation of rheological properties of liquid crystal modified with carbon nanotubes

V. G. Gilev[†], A. A. Karimov

Perm State University, Perm, Russia

[†] email: gvg@psu.ru

The results of an experimental study of the rheological properties of a nematic liquid crystal MBBA modified with carbon nanotubes depending on the mass concentration of the filler are presented. The measurements were performed on the Physica MCR 501 rheometer (Anton Paar, Austria) by the method of oscillations in the controlled deformation mode. It is shown that the introduction of a modifier into a liquid crystal changes the temperature of the phase transition to the isotropic phase of T_i . The dependence of T_i on the concentration of the filler is constructed. The flow curves and the curves of the complex viscosity of the samples were measured in the concentration range from 0.015

to 0.085 wt.%. It is shown that all flow curves can be approximated by one functional dependence: the rheological Tscheuschner equation. The parameters of the approximating curves are calculated. It is shown that the doped samples, in contrast to the dispersion medium, exhibit viscoelastic properties, the greater the greater the concentration of the filler. The dependences of the phase shift angle between tangential stresses and the strain value δ on the concentration of the modifier are investigated. It is shown that as the shear flow velocity increases, the values of $\delta \rightarrow \pi/2$, which corresponds to a purely viscous flow. The values of tangential stresses at which the transition to a viscous flow occurs, depending on the concentration of the modifier, are calculated..

Keywords: liquid crystal; complex viscosity; carbon nanotubes, phase transition temperature

Received 26.07.2021; revised 02.08.2021; accepted 02.08.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-3-37-43

1. Введение

Многие практические задачи требуют материалов с заданными физико-химическими свойствами. Когда возникает потребность в материале с новым комплексом свойств, не всегда целесообразно заново синтезировать новые. Физическая модификация существующих веществ, их комбинация с веществами другой природы, другой структуры позволяет придать ему особый нужный комплекс свойств, зависящий от вида и концентрации наполнителя.

В последние годы становятся актуальными исследования наномодифицированных материалов (модификатор – частицы с размером менее 100 нм). Основные отличия их от макро- и микрокомпозигов заключаются в огромной удельной поверхности раздела наполнитель-матрица, большой объемной доле межфазной границы и малых средних расстояниях между частицами наполнителя. Среди таких модификаторов широко используются углеродные наночастицы, такие как одно- и многостенные углеродные нанотрубки, нановолокна, фуллерены и графены. В литературе достаточно широко представлены исследования физико-химических, калориметрических и электрических свойств ряда полимерных материалов, допированных наномодификаторами [1]. Модификации подвергаются не только изотропные, но и анизотропные материалы, такие как жидкие кристаллы.

Жидкие кристаллы (ЖК) – особое состояние некоторых органических веществ, в котором они обладают текучестью и свойством образовывать пространственные структуры, подобные кристаллическим. Необходимым условием проявления жидкокристаллического состояния является анизотропия молекул. В таких веществах существует дальняя ориентационная упорядоченность молекул, а наличие выделенного направления ориентации молекул ЖК приводит к анизотропии всех его физических свойств [2]. Высокая способность жид-

ких кристаллов (ЖК) к ориентации под воздействием электрических и магнитных полей позволяет использовать их в качестве управляемых матриц для микро- и наноэлектроники [3].

Большую популярность в качестве добавки в ЖК получили углеродные нанотрубки. Это связано с их уникальной электропроводностью и механической прочностью. Имеется целый ряд работ, посвященных изучению ориентационного порядка [4, 5], электрооптических [6, 7], диэлектрических свойств [8, 9–11]. Вязкость и вязкоупругие характеристики холестерического жидкого кристалла, допированного многослойными углеродными нанотрубками «Таунит-М», были исследованы в работе [12], где проанализированы такие важные для практического применения показатели, как температуры фазовых переходов, оптические свойства и реологические характеристики.

Все это свидетельствует об актуальности предварительного экспериментального изучения смесей ЖК, так как изначально неочевидно, как будут изменяться их характеристики. Экспериментальные исследования кроме всего прочего способны подтвердить ту или иную теоретическую модель.

В настоящей работе предпринята попытка исследования влияния диспергированных углеродных нанотрубок на фазовые переходы и реологические характеристики нематических матриц в зависимости от концентрации углеродных нанотрубок.

2. Объект исследования и подготовка образцов

Для понимания физических основ тех или иных явлений, наблюдаемых при допировании жидких кристаллов, желательно использовать уже хорошо изученные ЖК. Одним из таких кристаллов является классический нематический жидкий кристалл N-(4-Метоксибензилиден)-4-бутиланилин (МББА).

МББА – стабильный жидкий кристалл, мезофаза которого наблюдается в температурном интервале от 16 до 45°C. По данным литературных источников при температуре 25 °C средняя плотность со-

ставляет примерно $1.088 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$; показатель преломления для D-линии натрия для обыкновенного луча находится в пределах 1.548 – 1.568, необыкновенного луча – в пределах 1.710 – 1.781 [13]. Реологические характеристики определяются только вязким компонентом. Не удивительно, что во многих работах, в которых исследуются свойства допированных ЖК, в качестве основы используется именно МБВА [см., например, 14].

Допирующая добавка: однослойные углеродные нанотрубки производства OCSiAl (Новосибирск). Содержание углерода: $(92\pm 1) \text{ мас.}\%$; длина $\approx 5 \text{ мкм}$; средний диаметр $(1.6\pm 0.4) \text{ нм}$; полная удельная поверхность $520 \text{ м}^2/\text{г}$; относительная плотность $1.87 \text{ г}/\text{см}^3$.

Измерения массы растворов и их компонентов, необходимые для расчета концентрации смеси, выполнялись с помощью аналитических весов ЛВР-200 2-го класса точности, абсолютная погрешность измерения которых составляла $\pm 0.05 \text{ мг}$.

После измерения весовых компонентов композиция тщательно смешивалась в течение 10–15 мин электромеханическим смесителем с частотой 120 об/мин и дополнительно 15–20 мин в ультразвуковой ванне Digital Ultrasonic Cleaner CD 4820 на частоте 40 кГц при температуре изотропной фазы ЖК. Далее этот цикл повторялся до получения визуально однородной консистенции смеси. Общее время подготовки образца составляло порядка 8–10 ч. Далее смесь оставлялась примерно на сутки и, если не наблюдалась седиментация нанотрубок, производились измерения. В противном случае осуществлялись дополнительные циклы размешивания.

3. Результаты измерений

3.1. Измерения плотности образцов

Измерения плотности, необходимые для расчета объемной концентрации нанотрубок, выполнены на автоматическом плотнотере DMA 4500 (Anton Paar, Австрия). Температурный диапазон измерений составляет от 0 до $90 \text{ }^\circ\text{C}$, абсолютная погрешность определения плотности – $0.00005 \text{ г}/\text{см}^3$.

Типичные результаты измерений плотности дисперсионной среды (МБВА) и одного из растворов показаны на рис. 1.

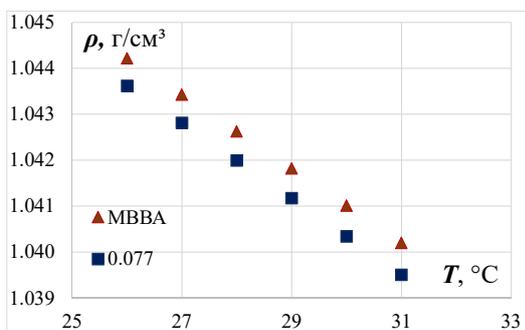


Рис. 1. Температурная зависимость плотности МБВА и образца с $\phi = 0.077 \text{ мас.}\%$

Как видно из представленного рисунка, добавление в дисперсионную среду углеродных нанотрубок приводит к уменьшению плотности смеси, несмотря на то, что плотность нанотрубок значительно выше плотности МБВА. Возможное объяснение этого эффекта: наличие воздуха в полости нанотрубок. Другими словами, такая система является тройной и для ее анализа требуются другие экспериментальные методы. По этой причине далее в работе указаны только массовые концентрации нанотрубок.

3.2. Измерения показателя преломления

Для измерения зависимости показателя преломления образцов от температуры использовался автоматический рефрактометр АВВЕМАТ 550. Температурный диапазон рефрактометра составляет от $10 \text{ до } 85 \text{ }^\circ\text{C}$, точность измерения показателя преломления – $2 \cdot 10^{-5} \text{ nD}$, измерительная длина волны: D-линия натрия (586 нм). Конструктивные особенности рефрактометра таковы, что для анизотропных сред он измеряет показатель преломления обыкновенного луча.

Типичные температурные зависимости показателя преломления МБВА и ряда растворов показаны на рис. 2.

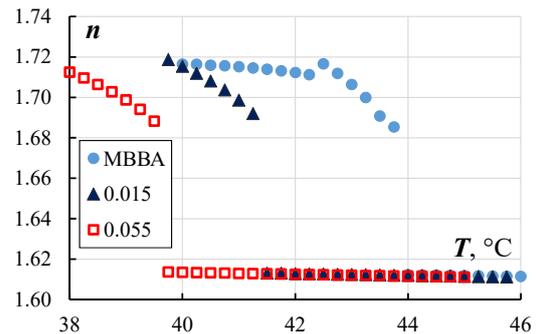


Рис. 2. Температурная зависимость показателя преломления МБВА и ряда растворов. Концентрация указана в легенде

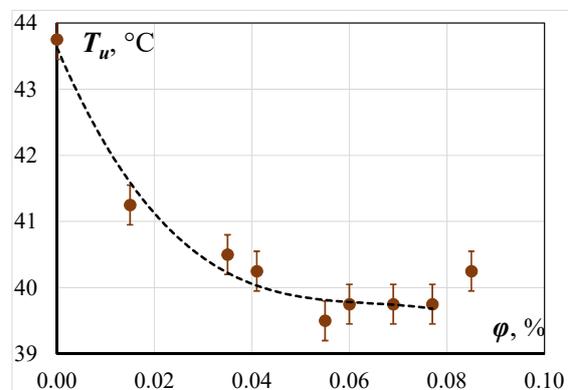


Рис. 3. Зависимость температуры перехода в изотропную фазу от концентрации нанотрубок

На всех кривых (рис. 2) виден характерный «разрыв», который обусловлен фазовым переходом

из жидкокристаллической в изотропную фазу. Температуры фазовых переходов являются важнейшими характеристиками ЖК, определяющие температурный интервал существования той или иной мезофазы, а в конечном итоге – интервал рабочих температур.

На основании измеренных данных был построен график зависимости температуры фазового перехода от концентрации смеси (рис. 3).

Из графика видно, что добавление нанотрубок в МББА в целом уменьшает температуру перехода «нематическая – изотропная фаза», но при концентрации нанотрубок больше, чем $\phi = 0.077\%$ температура перехода начинает возрастать. Анализ литературных данных показывает, что полезные технологические свойства большинства допированных систем проявляются только до определенного предела по концентрации дисперсной фазы [1]. Как будет показано ниже, в нашем случае это, возможно, связано с образованием в дисперсионной среде структурной сетки из наночастиц.

3.3. Реологические измерения

Реологические измерения выполнены на ротационном реометре Physica MCR 501. Такой прибор способен проводить реологические испытания в широком диапазоне постоянных и динамических тестов как в режиме контролируемого напряжения сдвига (CS), так и в режиме контроля скорости сдвига (CR), начиная от измерения кривых течения и заканчивая сложными динамическими анализами жидкостей. Во всех измерениях использовалась система «конус–плита». Диаметр основания конуса $d = 50$ мм, угол раствора конуса $\alpha = 1^\circ$. Используемая геометрия обеспечивает однородность градиента скорости сдвига в измерительном зазоре. Для поддержания и изменения температурного режима использовалось специальное температурное устройство Н-PTD 200 на основе эффекта Пельтье. В ходе эксперимента на рабочую поверхность плиты реометра помещалось около 0.57 мл раствора. Толщина слоя раствора по его внешнему радиусу составляла 0.047 мм, что обеспечивало быстрое установление рабочей температуры. Все измерения выполнены при температуре 28 °С.

Основные измерения выполнены в условиях сдвигового деформирования по гармоническому закону с частотой 1 Гц в режиме контроля деформации. В режиме осцилляций измеряемой величиной является комплексная вязкость η^* , которая отражает общее сопротивление динамическому сдвигу. Типичные зависимости комплексной вязкости от концентрации нанотрубок в зависимости от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ показаны на рис. 4. Такие кривые называется «кривыми вязкости». Они позволяют визуально обнаружить неньютоновские свойства жидкостей. Вязкость ньютоновских жидкостей не зависит от скорости сдвигового течения, т.е.

остается постоянной величиной. Жидкости, для которых вязкость зависит от скорости сдвига, называются неньютоновскими. Видно, что дисперсионная среда (МББА) является ньютоновской жидкостью. Добавление в дисперсионную среду нанотрубок приводит к проявлению неньютоновских свойств, которые тем больше, чем выше концентрация наполнителя.

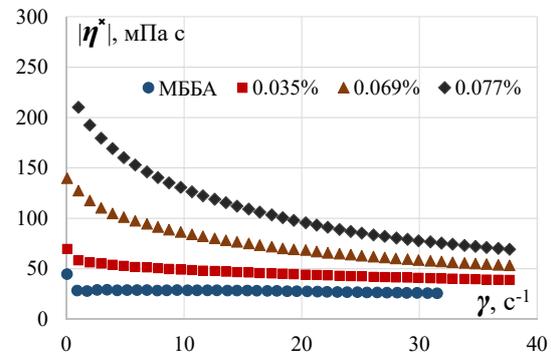


Рис. 4. Зависимости комплексной вязкости от скорости сдвига МББА и допированных образцов. Концентрации растворов указаны в легенде

Еще более подробную информацию можно получить, анализируя зависимости касательных напряжений τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$. Такие кривые называются «кривыми течения». Как отмечено в [15], «кривая течения образца может быть названа его реологическим «отпечатком пальца».

Типичные кривые течения в зависимости от концентрации нанотрубок показаны на рис. 5.

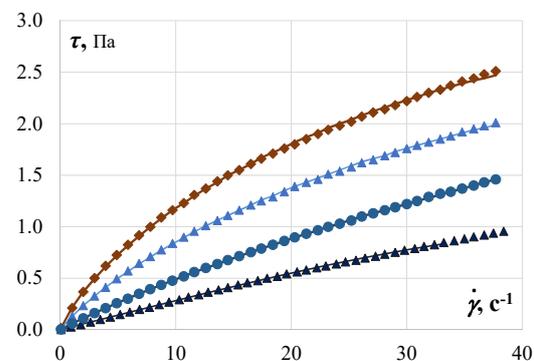


Рис. 5. Кривые течения МББА и допированных образцов. Сверху $\phi = 0.085; 0.069; 0.035; \text{МББА}$

Интерпретация реологических данных разнообразных неньютоновских систем сводится к выбору адекватного реологического уравнения для кривых течения или кривых вязкости. В программное обеспечение реометра Rheoplus заложено несколько десятков наиболее употребительных реологических уравнений для аппроксимации измеренных данных. Здесь же предусмотрен регрессионный анализ, позволяющий выбрать тот закон течения, для которого коэффициент детерминации (критерий R^2) максимальный. В нашем случае этому условию соответствовало уравнение Чеушнера (Tscheuschner):

$\tau = \alpha + b\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^p$, где a , b , c и p – эмпирические константы [16]. Это универсальное уравнение позволяет описать реологическое поведение как ньютоновских жидкостей, так и сред Бингама и степенных жидкостей, а также их произвольную комбинацию.

На рис. 5 аппроксимации уравнением Чеушнера отображены сплошными линиями. Значения всех аппроксимационных коэффициентов, включая критерий R^2 , представлены в таблице.

Аппроксимационные коэффициенты кривых течения

ϕ , %	a	b	c	p	R^2
0.085	-0.00597	-0.7229	0.94145	0.9511	0.999
0.077	0.002905	0.57511	-0.35898	1.0956	0.998
0.069	-0.00206	0.28267	-0.15137	1.1151	0.999
0.060	-0.00132	0.16252	-0.04969	1.2256	0.999
0.041	-0.00048	0.10032	-0.02343	1.2452	0.999
0.035	0.000461	0.06438	-0.00640	1.3832	0.999
0.055	-0.00137	0.22941	-0.1039	1.1369	0.999
0.06	-0.00046	0.06604	-0.00320	1.564	0.9999
0.015	0.000225	0.06035	-0.00291	1.5178	1.000
MBVA	0.00098	0.02837	0	0	0.999

Режим осцилляций позволяет оценить не только вязкие, но и вязкоупругие характеристики образцов. В этом режиме деформация γ задается по гармоническому закону $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$, где γ_0 – ее амплитудное значение, ω – циклическая частота. В области малых деформаций напряжение τ также меняется по гармоническому закону $\tau = \tau_0 \sin(\omega t + \delta)$, где δ – угол сдвига фаз между напряжением сдвига и деформацией. Если угол сдвига фаз отличается на $\pi/2$, такое тело называют вязким. Если угол сдвига фаз находится в пределах $\pi/2 > \delta > 0$, такое тело называют вязкоупругим. За количественную меру вязкоупругости удобно принять величину угла сдвига фаз δ .

На рис. 6 представлены типичные зависимости величины угла сдвига фаз δ от касательного напряжения τ .

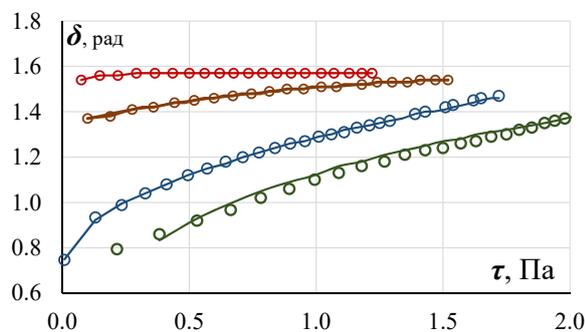


Рис. 6. Зависимость угла сдвига фаз δ от касательных напряжений τ

Верхняя кривая построена для чистой дисперсионной среды (MBVA). Здесь проявление вязкоупругих свойств заметно только на начальном участке кривой. При допировании MBVA углеродными

нанотрубками вязкоупругие свойства образцов тем больше, чем больше концентрация наполнителя. Это свидетельствует об образовании в образцах структурной сетки частиц наполнителя, которая постепенно разрушается под действием сдвигового потока. Сплошные кривые на рис. 6 соответствуют аппроксимациям уравнением Чеушнера. Экстраполируя аппроксимационные зависимости до значения $\pi/2$, можно оценить при каких значениях τ^* происходит разрушение структуры и течение становится чисто вязким. Сводные результаты расчетов показаны на рис. 7.

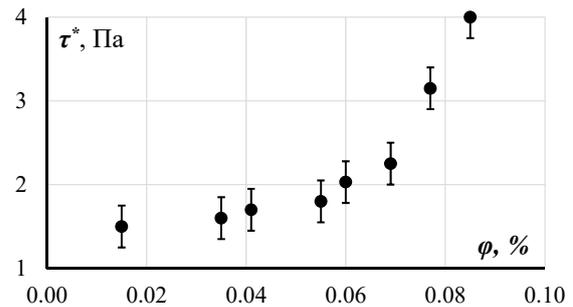


Рис. 7. Зависимость напряжений сдвига τ^* , необходимых для разрушения структуры, от концентрации нанотрубок

4. Заключение

Выполнено экспериментальное исследование фазовых переходов и реологических характеристик нематического жидкого кристалла MBVA, допированного углеродными нанотрубками.

Показано, что добавление углеродных нанотрубок изменяет температуру фазового перехода «нематик–изотропная жидкость». Построена зависимость температуры перехода от концентрации нанотрубок. Показано, что значение температуры перехода заметно уменьшается при малых концентрациях углеродных нанотрубок. При дальнейшем добавлении оно изменяется в пределах малого диапазона температур (около 1°C), а при $\phi > 0.077$ незначительно увеличивается.

Показано, что допирование нанотрубками увеличивает комплексную вязкость жидкости и смесь, в отличие от чистого MBVA, проявляет вязкоупругие свойства. Степень вязкоупругости зависит от концентрации наночастиц и скорости деформации сдвигового потока. При определенном значении деформации структура разрушается и смесь проявляет чисто вязкое поведение. Определены значения деформации, соответствующие переходу смесей из вязкоупругого в вязкое состояние.

Список литературы

1. Кондрашов С. В., Шапкеев К. А., Попков О. В., Соловьянчик Л. В. Физико-механические свойства нанокompозитов с УНТ (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 5(41). С. 61–83.

2. Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М.: Книжный дом «Либроком». 2013. 480 с.
3. Dierking I. Textures of liquid crystals. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA. 2003. 218 p.
4. Lynch M. D., Patrick D. L. Organizing carbon nanotubes with liquid crystals // *Nano Letters*. 2002. Vol. 2. N. 11. P. 1197–1201.
5. Dierking I., Scalia G., Morales P. Liquid crystal-carbon nanotubes dispersion. // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 97. N. 4. 044309.
6. Huang C. Y., Hu C. Y., Pan H. C., Lo K. Y. Electrooptical response of carbon nanotube-doped liquid crystal devices // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 44. N. 11. P. 8077–8081.
7. Подъячева О. Ю., Матус Е. В., Субоч А. Н., Жаркова Г. М. Оптические свойства полимерно-дисперсных жидкокристаллических композитов, допированных углеродными нанотрубками // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2018. Вып. 18 (3). С. 53–58.
8. Dierking I., Scalia G., Morales P. Liquid crystal-carbon nanotubes dispersion. // *Journal of Applied Physics*. 2005. Vol. 97. N. 4. 044309.
9. Koval'chuk A., Dolgov L., Yaroshchuk O. Dielectric studies of dispersion of carbon nanotubes in liquid crystal 5CB // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 2008. Vol. 11. N. 4. P. 337–341.
10. Baik I. S., Jeon S. Y., Lee S. H., Park K. A., Jeong S. H., An K. H., Lee Y. H. Electrical-field effect on carbon nanotubes in a twisted nematic liquid crystal cell // *Applied Physics Letters*. 2005. Vol. 87. N. 26, 263110.
11. Basu R., Iannacchione G. S. Nematic anchoring on carbon nanotubes // *Applied Physics Letters*. 2009. Vol. 95. N. 17, 173113.
12. Якемсева М. В., Усольцева Н. В. Вязкоупругие свойства композита холестерический жидкий кристалл – многостенные углеродные нанотрубки // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. 2013. Вып. 2 (44). С. 90–94.
13. Dunmur D., Fukuda A., Luckhurst G. Physical properties of liquid crystals: nematics. United Kingdom: INSPEC. 2001. 693 p.
14. Aouada F. A., M. R. de Maura, Fernandes P. R. G., Rubira A. F., Muniz E. C. Optical and morphological characterization off polyacrylamide hydrogel and liquid crystal systems // *European Polymer Journal*. 2001. Vol. 9. N. 9. P. 2134–2141.
15. Шрам Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: Колос С, 2003. 312 с.
16. Tscheuschner D. D. Rheological and processing properties of fluid chocolate // *Rheology*. 1994. P. 83–88.

References

1. Kondrashov S. V., Shashkeev K. A., Popkov O. V., Solov'yanchik L. V. Fiziko-mekhanicheskie svojstva nanokompozitov s UNT (Physico-mechanical properties of nanocomposites with carbon nanotubes). *Trudy VIAM*, 2016, no. 5(41), pp. 61–83. (In Russian)
2. Blinov L. M. *Zhidkie kristally: struktura i svojstva* (Liquid crystals: structure and properties). Moscow: Librokom, 2013, 480 p. (In Russian)
3. Dierking I. *Textures of liquid crystals*. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co KGaA, 2003, 218 p.
4. Lynch M. D., Patrick D. L. Organizing carbon nanotubes with liquid crystals. *Nano Letters*, 2002, vol. 2, no. 11, pp. 1197–1201.
5. Dierking I., Scalia G., Morales P. Liquid crystal-carbon nanotubes dispersion. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 4, 044309.
6. Huang C. Y., Hu C. Y., Pan H. C., Lo K. Y. Electrooptical response of carbon nanotube-doped liquid crystal device. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 44. no. 11, pp. 8077–8081.
7. Pod'yacheva O. Yu., Matus E. V., Suboch A. N., Zharkova G. M. Optical properties of polymer dispersed liquid cryrtalline composites doped by carbon nanotubes. *Liquid Crystals and their Application*, 2018, vol. 18 (3), pp. 53–58. (In Russian)
8. Dierking I., Scalia G., Morales P. Liquid crystal-carbon nanotubes dispersion. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 97, no. 4, 044309.
9. Koval'chuk A., Dolgov L., Yaroshchuk O. Dielectric studies of dispersion of carbon nanotubes in liquid crystal 5CB. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics*, 2008. vol. 11. no. 4, pp. 337–341.
10. Baik I. S., Jeon S. Y., Lee S. H., Park K. A., Jeong S. H., An K. H., Lee Y. H. Electrical-field effect on carbon nanotubes in a twisted nematic liquid crystal cell. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87. no. 26, 263110.
11. Basu R., Iannacchione G. S. Nematic anchoring on carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 2009. vol. 95. no. 17, 173113.
12. Yakemseeva M. V., Usol'ceva N. V. Viscoelastic properties of cholesteric liquid crystal – multiwall carbon nanotubes composite. *Liquid Crystals and their Application*, 2013, vol. 2 (44), pp. 90–94. (In Russian)
13. Dunmur D., Fukuda A., Luckhurst G. *Physical properties of liquid crystals: nematics*. United Kingdom: INSPEC, 2001, 693 p.
14. Aouada F. A., M. R. de Maura, Fernandes P. R. G., Rubira A. F., Muniz E. C. Optical and morphological characterization off polyacrylamide hydrogel and liquid crystal systems. *European Polymer Journal*, 2001. vol. 9. no. 9, pp. 2134–2141.

15. Scramm G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. Karlsruhe, Germany: Gebrüder HAAKE, 1994, 290 p.
16. Tscheuschner D. D. Rheological and processing properties of fluid chocolate. *Rheology*, 1994, pp. 83–88.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Гилев В. Г., Каримов А. А. Экспериментальное исследование реологических свойств жидкого кристалла, модифицированного углеродными нанотрубками// Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 3. С. 37–43. doi: 10.17072/1994-3598-2021-3-37-43

Please cite this article in English as:

Gilev V. G., Karimov A. A. Experimental investigation of the rheological properties of liquid crystal modified with carbon nanotubes. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 3, pp. 37–43. doi: 10.17072/1994-3598-2021-3-37-43

Сведения об авторах

1. *Валерий Григорьевич Гилев*, канд. физ.-мат. наук, доцент; доцент кафедры физики фазовых переходов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.
2. *Айшат Айнурович Каримов*, студент физического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.

Author information

1. *Valeriy G. Gilev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Associated Professor of the Department of Phase Transition Physics, Perm State University, Bukirev str. 15, 614990, Perm, Russia.
2. *Aishat A. Karimov*, student of the Physical Faculty, Perm State University, 15 Bukireva str., Perm, 614990.