

**Научная статья**

УДК 544.25

## **ОРИЕНТАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА В ДВУХФАЗНЫХ МИКРОФЛЮИДНЫХ СИСТЕМАХ**

Артем Николаевич Безруков\*, Олег Алексеевич Потапов, Валентина Владимировна Осипова,  
Юрий Геннадьевич Галяметдинов

*Казанской национальной исследовательский технологический университет, Казань, Россия*

---

### **ИНФОРМАЦИЯ**

**История статьи:**

Поступила 15.11.2022

Одобрена 20.12.2022

Принята 25.12.2022

---

**Ключевые слова:**

микрофлюидика,  
нематический жидкий  
кристалл,  
микроэмульсии,  
лаборатория-на-чипе

### **АННОТАЦИЯ**

Методом поляризационной оптической микроскопии исследовано ориентационное поведение нематического жидкого кристалла ЖК-1282 в двухфазных системах микрофлюидного устройства. Проанализированы условия формирования различных типов дисперсных систем ЖК – вода в микрофлюидном канале. Показано, что для систем, в которых изучаемый ЖК является дисперсионной средой, характерна ориентация молекул мезогена перпендикулярно стенкам микроканала при средней скорости потока до 50 мкм/с. При дальнейшем увеличении скорости потока наблюдается переход к ориентации молекул мезогена вдоль оси микроканала. Для систем, в которых изучаемый ЖК-1282 является дисперсной фазой, ориентационное поведение молекул ЖК определяется размером капли. В малоподвижных крупных каплях также наблюдалась ориентация молекул мезогена перпендикулярно стенкам микроканала. При средней скорости потока более 100 мкм/с в подобных каплях происходит переход к хаотичной динамике доменов мезофазы, обусловленный конвекционными потоками в капле. Для капель диаметром меньше ширины микроканала характерна гомеотропная ориентация молекул мезогена с текстурой «мальтийский крест». Показано, что в каплях ЖК-фазы, иммобилизованных на стенках канала, данное ориентированное состояние сохраняется при средней скорости потока до 10 мм/с и наблюдается обратимая деформация геометрии текстуры пропорционально скорости потока. Выявленные закономерности позволяют осуществлять направленное регулирование свойств ЖК-систем в двухфазных потоках микрофлюидных устройств, а также рассматривать изученные системы как возможные компоненты микросенсоров для измерения скорости среды в устройствах «лаборатория-на-чипе».

---

**DOI:**

**10.18083/LCApp1.2023.1.28**

---

**Для цитирования:**

Безруков А. Н., Потапов О. А., Осипова В. В., Галяметдинов Ю. Г. Ориентационное поведение нематического жидкого кристалла в двухфазных микрофлюидных системах // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 1. С. 28–38.

---

\*Адрес для переписки: [artem\\_bezrukov@kstu.ru](mailto:artem_bezrukov@kstu.ru)

© Безруков А. Н., Потапов О. А., Осипова В. В., Галяметдинов Ю. Г., 2023

**Original Article**

**ORIENTATIONAL BEHAVIOR OF NEMATIC LIQUID CRYSTALS IN TWO-PHASE MICROFLUIDIC SYSTEMS**

Artem N. Bezrukov\*, Oleg A. Potapov, Valentina V. Osipova, Yuriy G. Galyametdinov

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

---

**ARTICLE INFO:**

**Article history:**

Received 15 November 2022

Approved 20 December 2022

Accepted 25 December 2022

---

**Key words:**

microfluidics,  
nematic liquid crystal,  
microemulsions,  
laboratory-on-chip

**ABSTRACT**

---

The orientational behavior of nematic liquid crystal ZhK-1282 in two-phase microfluidic flows was studied by polarizing optical microscopy. The microfluidic flow conditions that result in formation of various disperse systems in flows of liquid crystal (LC) and water were analyzed. It was shown that if liquid crystal is a continuous medium, LC molecules align perpendicular to microchannel walls at average flow velocities below 50  $\mu\text{m/s}$ . Further increase of flow velocity results in the transition to the axial alignment of LC molecules. If liquid crystal is a dispersed phase, the orientational behavior of LC molecules depends on the size of microfluidic droplets. In sedentary and large cylindrical droplets, LC molecules also align perpendicular to microchannel walls. If average flow velocity exceeds 100  $\mu\text{m/s}$ , we observe the transition to chaotic dynamics of LC domains due to convection in such droplets. When droplet diameter is below a microchannel width, LC molecules demonstrate homeotropic alignment represented by the “Maltese cross” texture in polarized light. In LC droplets immobilized on microchannel walls, such aligned state was shown to be stable at average flow velocities up to 10 mm/s. With the increase of flow velocity, a reversible and proportional deformation of this texture was observed. The revealed effects allow to perform on-demand control of properties of microfluidic two-phase LC systems and consider these systems as possible components of flow rate microsensors in “laboratory-on-chip” microfluidic devices.

---

**DOI:**

10.18083/LCAppl.2023.1.28

---

**For citation:**

Bezrukov A. N., Potapov O. A., Osipova V. V., Galyametdinov Yu. G. Orientational behavior of nematic liquid crystals in two-phase microfluidic systems. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (1), 28–38 (in Russ.).

---

\*Corresponding author: artem\_bezrukov@kstu.ru

© Bezrukov A. N., Potapov O. A., Osipova V. V., Galyametdinov Yu. G., 2023

## Введение

В последние годы значительный фундаментальный и практический интерес исследователей привлекают процессы с участием надмолекулярно-организованных сред в микрофлюидных устройствах [1, 2]. Надмолекулярно-организованные системы на основе жидких кристаллов (ЖК) в микрожидкостных «чипах» находят применение в фотонике [3, 4], в качестве биосенсоров [5–7] и систем защитной маркировки [8, 9], а также в качестве компонентов люминесцентных термометров [10, 11] и темплатов для получения полимерных микрочастиц [12].

Неравновесный характер протекания процессов в микрофлюидных каналах открывает новые возможности направленного регулирования свойств высокоорганизованных сред [2] и жидких кристаллов, в частности [13]. В однофазных микрофлюидных системах, в которых поток жидкого кристалла протекает по всей ширине канала, выявлен сложный характер ориентационного поведения молекул мезогена. В зависимости от скорости потока может наблюдаться как гомеотропная, так и планарная ориентация молекул ЖК относительно стенок микроканала [14–16], а также неравномерное изменение ориентационного состояния мезофазы по ширине канала, обусловленное пуазейлевским характером течения [16–18].

В отличие от однофазной микрофлюидики, многофазные микрофлюидные системы, такие как микроэмульсии, позволяют получать высокоорганизованные среды в формате монодисперсных микрочастиц [19–21]. Микрокапли ЖК являются удобными объектами для применения как в диагностических микрофлюидных устройствах [7], так и в качестве компонентов «умных» материалов [4]. Размер капли дисперсной фазы, и условия ее образования оказывают значительное влияние на характер физико-химических процессов, протекающих в микроканале [19, 22, 23], и могут быть дополнительными факторами регулирования ориентационного состояния молекул мезогена. Вместе с тем в исследованиях по ориентационному поведению жидких кристаллов в микроканалах преобладающее внимание уделяется однофазным потокам ЖК-систем. Основной объем публикаций в области капельной микрофлюидики посвящен вопросам генерации капель ЖК-эмульсий методом фокусировки потока [21, 24, 25] и анализирует

ориентационное состояние молекул мезогена в небольших каплях [25, 26], распределенных в микроканале, без систематического изучения влияния скорости потока и условий формирования дисперсной фазы на ориентационное поведение жидкого кристалла.

Настоящая работа является продолжением исследований по изучению ориентационного поведения, реологических и оптических свойств ЖК-систем в макроскопических условиях и в микрофлюидных каналах [27–29]. Целью работы является изучение ориентационного поведения нематического жидкого кристалла ЖК-1282 в системе ЖК – вода в микрофлюидном канале и выявление возможностей регулирования свойств данной системы путем изменения параметров работы микрожидкостного устройства.

## Эксперимент

Ориентационное поведение ЖК-системы в микрофлюидном канале исследовалось методом поляризационной оптической микроскопии (ПОМ) на микроскопе *Olympus BX51* с высокоточной нагревательной системой *Linkam*. Фотографирование исследуемых систем в микроканале осуществляли при сто- и пятисоткратном увеличении.

Мезофаза в жидкокристаллической смеси ЖК-1282 существует в широком диапазоне температур (253,1–335,1 К) и состоит из алкокисицианобифенилов (47 мас. %), эфира Демуса (48 мас. %) и эфира Грея (5 мас. %).

Изготовление микрофлюидных устройств осуществлялось методом фотолитографии [30]. Фотошаблоны с негативным изображением структуры микроканалов были разработаны в программе *AutoCAD*. Печать фотошаблонов осуществлялась в компании *CAD/Art Services*, разрешение печати составляло 20 000 точек на квадратный дюйм.

Матрицы для микрофлюидных устройств изготавливались путем нанесения негативного фоторезиста SU-8 на пластину монокристаллического кремния методом *spin coating* и последующей обработки фоторезиста ультрафиолетовым излучением через фотошаблон. Толщина нанесенного слоя фоторезиста составляла 100 мкм. Нанесение слоя фоторезиста заданной толщины, подготовка фоторезиста к УФ-обработке

и его постобработка осуществлялись в соответствии со спецификациями производителя фоторезиста SU-8.

В качестве материала для изготовления микрофлюидных устройств использовался полидиметилсилоксан (ПДМС). Для изготовления устройств навеску ПДМС смешивали с отвердителем в массовом соотношении 10:1, выдерживали под вакуумом в течение 30 мин для удаления пузырьков воздуха и заливали полимером заранее приготовленную матрицу до образования слоя ПДМС толщиной 3–4 мм. Оставшийся полимер помещали в чашку Петри для изготовления подложки (толщина слоя ПДМС подложки составляла 2–3 мм). Отверждение полимера проводили в течение 4 ч при температуре 60 °С. Отвержденный ПДМС осторожно отделяли от матрицы и соединяли с подложкой после обработки контактирующих поверхностей в кислородной плазме на приборе *Harrick Plasma Cleaner PDC-32G* в течение 1 мин.

Для экспериментов и расчетов использовались микрофлюидные устройства с каналами

длиной 16 мм и радиусом 100–200 мкм, время работы микрочипа в каждом эксперименте составляло 5–10 мин. Для подачи растворов реагентов и растворителя в микрофлюидные каналы использовали шприцевые насосы *Shenchen ISPLab01*. Объемные расходы образцов составляли 0,1–5 мкл/мин. Образцы в микроканале фотографировали на расстоянии 8 мм от входа в микроканал.

### Результаты и их обсуждение

Для получения многофазных микрофлюидных систем используются микрожидкостные устройства, в которых 2–3 входных канала объединяются в одной точке в единый основной канал. Компоненты, представленные, как правило, двумя несмешивающимися жидкостями, подаются через входные каналы и формируют многофазную систему в основном канале. На рисунке 1 представлен дизайн микрофлюидного устройства, которое использовалось в настоящей работе.

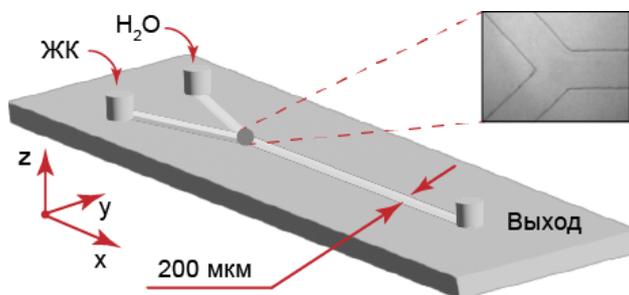


Рис. 1. Модель микрофлюидного устройства для получения двухфазных систем ЖК – вода. Геометрические параметры устройства: длина входных каналов – 4 мм, основного канала – 16 мм. Ширина и высота всех каналов – 200 мкм и 100 мкм, соответственно

Fig. 1. The model of the microfluidic device used for production of two-phase LC – water systems. Geometry of the chip: the lengths of inlet channels and the main channel are 4 mm and 16 mm, respectively; the width and height of all channels are 200  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$ , respectively

Входные каналы, через которые осуществляется подача ЖК и водной фазы, объединяются под углом 90° и формируют основной канал. Данное устройство относится к стандартным микрофлюидным «чипам» с перекрестными каналами (*cross-flow*) [19] и широко применяется как в фундаментальных исследо-

ваниях, так и на практике для получения микроэмульсий.

В зависимости от соотношения расходов водной и органической фаз и общей скорости потока в основном канале микрофлюидного устройства, возможно формирование широкого спектра различных многофазных систем –

эмульсий типа «вода в масле» и «масло в воде» с каплями дисперсной фазы различного размера и формы, а также параллельных потоков водной и органической фаз по всей длине микроканала [19, 22]. Соответственно, первый этап исследования был посвящен выявлению гидродинамических режимов работы микрочипа, в которых возможно формирование различных типов двухфазных систем ЖК – вода.

Согласно литературным данным [19, 22, 31, 32], формирование многофазных систем в микрофлюидном канале регулируется рядом безразмерных параметров, к которым можно отнести капиллярное число  $Ca$ , отношение объемных расходов компонентов  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}}$  и отношение их вязкостей  $\eta_{\text{ЖК}}/\eta_{\text{H}_2\text{O}}$ . Капиллярное число выражает соотношение между вязким трением и поверхностным натяжением:

$$Ca = U\eta/\sigma, \quad (1)$$

где  $U$  – средняя скорость потока в основном канале,  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\sigma$  – коэффициент межфазного натяжения. При малых значениях капиллярного числа ( $Ca < 10^{-2}$ ) образуются капли дисперсной фазы, диаметр которых совпадает с шириной микроканала. При больших значениях капиллярного числа ( $Ca > 10^{-1}$ ) в микроканале могут формироваться параллельные потоки водной и органической фаз. В области промежуточных значений капиллярного числа возможно образование капель дисперсной фазы различного размера.

Анализ реологических свойств жидких кристаллов в макроскопических условиях

показывает, что их поведение при различных скоростях сдвига хорошо описывается моделью Кэссона, в которую заложено течение стержнеобразных агрегатов, способных к ориентации в сдвиговом поле [29, 33]. Данная модель предсказывает неравномерное влияние скорости сдвига на вязкость мезофазы. Поток жидкости в микрофлюидном канале представляет собой сложную микрореологическую систему с неравномерным профилем сдвиговых напряжений по ширине и высоте канала в связи с пуазейлевским характером течения [32]. В отличие от потоков ньютоновских жидкостей, в потоке жидкого кристалла в микроканале следует ожидать сложного взаимного влияния скорости потока и вязкости мезофазы, что затрудняет точную оценку вклада вязкости ЖК в величину капиллярного числа и отношение вязкостей водной и органической сред.

Соответственно, в данной работе значения капиллярного числа для различных условий в микроканале не рассчитывались. Регулирование режимов формирования двухфазных сред ЖК-1282 – вода осуществлялось варьированием отношения  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}}$  и приблизительной средней скорости потока [19] в основном канале без учета вязкостных изменений:

$$U_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ЖК}} + Q_{\text{H}_2\text{O}}}{WH}, \quad (2)$$

где  $W$  и  $H$  – ширина и высота основного микроканала, соответственно. Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

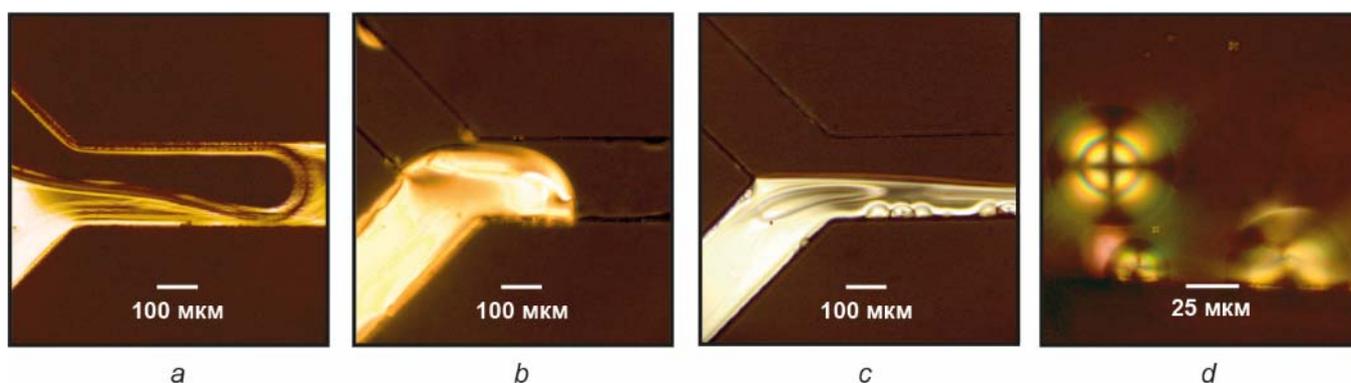


Рис. 2. Фотографии двухфазных систем ЖК-1282 – вода, полученные методом поляризационной оптической микроскопии. Средняя скорость потока и соотношения объемных расходов компонентов:  $a - U = 100 \text{ мкм/с}$ ,  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 10$ ;  $b - U = 100 \text{ мкм/с}$ ,  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$ ;  $c - U = 4 \text{ мм/с}$ ,  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$ ;  $d$  – неподвижные образцы дисперсной фазы ЖК в потоке водной фазы

Fig. 2. Polarized optical microscopy photos of two-phase ZhK-1282 – water systems. Flow rate ratios and average flow velocities:  $a - U = 100 \text{ }\mu\text{m/s}$ ,  $Q_{\text{LC}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 10$ ;  $b - U = 100 \text{ }\mu\text{m/s}$ ,  $Q_{\text{LC}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$ ;  $c - U = 4 \text{ mm/s}$ ,  $Q_{\text{LC}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$ ;  $d$  – immobilized LC droplets in water flow

Стандартным подходом к формированию дисперсных систем в микроканале является значительное увеличение объемного расхода одной из фаз ( $Q_1 \approx 10Q_2$ ) [19]. Как следует из рис. 2, при средней скорости потока 100 мкм/с формируются дисперсия водной фазы в ЖК при  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 10$  (рис. 2, *a*) и дисперсия ЖК в водной фазе при  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$  (рис. 2, *b*). Отрыв формирующейся капли происходит в непосредственной близости от точки соединения входных каналов. Капли имеют цилиндрическую форму, их диаметр совпадает с шириной канала, а длина в 4–5 раз превышает ширину. Увеличение средней скорости потока приводит к смещению зоны отрыва капли к выходу из основного канала для обоих типов дисперсий. При средней скорости потока  $\sim 800$ – $1000$  мкм/с весь основной канал занимают параллельные потоки водной фазы и ЖК (рис. 2, *c*). При последующем отключении потока ЖК на стенках микроканала остаются капли мезофазы различного размера (рис. 2, *d*), которые удерживаются в потоке водной фазы при скоростях до 20–30 мм/с.

Данные результаты в целом аналогичны описанному в литературе поведению двух несмешивающихся ньютоновских жидкостей [19] в микрофлюидном канале при увеличении значений

капиллярного числа с ростом средней скорости потока. При малых средних скоростях потока ЖК и водной фазы 50–500 мкм/с в изученной системе наблюдается формирование эмульсий. С дальнейшим ростом средней скорости потока в изученной системе происходит переход от крупных цилиндрических капель к двум параллельным потокам ЖК – вода. При этом промежуточный режим, в котором возможно регулирование размеров формирующихся капель, практически не наблюдается. Это может быть обусловлено сложным характером изменения вязкости мезофазы в микроканале и, соответственно, неравномерным вкладом сил вязкого трения в формирование дисперсной системы.

Фотографии двухфазных систем ЖК – вода в микроканале, полученные в поляризованном свете и приведенные на рис. 2, свидетельствуют о различном ориентационном состоянии молекул мезогена в данных системах. Соответственно, на следующем этапе работы было проанализировано ориентационное поведение жидкого кристалла в режимах, приведенных на рис. 2, при варьировании средней скорости потока. Результаты для режима, в котором мезофаза является дисперсионной средой, приведены на рис. 3.

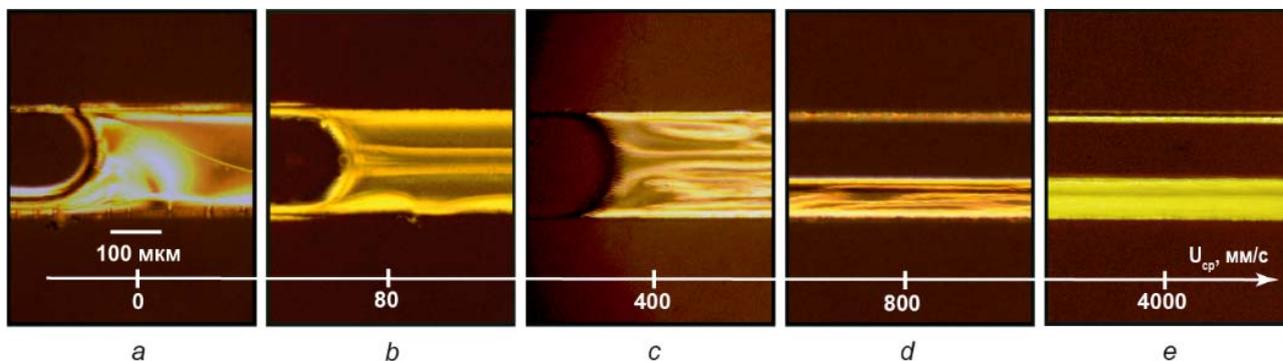


Рис. 3. Фотографии двухфазных систем ЖК-1282 – вода, полученные методом поляризационной оптической микроскопии в режиме  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 10$  и средней скорости потока: *a* –  $U = 0$ ; *b* –  $U = 80$  мкм/с; *c* –  $U = 400$  мкм/с; *d* –  $U = 800$  мкм/с; *e* –  $U = 4000$  мкм/с. Расстояние от начала основного канала 8 мм

Fig. 3. Polarized optical microscopy photos of two-phase ZhK-1282 – water systems at  $Q_{\text{LC}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 10$  and average flow velocities: *a* –  $U = 0$ ; *b* –  $U = 80$  μm/s; *c* –  $U = 400$  μm/s; *d* –  $U = 800$  μm/s; *e* –  $U = 4000$  μm/s. Distance from the start of main channel is 8 mm

В неподвижной системе (рис. 3, *a*) наблюдаются обширные области светлых и темных тонов, вид которых в поляризованном свете значительно отличается от вида капли водной фазы. Поворот плоскости поляризации не оказывает значительного влияния на вид мезофазы. Согласно

литературным данным [14], выявленное поведение образца ЖК свидетельствует о его гомеотропном ориентировании, при котором молекулы мезогена ориентированы под прямым углом к стенкам микроканала или незначительно отклоняются от прямого угла.

Это согласуется с литературными данными, согласно которым гомеотропное ориентирование в целом характерно для мезофазы в микрофлюидных устройствах, изготовленных из ПДМС [26].

Изменение данного ориентированного состояния наблюдается уже при средней скорости потока от 50–80 мкм/с (рис. 3, *b*). Появление выраженной центральной области, симметричной относительно оси канала, может быть обусловлено переориентацией молекул мезогена параллельно оси потока [34], что согласуется с полученными ранее данными для однофазных ЖК-систем, свидетельствующих о том, что в центральной верхней области прямоугольного канала наблюдается максимальная скорость сдвига [27]. При увеличении средней скорости потока до 400–500 мкм/с в фазе ЖК наблюдается структура доменов с различным ориентированием молекул мезогена (рис. 3, *c*), вытянутых вдоль оси потока. При дальнейшем расслоении эмульсии в микроканале на параллельные потоки ЖК и водной фазы при средней скорости потока  $\sim 0,8$ –1 мм/с (рис. 3, *d*) данное ориентационное поведение сохраняется. При увеличении средней скорости потока до 3–4 мм/с наблюдается переход к планарной ориентации молекул мезогена вдоль оси потока (рис. 3, *e*).

В целом установленное ориентационное поведение дисперсионной среды ЖК в двухфазных системах ЖК – вода согласуется с полученными

ранее результатами для однофазных потоков изученной мезофазы [27] и литературными данными по однофазным микрофлюидным потокам нематических ЖК [14, 15, 34]. Это свидетельствует о преобладающем влиянии средней скорости потока на ориентационное состояние мезофазы в данных двухфазных системах без значительного эффекта от присутствующих в микроканале капель водной фазы.

Выявленные закономерности показывают высокую чувствительность ЖК к скоростному режиму в микроканале. Изменения в ориентационном состоянии мезофазы наблюдаются уже при незначительной скорости потока  $\sim 50$  мкм/с. Дальнейшие переходы между ориентационными состояниями и формой двухфазной системы (эмульсия – параллельные потоки фаз) происходят обратимо и в узком диапазоне средних скоростей потока. Это свидетельствует о перспективности подобных систем как возможных детекторов наличия потока в каналах микрофлюидного устройства и анализаторов качественных изменений скорости потока в диапазоне от 50 мкм/с до 1 мм/с.

На следующем этапе работы было изучено ориентационное поведение образцов ЖК-1282 при образовании ими дисперсионной фазы в микрофлюидной системе ЖК – вода. Результаты приведены на рис. 4.

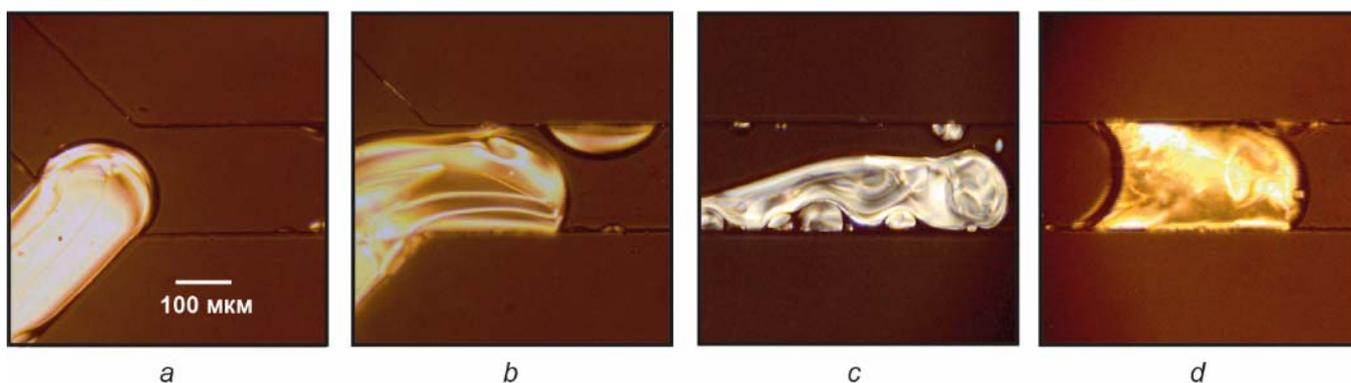


Рис. 4. Фотографии двухфазных систем ЖК-1282 – вода, полученные методом поляризационной оптической микроскопии: *a* – начало формирования капли; *b* – развитие капли; *c* – отрыв капли; *d* – движение капли в микроканале. Параметры работы устройства:  $U = 400$  мкм/с,  $Q_{\text{ЖК}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$

Fig. 4. Polarized optical microscopy photos of two-phase ZhK-1282 – water systems: *a* – droplet begins to form; *b* – droplet continues to form; *c* – droplet detachment; *d* – droplet motion in microchannel. Flow parameters:  $U = 400$   $\mu\text{m/s}$ ,  $Q_{\text{LC}}/Q_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1$

Согласно полученным данным наблюдений, в начале формирования капли мезофаза практически неподвижна (рис. 4, *a*) и демонстрирует ориентационное поведение, аналогичное неподвижному или малоподвижному ЖК в дисперсионной среде или однофазном потоке. При развитии капли (рис. 4, *b*) скорость ее движения незначительно возрастает и в ней появляются характерные продольные структуры, аналогичные наблюдаемым на рис. 3, *b*. Отрыв капли сопровождается дальнейшим увеличением скорости ее движения и появлением хаотичной динамической структуры доменов с различным ориентированием молекул мезогена (рис. 4, *c*), которое может быть обусловлено конвекцией внутри капли [23]. Данное состояние сохраняется после отрыва капли (рис. 4, *d*) и наблюдается вплоть до расслоения данной эмульсии на параллельные потоки ЖК и водной фазы.

Таким образом, ЖК в дисперсной фазе демонстрирует не только высокую чувствительность к скорости каплей данной фазы в микроканале, но и позволяет охарактеризовать динамику среды внутри капли на разных стадиях ее формирования, что представляет практический интерес для моделирования протекания реакционных процессов в микрофлюидных эмульсиях, характер которых значительно зависит от условий движений среды в капле [23].

На заключительном этапе работы было проанализировано ориентационное поведение каплей эмульсии ЖК, размер которых был меньше диаметра микроканала. На рисунке 5 продемонстрирован пример подобной капли мезофазы на дне микроканала в неподвижной водной среде.

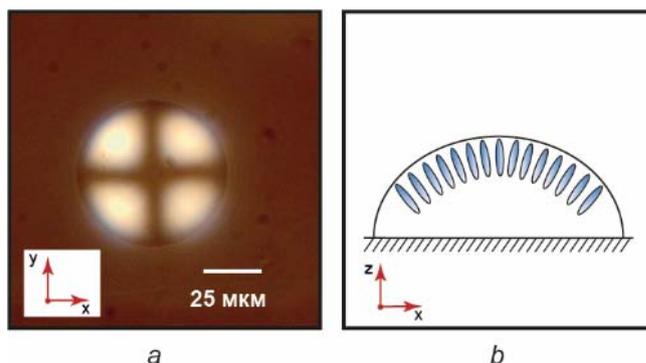


Рис. 5. Капля мезофазы на дне микроканала (*a*) и предполагаемое ориентационное состояние молекул ЖК в капле (*b*)

Fig. 5. Mesophase droplet on microchannel bottom (*a*) and assumed orientation of LC molecules in this droplet (*b*)

Как следует из рис. 5, *a*, капля мезофазы, диаметр которой меньше ширины микроканала, демонстрирует характерную текстуру типа «мальтийский крест» в поляризованном свете при скрещенных поляризаторах. Поворот плоскости поляризации сопровождается аналогичным поворотом текстуры «креста». Данная текстура наблюдалась как у каплей мезофазы, иммобилизованных на дне микроканала, так и у подвижных каплей в потоке микроканала. Подобное ориентационное поведение каплей мезофазы в микрофлюидных каналах описано в ряде работ [13, 24–26, 35] и свидетельствует о гомеотропной ориентации молекул ЖК в капле, схематично изображенной на рис. 5, *b*.

Влияние скорости потока на ориентационное поведение ЖК в каплях на дне микроканала, проанализированное в данной работе, показано на рис. 6.

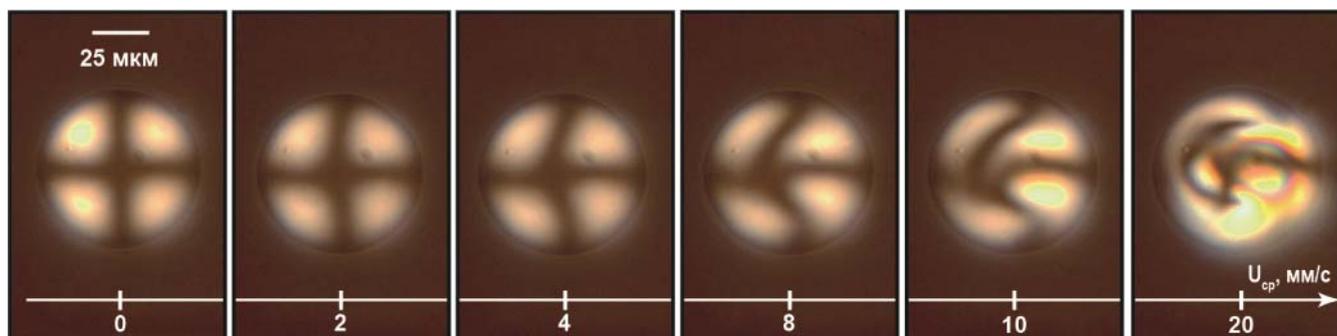


Рис. 6. Зависимость геометрии крестообразной текстуры капли ЖК на дне микроканала от средней скорости потока

Fig. 6. Dependence of the cross-shaped texture geometry of LC droplet at the bottom of a microchannel on average flow velocity

Анализ рисунка 6 показывает, что крестообразная текстура капли ЖК в поляризованном свете сохраняется при увеличении скорости потока до  $\sim 10$  мм/с. При этом наблюдается пропорциональное отклонение вертикального элемента «креста» по вектору скорости потока водной вазы. Данный эффект может быть связан с частичной переориентацией молекул мезогена вдоль потока в микроканале. При средней скорости потока 20 мм/с и более гомеотропная ориентация в капле ЖК не сохраняется, что может быть обусловлено возникновением в ней конвекционных потоков при интенсивном движении контактирующей с ней водной фазы.

Ориентационное поведение малой капли ЖК в микроканале, продемонстрированное на рис. 6, показывает ее чувствительность к изменению скорости потока в более широком диапазоне по сравнению с каплями ЖК, занимающими всю ширину микроканала, или ЖК в дисперсионной среде. Имобилизация подобных капель в структурных элементах-«ловушках» микрофлюидного канала может быть перспективным решением для их практического применения в качестве датчиков скорости среды в диапазоне  $\sim$  мм/с, который является распространенным режимом работы микрофлюидных устройств.

### Выводы

В данной работе выявлены возможности направленного регулирования ориентационного поведения жидкого кристалла ЖК-1282 в двухфазных микрофлюидных системах ЖК – вода путем варьирования скорости потока в микроканале, изменения типа дисперсной системы и размера капель дисперсной фазы.

Для систем, в которых ЖК является дисперсионной средой, ориентирование молекул, близкое к перпендикулярному относительно стенок микроканала, было реализовано при средней скорости потока до 50 мкм/с. Увеличение средней скорости потока до 2–4 мм/с позволяет осуществлять обратимую переориентацию молекул ЖК вдоль оси канала. Расслоение дисперсной системы на параллельные потоки водной и органической фаз при средней скорости потока 0,5–1 мм/с не оказывает значительного влияния на ориентационное состояние молекул мезогена.

Для систем, в которых ЖК является дисперсной фазой, возможность ориентирования молекул мезогена перпендикулярно стенкам микроканала была выявлена для малоподвижных капель с диаметром, равном ширине канала. Увеличение скорости потока до 400–500 мкм/с приводит к возникновению хаотичной динамики доменов мезофазы, обусловленной конвекцией внутри таких капель. В иммобилизованных каплях ЖК с диаметром меньше ширины канала наблюдалась гомеотропная ориентация молекул мезогена с текстурой «мальтийский крест». Установлено, что данное ориентированное состояние сохраняется при средней скорости потока до 10 мм/с и наблюдается обратимая деформация геометрии текстуры пропорционально скорости потока.

Выявленные закономерности позволяют осуществлять анализ скорости потока в микрофлюидных каналах по изменению ориентационного поведения мезофазы и открывают возможности применения дисперсных ЖК-систем как возможных компонентов микросенсоров скорости потока в устройствах «лаборатория-на-чипе». Дальнейшие исследования будут направлены на анализ влияния дополнительных факторов, таких как температура и добавки поверхностно-активных веществ, на ориентационное поведение ЖК в изученных режимах.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00. Тема исследования «Создание научных основ получения новых multifunctional материалов широкого спектра применения».

Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Нанотехнологии и наноматериалы» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

**Acknowledgments:** The work was performed using the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task for delivery of state services (performing works) of 9.12.2022 # 075-01508-23-00. Topic of research: “Development of Scientific Foundations for Synthesis of Novel Multifunctional Materials with a Broad Scope of Application”.

The study was performed using the equipment of the Center of Collective Usage “Nanotechnologies and Nanomaterials” of the Kazan National Research Technological University.

Список источников / References

1. Zhang L., Chen Q., Ma Y. and Sun J. Microfluidic methods for fabrication and engineering of nanoparticle drug delivery systems. *ACS Appl. Bio Mater.*, 2020, **3** (1), 107–120. DOI: 10.1021/acsabm.9b00853.
2. Sevim S., Sorrenti A., Franco C., Furukawa S., Pané S., Demello A.J. and Puigmartí-Luis J. Self-assembled materials and supramolecular chemistry within microfluidic environments: from common thermodynamic states to non-equilibrium structures. *Chem. Soc. Rev.*, 2018, **47** (11), 3788–3803. DOI: 10.1039/c8cs00025e.
3. Kim Y.G., Park S. and Kim S.H. Designing photonic microparticles with droplet microfluidics. *Chem. Commun.*, 2022, **58** (74), 10303–10328. DOI: 10.1039/D2CC03629K.
4. Chen H.Q., Wang X.Y., Bisoyi H.K., Chen L.J., Li Q. Liquid crystals in curved confined geometries: Microfluidics bring new capabilities for photonic applications and beyond. *Langmuir*, 2021, **37** (13), 3789–3807. DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c00256.
5. Deng J., Han D. and Yang J. Applications of microfluidics in liquid crystal-based biosensors. *Biosensors*, 2021, **11** (10), 385 (18 p.). DOI: 10.3390/bios11100385.
6. Yakimov A.S., Denisov I.A., Bukatin A.S., Lukyanenko K.A., Belousov K.I., Kukhtevich I.V., Esimbekova E.N., Evstrapov A.A., Belobrov P.I. Droplet Microfluidic Device for Chemoenzymatic Sensing. *Micromachines*, 2022, **13** (7), 1146. DOI: 10.3390/mi13071146.
7. Khan M., Liu S., Qi L., Ma C., Munir S., Yu L., Hu Q. Liquid crystal-based sensors for the detection of biomarkers at the aqueous/LC interface. *TrAC – Trends in Analytical Chemistry*, 2021, **144**, 116434. DOI: 10.1016/j.trac.2021.116434.
8. Gollapelli B., Rama Raju Ganji S., Kumar Tatipamula A. and Vallamkondu J. Bio-derived chlorophyll dye doped cholesteric liquid crystal films and microdroplets for advanced anti-counterfeiting security labels. *J. Mol. Liq.*, 2022, **363**, 119952. DOI: 10.1016/j.molliq.2022.119952.
9. Gollapelli B., Suguru Pathinti R. and Vallamkondu J. Carbon quantum dots doped cholesteric liquid crystal films and microdroplets for anti-counterfeiting. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2022, **5** (8), 11912–11922. DOI: 10.1021/acsanm.2c02933.
10. Savchuk O.A., Carvajal J.J., Massons J., Cascales C., Aguiló M. and Díaz F. Novel low-cost, compact and fast signal processing sensor for ratiometric luminescent nanothermometry. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2016, **250**, 87–95. DOI: 10.1016/j.sna.2016.08.031.
11. Kim J.W., Oh Y., Lee S. and Kim S.H. Thermochromic microcapsules containing chiral mesogens enclosed by hydrogel shell for colorimetric temperature reporters. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, **32** (9), 2107275. DOI: 10.1002/adfm.202107275.
12. Gwon S. and Park S. Preparation of uniformly sized interpenetrating polymer network polyelectrolyte hydrogel droplets from a solid-state liquid crystal shell. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2021, **99**, 235–245. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.04.032.
13. Sengupta A., Herminghaus S. and Bahr C. Liquid crystal microfluidics: surface, elastic and viscous interactions at microscales. *Liq. Cryst. Rev.*, 2014, **2** (2), 73–110. DOI: 10.1080/21680396.2014.963716.
14. Čopar S., Kos Ž., Emeršič T. and Tkalec U. Microfluidic control over topological states in channel-confined nematic flows. *Nat. Commun.*, 2020, **11** (1), 59 (10 p.). DOI: 10.1038/s41467-019-13789-9.
15. Sengupta A., Tkalec U. and Bahr C. Nematic textures in microfluidic environment. *Soft Matter*, 2011, **7** (14), 6542–6549. DOI: 10.1039/C1SM05052D.
16. Crespo M., Majumdar A., Ramos A.M., Griffiths I.M. Solution landscapes in nematic microfluidics. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2017, **351–352**, 1–13. DOI: 10.1016/j.physd.2017.04.004.
17. Sengupta A. Topological microfluidics: present and prospects. *Liq. Cryst. Today*, 2015, **24** (3), 70–80. DOI: 10.1080/1358314X.2015.1039196.
18. Anderson T.G., Mema E., Kondic L. and Cummings L.J. Transitions in Poiseuille flow of nematic liquid crystal. *Int. J. of Non-Linear Mechanics*, 2015, **75**, 15–21. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2015.04.010.
19. Anna S.L. Droplets and bubbles in microfluidic devices. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2016, **48**, 285–309. DOI: 10.1146/annurev-fluid-122414-034425.
20. Ma J., Lee S.M.Y., Yi C. and Li C.W. Controllable synthesis of functional nanoparticles by microfluidic platforms for biomedical applications – a review. *Lab on a Chip*, 2017, **17** (2), 209–226. DOI: 10.1039/c6lc01049k.
21. Hamlington B.D., Steinhaus B., Feng J.J., Link D., Shelley M.J. and Shen A.Q. Liquid crystal droplet production in a microfluidic device. *Liq. Cryst.*, 2007, **34** (7), 861–870. DOI: 10.1080/02678290601171485.
22. Battat S., Weitz D.A. and Whitesides G.M. Nonlinear phenomena in microfluidics. *Chem. Rev.*, 2022, **122** (7), 6921–6937. DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00985.
23. Song H., Tice J.D. and Ismagilov R.F. A Microfluidic system for controlling reaction networks in time. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2003, **42** (7), 768–772. DOI: 10.1002/anie.200390203.
24. Takenaka Y., Škarabot M. and Mušević I. Nematic liquid-crystal Necklace structure made by microfluidics system. *Langmuir*, 2020, **36** (12), 3234–3241. DOI: 10.1021/acs.langmuir.0c00101.
25. Ramou E., Rebordao G., Palma S. and Roque A.C.A. Stable and oriented liquid crystal droplets stabilized by imidazolium ionic liquids. *Molecules*, 2021, **26** (19), 6044 (15 p.). DOI: 10.3390/molecules26196044.

26. Shojaei-Zadeh S. and Anna S.L. Role of surface anchoring and geometric confinement on focal conic textures in smectic-A liquid crystals. *Langmuir*, 2006, **22** (24), 9986–9993. DOI: 10.1021/la061703i.
27. Bezrukov A.N., Osipova V.V. and Galyametdinov Y.G. Orientational behavior of a nematic liquid crystal and its composite with quantum dots in a microfluidic channel. *Russ. Chem. Bull.*, 2022, **71** (10), 2092–2097. DOI: 10.1007/s11172-022-3631-y.
28. Kurilov A.D., Chausov D.N., Osipova V.V., Kuchero R.N., Belyaev V.V. and Galyametdinov Y.G. Highly luminescent nanocomposites of nematic liquid crystal and hybrid quantum dots CdSe/CdS with ZnS shell. *J. Mol. Liq.*, 2021, **339**, Article 116747. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.116747.
29. Селиванова Н. М., Галеева А. И., Галяметдинов Ю. Г. Жидкокристаллические и реологические свойства лантаноидсодержащих лиотропных многокомпонентных систем // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2009. №. 1. С. 33–42. [Selivanova N.M., Galeeva A.I., Galyametdinov Yu.G. Liquid crystalline and reological properties of lanthanide containing multicomponent lyotropic systems. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2009, (1), 33–42.
30. McDonald J.C., Duffy D.C., Anderson J.R., Chiu D.T., Wu H., Schueller O.J.A. and Whitesides G.M. Fabrication of microfluidic systems in poly(dimethylsiloxane). *Electrophoresis*, 2000, **21** (1), 27–40. DOI: 10.1002/(SICI)1522-2683(20000101)21:1<27::AID-ELPS27>3.0.CO;2-C.
31. Tabeling P. *Introduction to Microfluidics*. Oxford University Press, 2005, 310 p.
32. Berthier J. and Silberzan P. *Microfluidics for Biotechnology*. Second edition, Artech House, London, 2009, 480 p.
33. Selivanova N.M., Galeeva A.I., Galyametdinov Yu.G. Chitosan/Lactic acid systems: Liquid crystalline behavior, rheological properties, and riboflavin release in vitro. *Int. J. Mol. Sci.*, 2022, **23** (21), 13207. DOI: 10.3390/ijms232113207.
34. Sengupta A., Tkalec U., Ravnik M., Yeomans J.M., Bahr C. and Herminghaus S. Liquid crystal microfluidics for tunable flow shaping. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, **110** (4), 048303. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.048303.
35. Copar S., Ravnik M. and Žumer S. Introduction to colloidal and microfluidic nematic microstructures. *Crystals*, 2021, **11** (8), 956. DOI: 10.3390/cryst11080956.

**Вклад авторов:**

<sup>1</sup>**Безруков А. Н.** – разработка концепции научной работы, проведение исследований, подготовка иллюстраций, написание текста статьи.

<sup>2</sup>**Потапов О. А.** – проведение исследований, подготовка иллюстраций.

<sup>3</sup>**Осипова В. В.** – проведение исследований, редактирование текста статьи.

<sup>4</sup>**Галяметдинов Ю. Г.** – разработка концепции научной работы, консультация по вопросам планирования, методологии и реализации исследования.

**Contribution of the authors:**

<sup>1</sup>**Bezrukov A.N.** – development of the concept of scientific work, conducting research, preparing illustrations, writing the text of the article

<sup>2</sup>**Potapov O.A.** – conducting research, preparing illustrations.

<sup>3</sup>**Osipova V.V.** – conducting research, editing the text of the article.

<sup>4</sup>**Galyametdinov Yu.G.** – development of the concept of scientific work, consultation on planning, methodology and research implementation, editing the text of the article.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interests.**

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3253-0335>

<sup>2</sup>*orcid – отсутствующем*

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0003-2943-8893>

<sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-9128-0700>

Поступила 15.11.2022; одобрена 20.12.2022; принята 25.12.2022  
 Received 15.11.2022; approved 20.12.2022; accepted 25.12.2022