

На правах рукописи



Караави Ахмед Рахим Шилтаг

**МЕХАНИЗМ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ  
ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ  
В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ,  
ДОПИРОВАННЫХ ЗОЛОТЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**

**01.04.07 - Физика конденсированного состояния**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

ЧЕЛЯБИНСК – 2021

Работа выполнена на кафедре «Физика наноразмерных систем», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:**

Подгорнов Федор Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики наноразмерных систем, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Официальные оппоненты:**

Каманина Наталия Владимировна, д.ф.-м.н., ст.н.с., начальник отдела «Фотофизика сред с нанобъектами», АО НПО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»;

Чаусов Денис Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, заведующий учебно-научной лабораторией теоретической и прикладной нанотехнологии, ГОУ ВО МО «Московский государственный областной университет».

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук (УФИЦ РАН).

Защита состоится 26 мая 2021 г., в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.04 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1007

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на сайте:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229804/karaavi-ahmed-rahim-shiltag>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, Ученый совета университета. Тел.: (351) 2679123. e-mail: [morozovsi@susu.ru](mailto:morozovsi@susu.ru)

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2021 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.298.04

кандидат физ.-мат. наук, доцент



С.И. Морозов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Сегнетоэлектрические жидкие кристаллы (СЖК) представляют собой специфический тип жидкокристаллических материалов, обладающих как ориентационным, так и пространственным (группа симметрии  $C_2$ ) упорядочением, так и текучестью. Данная группа симметрии позволяет существование спонтанной поляризации [1].

Комбинация вышеописанных свойств приводит к трем свойствам СЖК влияющих на их возможные приложения [2]: 1) чувствительность электрооптического отклика к полярности электрического поля, 2) малое время переключения, лежащее в микросекундном диапазоне, 3) вращение оптической оси СЖК в плоскости ячейки под действием электрического поля.

В ранних работах показано, что существенную роль в формировании электрооптического отклика играют электрические параметры компонентов (СЖК и ориентирующие слои) ячейки [3-6].

В связи с этим возникает вопрос о методах изменения электрических свойств СЖК, чтобы достичь требуемого электрооптического отклика. Одним из способов оптимизации электрических параметров СЖК является инкорпорирование наноматериалов в их структуру.

В настоящее время проведено огромное число исследований свойств жидкокристаллических нанодисперсий [7-12]. Вне зависимости от типа жидких кристаллов и вида наночастиц, допирование, как правило, приводит к уменьшению времени электрооптического переключения. Кроме того, были открыты новые электрооптические моды, существование которых, было невозможно в чистых материалах. Среди всех типов наночастиц, используемых для допирования ЖК, следует особенно отметить золотые наночастицы. Данные наноматериалы отличаются химической стабильностью и уникальными физическими свойствами. Допирование данными материалами приводит к уменьшению времени электрооптического отклика СЖК. Кроме того, в нанодисперсиях СЖК было выявлено снижение спонтанной поляризации. Данные результаты приводят к выводу, что вращательная вязкость СЖК должна

уменьшаться при диспергировании наночастиц. Однако, этот вывод носит ошибочный характер, так как при расчете не учитывалось влияние изменения импеданса СЖК слоя, вызванного наличием наночастиц.

**Цель работы** - раскрыть доминирующий механизм уменьшения времени электрооптического переключения сегнетоэлектрического жидкого кристалла, допированного золотыми наночастицами. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- создание ячейки на основе дисперсии золотых наночастиц в сегнетоэлектрическом жидком кристалле CHS1;
- характеристика чистой смеси CHS1 и полученной дисперсии методом импедансной спектроскопии в интервале фазы хирального смектика С. Измерение электрооптических и материальных параметров данных образцов;
- установление эквивалентной электрической схемы и получение параметров ее компонент исследуемых образцов;
- адаптация емкостного метода измерения ионной электрической проводимости исследуемых образцов;
- установление доминирующего механизма уменьшения времени электрооптического переключения сегнетоэлектрического жидкого кристалла, допированного золотыми наночастицами.

### **Научная новизна.**

1. Впервые продемонстрирован метод измерения ионной проводимости слоя сегнетоэлектрического жидкого кристалла в ячейке с блокирующими электродами, используя емкостной ток.

2. Впервые исследованы диэлектрические и электрооптические характеристики сегнетоэлектрического жидкого кристалла CHS1, допированного золотыми наночастицами, во всем температурном диапазоне хиральной SmC фазы.

3. Впервые проведен анализ эквивалентных электрических схем СЖК ячейки, допированной золотыми наночастицами.

4. Впервые измерены температурные зависимости ионной проводимости по постоянному току слоя СЖК, допированного золотыми наночастицами, в ячейке с блокирующими электродами.

5. Впервые показано, что доминирующим механизмом уменьшения времени электрооптического переключения СЖК, допированного золотыми наночастицами, является увеличение напряжения, падающего на данном слое, вызванного уменьшением ионной проводимости СЖК.

### **Практическая значимость работы.**

Полученные результаты могут быть использованы для создания нового поколения пространственно-временных модуляторов оптического излучения и жидкокристаллических дисплеев.

### **Личный вклад автора.**

Автору принадлежит одна из основных ролей в постановке задач, выборе методов их решения, анализе результатов и их обобщении. Основные эксперименты были проведены при непосредственном участии автора. Соавторы не возражают против использования результатов исследования в материалах диссертации.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Допирование сегнетоэлектрического жидкого кристалла золотыми наночастицами приводит к уменьшению его ионной электрической проводимости по постоянному току.

2. Допирование слоя сегнетоэлектрического жидкого кристалла золотыми наночастицами приводит к увеличению доли электрического напряжения, приложенного к нему в ячейке.

3. Допирование сегнетоэлектрического жидкого кристалла золотыми наночастицами, не приводит к изменению вращательной вязкости сегнетоэлектрического жидкого кристалла

4. Время электрооптического переключения сегнетоэлектрического жидкого кристалла допированного золотыми наночастицами уменьшается,

по сравнению с недопированным сегнетоэлектрическим жидким кристаллом из-за большей величины электрического напряжения, приложенного к этому слою.

### **Апробация работы.**

Материалы, полученные при выполнении исследований, докладывались на десятой научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2018); Global Smart Industry Conference (Chelyabinsk, 2018); XVII International Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Doped with Rare Earth and Transition Metal Ions, (Екатеринбург, 2018); 26 Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (Уфа, 2020).

### **Публикации.**

Основное содержание диссертации отражено в 7 научных работах, из них 3 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для представления результатов работ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: «Liquid Crystals» и «2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC)».

### **Структура и объем работы.**

В **первой** главе приведен обзор литературы, где рассмотрены электрооптические и диэлектрические свойства сегнетоэлектрических жидких кристаллов в жидких кристаллах. Основное внимание уделено влиянию наночастиц на электрические и электрооптические свойства жидких кристаллов, а также особенностям движения микрочастиц в жидких кристаллах. В данной главе показано, что вне зависимости от типа наночастиц диспергированных в СЖК, время электрооптического переключения уменьшается примерно на 30%-50%.

**Вторая** глава посвящена описанию методик измерения физических свойств сегнетоэлектрических жидких кристаллов, а также обработке экспериментальных данных. Здесь также представлены результаты измерения диэлектрических свойств и материальных параметров СЖК и дисперсии золотых наночастиц в СЖК.

В данной главе показано, что допирование золотыми наночастицами СЖК слоя в ячейке приводит как к уменьшению спонтанной поляризации СЖК, так и к уменьшению времени электрооптического переключения.

В **третьей главе** представлены результаты, посвященные исследованию влияния золотых наночастиц на электрическую проводимость СЖК по постоянному полю. Показано, что известные способы измерения электрической проводимости слоя ЖК в ячейке с блокирующими электродами не позволяют корректно оценить эту величину, с использованием тока проводимости.

Для правильного измерения величины проводимости слоя ЖК в ячейке с блокирующими электродами был адаптирован емкостной метод. Суть данного метода состоит в измерении мнимого компонента переменного тока. С использованием данного подхода была измерена величина ионной проводимости по постоянному полю как чистого СЖК, так и СЖК, допированного наностержнями, внутри ячеек с блокирующими электродами. Из данных измерений следует, что золотые наночастицы существенно изменяют электрическую проводимость СЖК, что было объяснено адсорбцией примесных ионов наночастицами.

В **четвертой главе** представлены исследования, направленные на идентификацию доминирующего механизма уменьшения времени электрооптического переключения сегнетоэлектрического жидкого кристалла, допированного золотыми наночастицами.

Анализируя экспериментально измеренные комплексные спектры импеданса ячеек, заполненных чистым СЖК и дисперсией СЖК/ЗНЧ, получены распределения напряжения между элементами делителя напряжения. Показано, что допирование СЖК золотыми наночастицами приводит к увеличению электрического напряжения, падающего на слое СЖК. Используя данный результат, было показано, что именно этот эффект ответственен за уменьшение времени электрооптического переключения сегнетоэлектрического жидкого кристалла, допированного золотыми наночастицами. Корректный расчет

величины вращательной вязкости СЖК показал ее независимость от наличия наночастиц. Анализируя экспериментально измеренные комплексные спектры импеданса ячеек заполненной чистым СЖК и дисперсией СЖК/ЗНЧ получены распределения напряжения между элементами делителя напряжения. Показано, что допирование СЖК золотыми наночастицами приводит к увеличению электрического напряжения, падающего на слое СЖК. Используя данный результат было показано что именно этот эффект ответственен за уменьшение времени электрооптического переключения сегнетоэлектрического жидкого кристалла допированного золотыми наночастицами. Корректный расчет величины вращательной вязкости СЖК показал ее независимость от наличия наночастиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Эквивалентная электрическая цепь СЖК ячейки.

Сегнетоэлектрическая жидкокристаллическая ячейка имеет достаточно простую структуру. Она состоит из двух стеклянных подложек, разделенных слоем жидкого кристалла. На стеклянные подложки напылен проводящий слой индий оловянного оксида. Для создания упорядоченной структуры жидкого кристалла, поверхность электрода покрывается ориентирующим полимерным покрытием. Данные электроды можно считать блокирующими.

Суммируя вышесказанное, СЖК ячейку можно представить как типичный делитель напряжения (рис. 1). В результате, некоторая часть приложенного напряжения ( $V$ ) падает на ориентирующих слоях ( $V_{bdl}$ ), а оставшаяся часть на слое СЖК ( $V_{жк}$ ).

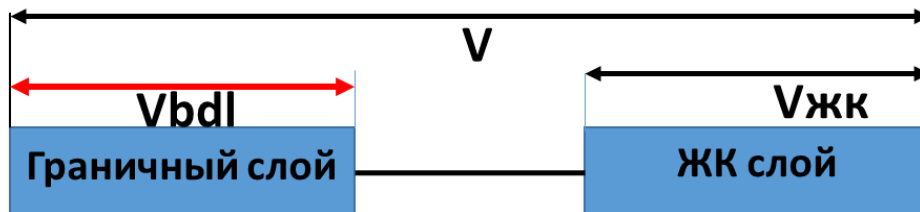


Рисунок 1. СЖК ячейка как делитель напряжения



Обычно при расчете вращательной вязкости ( $\gamma_\phi$ ) берется величина напряжения приложенного ко всей ячейки:

$$\gamma_\phi = \frac{l_{LC}\tau}{P_S V} \quad (1)$$

где  $l_{LC}$  – толщина зазора ячейки,  $\tau$  – время электрооптического переключения,  $P_S$  – спонтанная поляризация.

В данной работе будет показано, что для корректного расчета вращательной вязкости необходимо использовать величину падения напряжения на слое СЖК, а не приложенного ко всей ячейки.

### **Сегнетоэлектрическая ЖК смесь CHS1. Дисперсия золотых наночастиц в CHS1.**

Используемая в работе сегнетоэлектрическая жидкокристаллическая смесь CHS1 состоит из гомологов фенилпиримидина и хирального компонента. Данная смесь имеет последовательность фазовых переходов SmC\*-347 K-SmA-357K-Is, которая измерялась с помощью дифференциального сканирующего калориметра Linkam DSC-600). Шаг спирали CHS1 измерен из спектра кругового дихроизма (спектрометр Jasco J810-S) и равен  $p \approx 510$  нм ( $T = 298$  K).

Для приготовления нанодисперсии были использованы коммерчески доступные (Nanopartz Inc.) золотые наносферы (ЗНЧ) с радиусом  $r^{\text{ЗНЧ}} = 10^{-8}$  м. На первом этапе изготовления 10 мг ЗНЧ диспергировали в 20 мл чистого хлороформа (Sigma Aldrich) и подвергали ультразвуковой обработке (мощность – 300 Вт, частота – 10 кГц) в течение 20 минут. На втором этапе дисперсия ЗНЧ/хлороформ (0,4 мл) смешивалась со смесью СЖК (200 мг) и также подвергалась ультразвуковой обработке при температуре фазового перехода SmA-Iso в течении 5 часов. Отсутствие агломераций ЗНС было подтверждено при исследовании образца методом темнопольной оптической микроскопии (микроскоп Olympus BX-51).

Наличие наночастиц золота внутри дисперсии было подтверждено с помощью ЦД спектроскопии путем наблюдения характерной полосы в окрестности локализованного поверхностного плазмонного резонанса ЗНЧ. В пределах точности ( $\approx 0,1$  К) влияние наночастиц на фазовые переходы СЖК не наблюдалось.

### **Электрооптическая характеристика жидкокристаллических ячеек.**

Электрооптические характеристики ячеек измерялись с помощью установки, состоящей из He-Ne лазера ( $\lambda = 632,8$  нм,  $P = 10$  мВт), генератора сигналов произвольной формы (Tektronix), усилителя напряжения (FLC Electronics, FLC20A), цифрового осциллографа (Tektronix 1002B), p-i-n фотодиода (Thorlabs), вращающегося столика и термоконтролера (Linkam, LTS-420).

Для измерения времени отклика ( $\tau$ ) и угла наклона ( $\theta$ ) к ячейкам прикладывали биполярный прямоугольный сигнал с амплитудой  $V = 10$  В и частотой  $f = 10$  Гц. Для измерения спонтанной поляризации использовался биполярный сигнал треугольной формы с такими же амплитудой и частотой. Все параметры материала ( $P_s$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ ) измерялись в температурном диапазоне фазы SmC\* смеси CHS1.

Исследования показали, что угол наклона слоев  $\theta$  СЖК смеси не зависит от наличия ЗНЧ. В пределах точности измерений, ЗНЧ также не влияют на величину спонтанной поляризации СЖК (рис. 2). С другой стороны, как следует из данных представленных на рис. 2, время электрооптического отклика чистого СЖК заметно выше времени переключения СЖК/ЗНЧ дисперсии.

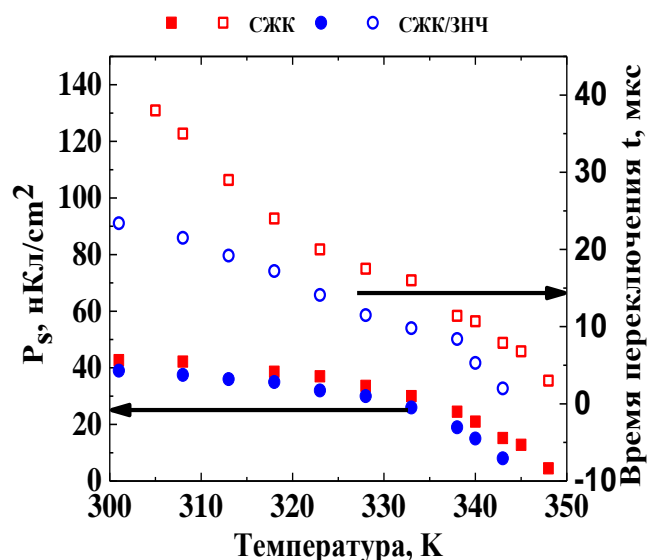


Рисунок 2. Зависимость спонтанной поляризации и времени электрооптического переключения чистого СЖК и СЖК/ЗНЧ

Используя формулу 1, можно рассчитать вращательную вязкость СЖК слоя. На (рис. 3) приведена температурная зависимость рассчитанной вращательной вязкости для чистого СЖК и СЖК/ЗНЧ нанодисперсии. При расчете данных величин предполагалось что все приложенное напряжение падает на ЖК слое.

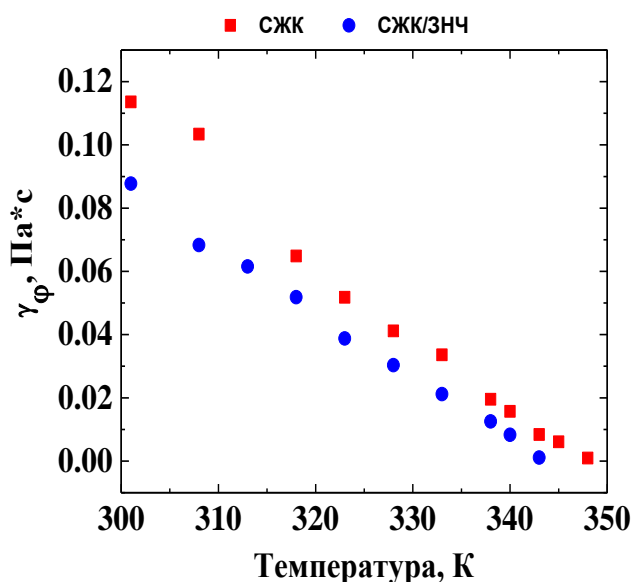


Рисунок 3. Вращательная вязкость как функция температуры

Объяснить данный эффект невозможно на основе существующих подходов. Далее будет показано что полученный результат можно легко объяснить в рамках модели делителя напряжения.

### Эквивалентная электрические схемы СЖК ячейки.

Для вычисления падения напряжения на слое СЖК необходимо выбрать эквивалентную электрическую схему ячейки. В представленной диссертации рассматривались три возможных варианта схем.

**Схема 1:** состоит из двух частей, описывающих слой СЖК и граничные вклад границы. Первое плечо схемы состоит из четырех элементов  $C_{lc}$ ,  $R_{lc}$ ,  $C_{hx}$  и  $R_{hx}$ , которые описывают моду голдстоуновскую моду ( $C_{hx}$  и  $R_{hx}$ ), ионную проводимость ( $R_{lc}$ ), а также емкость ячейки ( $C_{lc}$ ). Второе плечо схемы описывает вклад двойных электрических слоев ( $C_{edl}$  и  $R_{edl}$ ) и вклад ориентирующих слоев ( $C_{pol}$ ,  $R_{pol}$ ).

**Схема 2.** Данная схема подразумевает, что слой СЖК можно представить как параллельное соединение сопротивления и емкости (дебаевский релаксационный процесс), а вклад граничных слоев ограничен ориентирующими слоями.

**Схема 3.** Данная схема аналогична схеме 2 с той лишь разницей, что емкость слоя СЖК заменяется элементом с постоянной фазы (СРЕ). Элемент СРЕ описывает недебаевский процесс диэлектрической релаксации в слое СЖК.

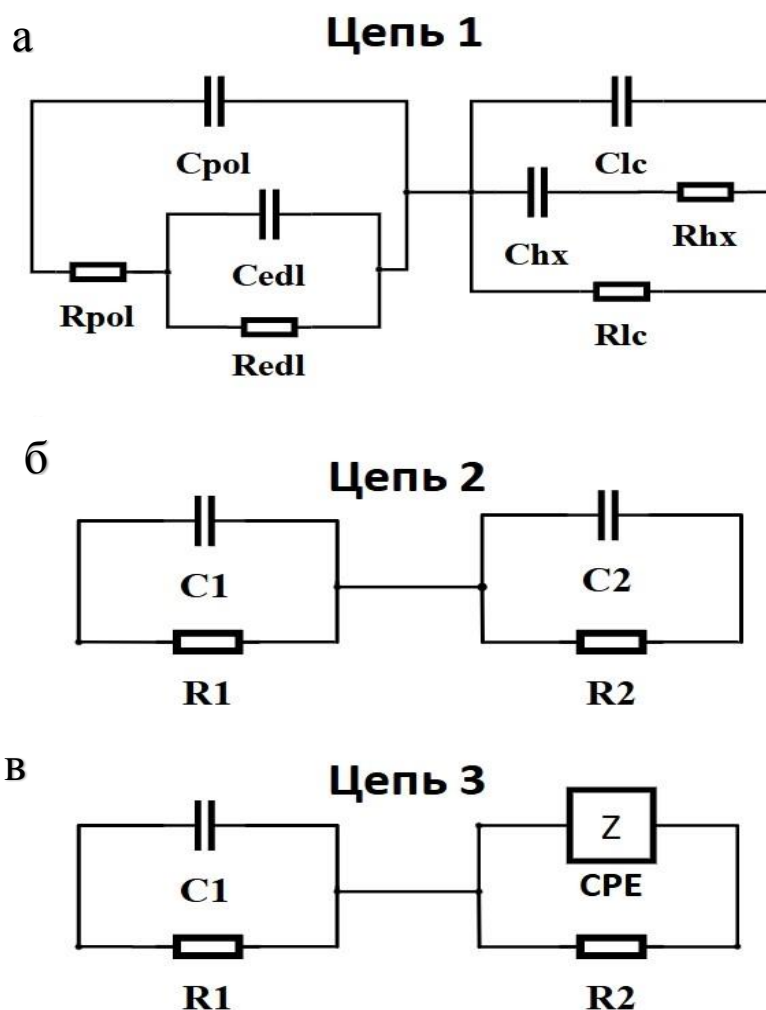


Рисунок 4. Варианты эквивалентной электрической схемы СЖК ячейки

### Спектры комплексного импеданса образцов и идентификация эквивалентной электрической схемы.

Спектры комплексного импеданса чистой СЖК ячейки и ячейки заполненной дисперсией СЖК/ЗНЧ измерялись с помощью импедансного спектрометра Novocontrol beta system в диапазоне частот ( $f$ ) 1 мГц – 200 кГц при четырех различных температурах ( $T = 300$  К, 308 К, 318 К и 328 К) в пределах фазы SmC\*, представленных на (рис. 5). Амплитуда приложенного осциллирующего напряжения ( $V_{pr} = 0,1$  В) близка к тепловому напряжению ( $(k_B T) / e \approx 27$  мВ,  $T = 300$  К,  $e$  – элементарный заряд,  $k_B$  – постоянная Больцмана), поэтому предполагалось, что вкладом нелинейных эффектов можно пренебречь. Полученные спектры аппроксимировались с помощью предложенных эквивалентных электрических схем (рис. 4).

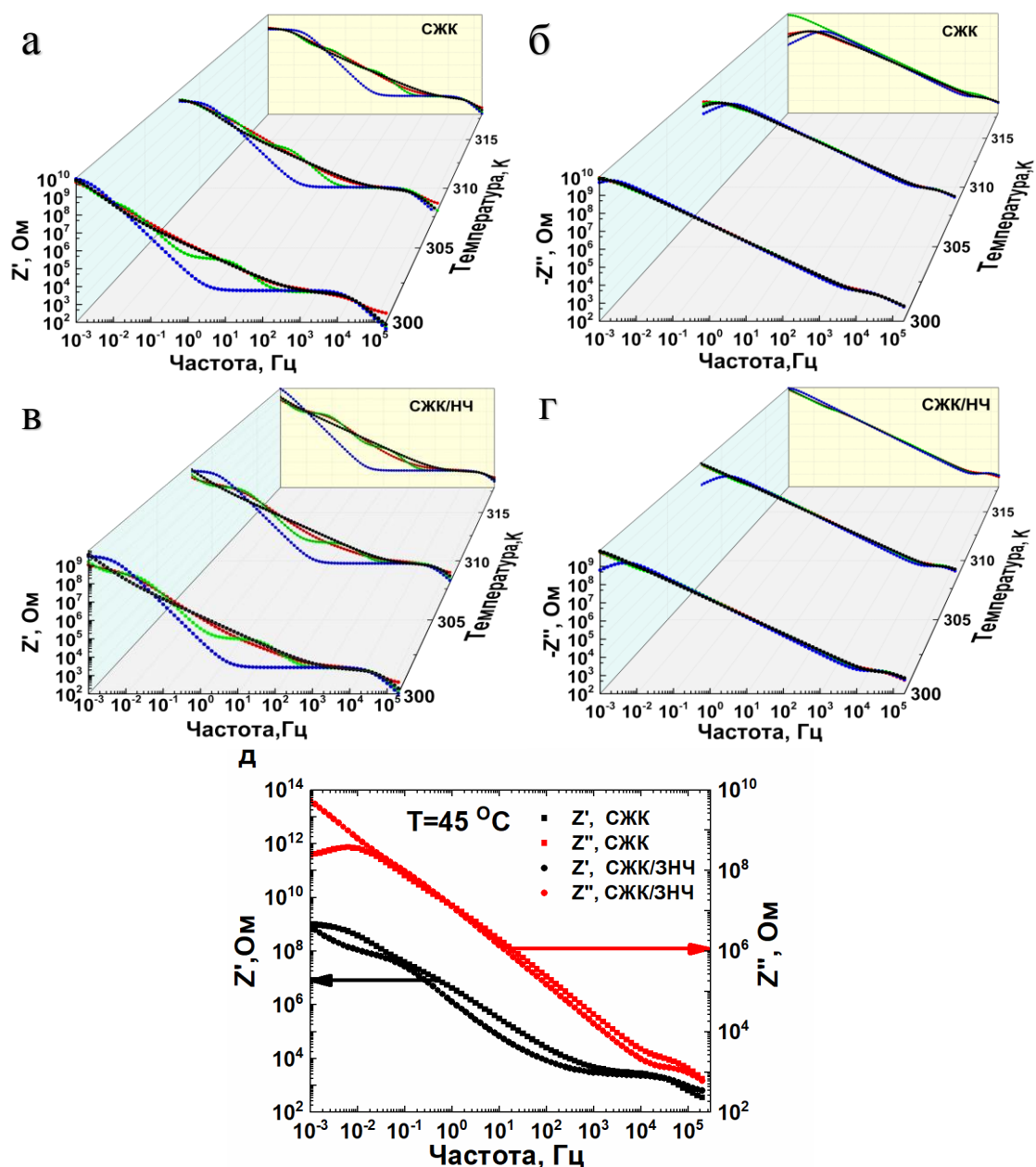


Рисунок 5. Спектры комплексного импеданса СЖК ячейки (а,б) и СЖК/ЗНЧ ячейки (в,г).  
Пример комплексного спектра ячеек с недопированным и допированным СЖК (д)

Из проведенного анализа следует, что **Схема 1** не согласуется с экспериментальными данными. Таким образом, только **Схема 2** и **Схема 3** соответствуют экспериментальным данным. В дальнейшем с целью упрощения будет использоваться **Схема 2**.

### Ионная электрическая проводимость СЖК слоя по постоянному току.

Жидкокристаллическая ячейка представляет собой типичную гетерогенную систему, состоящую из жидкокристаллического слоя и выравнивающих слоев (рис. б).

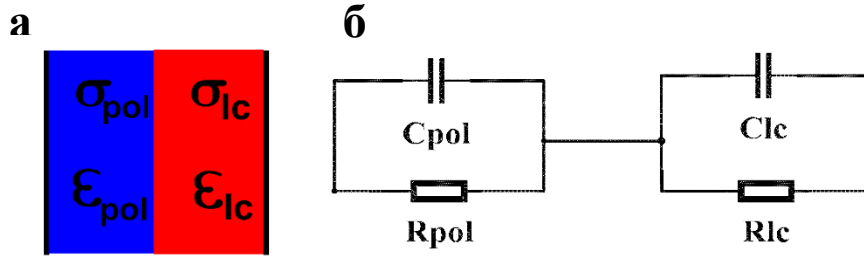


Рисунок 6. а) Схематичный рисунок ЖК ячейки; б) Эквивалентная электрическая схема

Согласно теории Максвелла, его комплексная диэлектрическая восприимчивость может быть записана как:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{lc}\epsilon_{pol}}{v\epsilon_{pol} + (1 - v)\epsilon_{lc}} \quad (2)$$

где  $v = \frac{d_{pol}}{d_{pol} + d_{lc}}$  – объемная доля приходящаяся на ориентирующие слои,  $\epsilon_{lc} = \epsilon'_{lc} - i\epsilon''_{lc}$  и  $\epsilon_{pol} = \epsilon'_{pol} - i\epsilon''_{pol}$  – комплексные диэлектрические проницаемости СЖК и ориентирующих слоев. Предполагая, что частота осциллирующего напряжения значительно меньше, чем характерные частоты релаксации ЖК и ориентирующего полимера, можно записать их комплексную диэлектрическую проницаемость как:

$$\epsilon_{lc} = \epsilon'_{lc} - i \frac{\sigma_{DC}}{2\pi f \epsilon_0} \quad (3)$$

$$\epsilon_{pol} = \epsilon'_{pol} - i \frac{\sigma_{AL}}{2\pi f \epsilon_0} \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_{DC}$  и  $\sigma_{AL}$  – электропроводностью по постоянному току ЖК и полимера ориентирующего слоя.

Подставляя формулы 2, 3 и 4 в выражение 5, можно получить комплексный спектр проводимости ячейки:

$$\sigma = \sigma' + i\sigma'' = i2\pi f \epsilon_0 \epsilon. \quad (5)$$

Предполагая, что омическая проводимость ориентирующих слоев значительно ниже, чем у жидкого кристалла  $\sigma_{AL} \ll \sigma_{DC}$ , а также  $v \rightarrow 0$  и приравнивая логарифмическую производную мнимой части комплексной проводимости первого нулю:

$$\frac{\partial \log(\sigma'')}{\partial \log(f)} = 0 \quad (6)$$

можно получить выражение для этих двух характерных частот:

$$f_{on} = \frac{\sigma_{DC} \sqrt{v}}{2\pi \varepsilon_0 \sqrt{\varepsilon'_{AL} \varepsilon'_{FLC}}}, \quad (7)$$

$$f_{max} = \frac{v \sigma_{DC}}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon'_{AL}}. \quad (8)$$

На (рис. 7) изображен типичный спектр мнимой части проводимости ячейки. Здесь  $f_{on}$  и  $f_{max}$  – локальные спектральные минимум и максимум  $\sigma''$ , появление которых вызвано релаксацией межфазной поляризации.

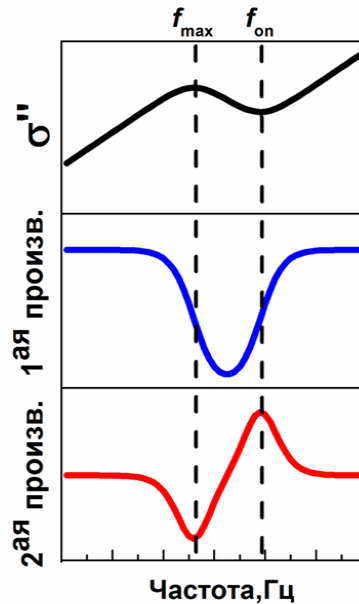


Рисунок 7. Схематичный спектр мнимой части проводимости, а также его первая и вторая производная.  $f_{on}$  – частота локального минимума;  $f_{max}$  – частота локального максимума

Комбинируя выражения 7 и 8 можно получить формулу (9) для оценки проводимости слоя ЖК по постоянному току:

$$\sigma_{DC} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon'_{СЖК} f_{on}^2}{f_{max}}. \quad (9)$$

Используя экспериментально измеренные спектры комплексной диэлектрической проницаемости (рис. 8). Температурная зависимость  $\sigma_{DC}$  для чистого образца более крутая, чем для дисперсии СЖК/ЗНС (рис. 9).



Такое поведение можно объяснить влиянием ионов, адсорбируемых наночастицами. В первом случае рост температуры приводит к одновременному увеличению концентрации ионов и снижению вязкости. Во втором случае наблюдается только влияние термически активированного увеличения вязкости, тогда как концентрация ионов не так сильно подвержена влиянию температуры.

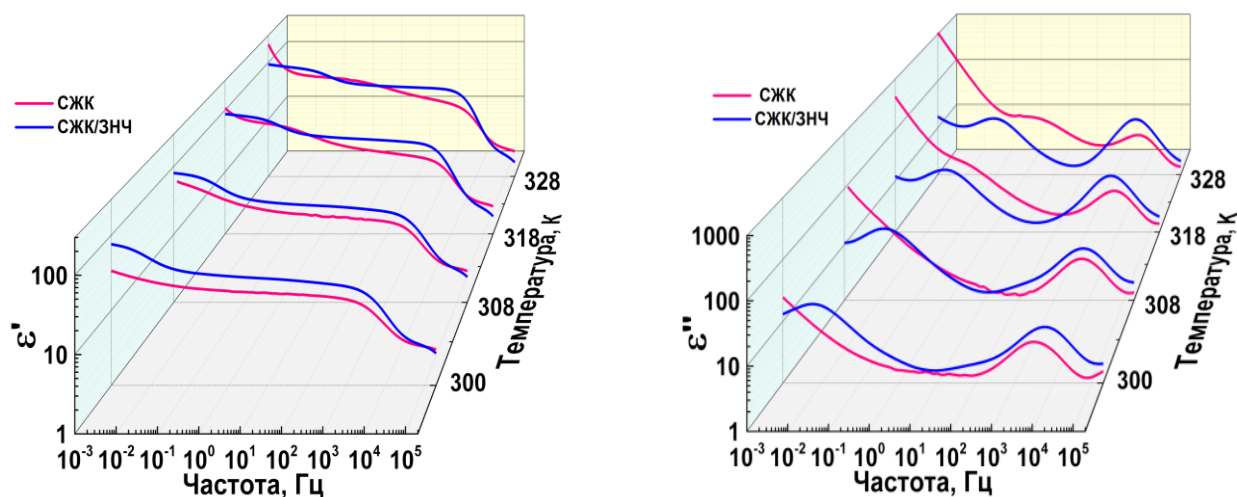


Рисунок 8. Экспериментально измеренные спектры мнимой и действительной части диэлектрической проницаемости

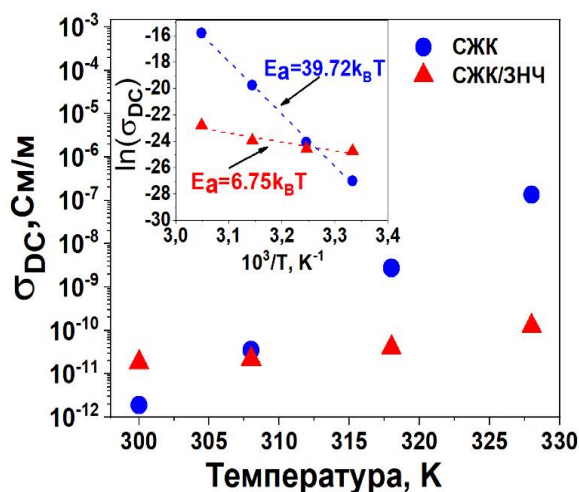


Рисунок 9. Зависимость проводимости по постоянному для исследуемыми образцов от температуры

Энергии активации ионной проводимости для этих двух образцов были найдены из графиков Аррениуса (вставка, рис. 9). Показано, что энергия активации для чистого СЖК равна  $E_a = 39,72k_B T$ , а для СЖК/ЗНЧ  $E_a = 6,75k_B T$ .

## **СЖК ячейка как делитель напряжения. Оценка вращательной вязкости.**

Используя эквивалентные схемы **2** и **3**, можно показать, что амплитуды напряжения, приложенного к граничным элементам ( $V_{ГС}$ ) и слою СЖК ( $V_{СЖК}$ ), можно рассчитать как:

$$V_{ГС} = \frac{V |V_{ГС}|}{|V_{Ячейка}|} \quad (10)$$

$$V_{СЖК} = \frac{V |Z_{СЖК}|}{|Z_{Ячейка}|} \quad (11)$$

где  $Z_{Ячейка}$  – импеданс всей ячейки,  $Z_{ГС}$  – импеданс граничных элементов,  $Z_{СЖК}$  – импеданс слоя СЖК.

Так как невозможно изготовить две абсолютно одинаковые ячейки, то удобно ввести коэффициент деления напряжения ( $VDR$ ) как отношение амплитуды падающего напряжения на слое СЖК к амплитуде напряжения, приложенного к граничным слоям:

$$VDR = \frac{V_{СЖК}}{V_{ГС}} \approx \frac{|Z_{ГС}|}{|Z_{СЖК}|} \quad (12)$$

Используя параметры компонент электрической схемы **2**, полученных в результате аппроксимации экспериментальных данных (комплексных спектров импеданса), были вычислены температурные зависимости  $VDR$  для ячейки заполненной чистым СЖК и нанодисперсией СЖК/ЗНЧ (см. рис. 10), рассчитанных для схем **2** и **3**. Из данного графика видно, что  $VDR$  ячейки, заполненной чистым СЖК, существенно меньше, чем для ячейки заполненной дисперсией СЖК/ЗНЧ. Следовательно, напряжение, приложенное к слою СЖК/ЗНЧ, больше, чем напряжение, падающее на слое чистого СЖК. Это означает, что напряженность электрического поля внутри слоя СЖК/ЗНЧ (внутреннее электрическое поле) больше, чем в слое чистого СЖК.

Коэффициент усиления  $E$  поля ( $EH$ ) можно характеризовать следующей величиной:

$$EH = \frac{V_{СЖК/ЗНЧ}}{V_{СЖК}} = \frac{VDR_{СЖК/ЗНЧ}}{VDR_{СЖК}} \quad (13)$$

Как видно из (рис. 10),  $EH$  уменьшается с ростом температуры. Аналогичное поведение наблюдается и для отношения времен электрооптического переключения.

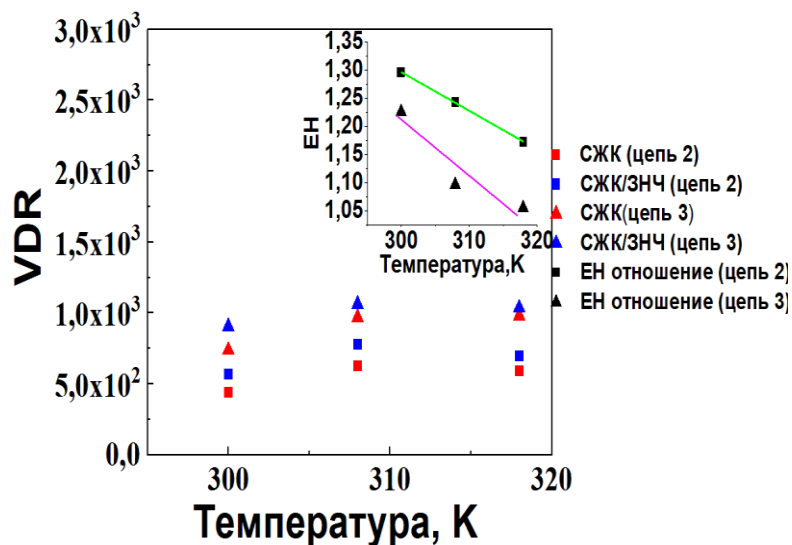


Рисунок 10. Зависимость VDR и  $EH$  от температуры для чистого СЖК и СЖК/ЗНЧ рассчитанного в соответствии со схемами 2 и 3

Подставляя экспериментально измеренные значения спонтанной поляризации и времени электрооптического переключения, а также значения  $EH$  в формулу (1), можно получить температурную зависимость вращательной вязкости дисперсии СЖК/ЗНЧ (рис. 11) для эквивалентных схем 2 и 3.

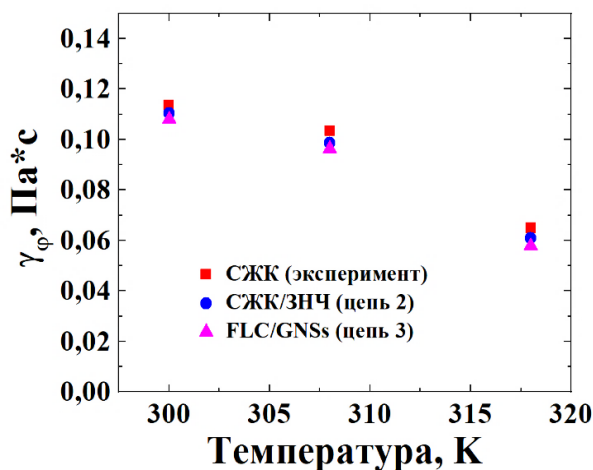


Рисунок 11. Температурная зависимость вращательной вязкости.

Как видно из (рис. 11), вращательные вязкости первичного СЖК и СЖК/ЗНЧ практически одинаковы в пределах погрешности эксперимента

$$(\gamma_\phi^{\text{СЖК}} \approx \gamma_\phi^{\text{СЖК/ЗНЧ}}).$$

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования механизма уменьшения времени электрооптического переключения сегнетоэлектрического кристалла, допированного золотыми наночастицами, и анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

1. Допирование золотыми наночастицами приводит к одновременному уменьшению времени электрооптического переключения СЖК и его спонтанной поляризации.
2. Допирование золотыми наночастицами приводит к снижению электрической проводимости по постоянному току слоя СЖК.
3. Показано, что уменьшение времени электрооптического отклика СЖК допированного золотыми наночастицами вызвано увеличением импеданса данного слоя приводящего к увеличению напряжения на нем.

### Список цитируемой литературы:

1. Blinov, L.M. Structure and properties of liquid crystals/ L.M. Blinov // Springer Science & Business Media, 2010. – Vol. 123.
2. Blinc, R. The physics of ferroelectric and antiferroelectric liquid crystals/ R. Blinc, I. Musevic, B. Zeks // World Scientific. – 2000.
3. Blinov, L.M. Hysteresis-free electro-optical switching in conductive ferroelectric liquid crystals: experiments and modelling/ L.M. Blinov, S.P. Palto, F.V. Podgornov, H. Moritake, W. Haase // Liquid crystals. – (2004). – Vol. 31. – №.1. – P.61-70.
4. Blinov, L.M. “Thresholdless” hysteresis-free switching as an apparent phenomenon of surface stabilized ferroelectric liquid crystal cells / L.M. Blinov, E.P. Pozhidaev, F.V. Podgornov, S.A. Pikin, S.P. Palto, A. Sinha, A. Yasuda, S. Hashimoto, W. Haase // Physical Review E. – 2002. – Vol. 66. – №. 2. – P. 021701.
5. Blinov, L.M. High frequency hysteresis-free switching in thin layers of smectic-C\* ferroelectric liquid crystals / L.M. Blinov, S.P. Palto, E.P. Pozhidaev, Yu.P. Bobylev, V.M. Shoshin, A.L. Andreev, F.V. Podgornov, W. Haase // Physical Review E. – 2005. – Vol. 71. – №. 5. – P. 051715.

6. Blinov, L.M. Hysteresis inversion frequency for V-shape electrooptical switching controlled by dynamic impedance of ferroelectric SmC\* phase/ L.M. Blinov, E.P. Pozhidaev, F.V. Podgornov, A. Sinha, W. Haase // *Ferroelectrics*. – 2002. – Vol. 277. – №. 1. – P. 3-11.

7. Chausov, D.N. Electro-optical performance of nematic liquid crystals doped with gold nanoparticles/ D.N. Chausov, A.D. Kurilov, R.N. Kucherov, A.V. Simakin, S.V. Gudkov // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2020.

8. Chausov, D.N. Dielectric properties of liquid crystalline composites doped with nano-dimensional fragments of shungite carbon/ D.N. Chausov, A.D. Kurilov, A.V. Kazak, A.I. Smirnova, V.K. Velichko, E.V. Gevorkyan, N.N. Rozhkova, N.V. Usol'tseva // *Liquid Crystals*. – 2019. – Vol. 46. – №. 9. – P. 1345-1352.

9. Atorf, B. Liquid crystals and precious metal: from nanoparticle dispersions to functional plasmonic nanostructures / B. Atorf, T. Funck, T. Hegmann, S. Kempter, T. Liedl, K. Martens, H. Mühlenbernd, T. Zentgraf, B. Zhang, H. Kitzerow, M. Urbanski // *Liquid Crystals*. – 2017. – Vol. 44. – №. 12-13. – P. 1929-1947.

10. Garbovskiy, Y. Ions in liquid crystals doped with nanoparticles: conventional and counterintuitive temperature effects/ Y. Garbovskiy // *Liquid Crystals*. – 2017. – Vol. 44. – №. 9. – P. 1402-1408.

11. Garbovskiy, Y. Ferroelectric nanoparticles in liquid crystals: recent progress and current challenges/ Y. Garbovskiy, A. Glushchenko // *Nanomaterial's*. – 2017. – Vol. 7. – №. 11. – P. 361.

12. Ju Hsu, Che. Electro-optical effect of gold nanoparticle dispersed in nematic liquid crystals/ Che-Ju Hsu, Li-Jyuan Lin, Mao-Kun Huang. Chi-Yen Huang // *Liquid Crystals*. – 2017. – Vol. 7. – №. 10. – P. 287.

#### **Список публикаций автора по теме диссертации:**

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов диссертационных работ:*

1. Karaawi, A.R. Direct current electric conductivity of ferroelectric liquid crystals–gold nanoparticles dispersion measured with capacitive current technique /

M.V. Gavrilyak, V.A. Boronin, A.M. Gavrilyak, J.V. Kazachonok, F.V. Podgornov // *Liquid Crystals*. – 2020. – Vol. 47. – № 10. – P. 1507-1515.

2. Podgornov, F.V. Mechanism of electrooptic switching time enhancement in ferroelectric liquid crystal/gold nanoparticles dispersion /M. Gavrilyak, A. Karaawi, V. Boronin, W. Haase // *Liquid Crystals*. – 2018. – Vol. 45. – P. 1594-1602.

3. Podgornov, F.V. Mesophase Materials as Smart Media for Emerging Pressure Sensors: Capacitive Method of Measurement of DC Conductivity/ M.V. Gavrilyak, A.R. Karaawi, A. M. Ishmurzina, N.S Kolmakova, W. Haase // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – IEEE, 2018. – P. 1-5.

*Другие публикации:*

1. Караави, А.Р. Механизм уменьшения времени электрооптического переключения жидкокристаллических нанодисперсий / А.Р. Караави // *Материалы Десятой научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ, Челябинск*. – 2018. – С. 23.

2. Podgornov, F.V. Mesophase materials as smart media for emerging pressure sensors: Capacitive method of measurement of DC conductivity/ F.V. Podgornov, M. V. Gavrilyak, A. R. Karaawi, A. M. Ishmurzina, W. Haase // *Global Smart Industry Conference (GloSIC'2018) Chelyabinsk*. – November 13–15. – 2018. – P. – 1-5.

3. Гавриляк, М.В. Нелинейная импедансная спектроскопия нематического жидкого кристалла E7/ М.В. Гавриляк, А.М. Гавриляк, В.А. Боронин, А.Р. Караави // *Сборник тезисов, материалы Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых*. Уфа, 2020. – С. 73-74.

4. Podgornov, F.V. Direct current ionic conductivity in liquid crystalline nanodispersions / F.V. Podgornov, M. V. Gavrilyak, A. R. Karaawi, V.A. Boronin, A. M. Ishmurzina, W. Haase // *XVII International Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Doped with Rare Earth and Transition Metal Ions (IFS2018)*. – 23–28 September 2018, Ekaterinburg. – P. 238.