

УДК 533.6.071.3+532.783

Г. М. Жаркова, В. Н. Коврижина, А. П. Петров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СДВИГА НА КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛЕСТЕРИКОВ

EFFECT OF MECHANICAL SHEAR ON COLORIMETRIC CHARACTERISTICS OF CHOLESTERIC LIQUID CRYSTALS

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

В работе рассматривается оптический отклик ХЖК на воздействие потока в аэродинамическом эксперименте для случаев конфокальной и планарной начальной текстуры в зависимости от времени и уровня касательного напряжения. Приводятся краткое описание 2х эффектов и результаты спектральных и колориметрических измерений.

Ключевые слова: холестерические жидкие кристаллы, касательное напряжение оптический отклик.

Time-dependent optical response of cholesteric liquid crystals on shear flow in aerodynamic experiment is investigated under different shear stresses for two cases (con-focal and planar initial texture). Short description of two effects and results of spectral and colorimetric measurements are given.

Key words: cholesteric liquid crystals, shear stress, optical response.

Введение

Известно, что тонкопленочные материалы на основе холестерических жидких кристаллов (ХЖК) обладают свойством механохромизма, т. е. спектр отражения такого покрытия изменяется под влиянием механических деформаций. Характер изменения спектра зависит от исходной текстуры ХЖК. Если текстура конфокальная, то она под влиянием механической деформации переходит в планарную и, как следствие, покрытие окрашивается, так как начинает селективно отражать падающий на него свет. Если исходная текстура планарная, то под влиянием механического сдвига изменяется спектр отраженного от покрытия света. Эти механо-оптические эффекты нашли применение в аэродинамических исследованиях для диагностики касательного напряжения вязкого трения [1 – 10]. Помимо работ Klein E. J. [1] и Bonnett P., Jones T. V. [5, 6], наибольший вклад в изучение влияния сдвига на оптический отклик ХЖК демонстрируют работы Reda D. C. с коллегами [2]. Они провели более детальные исследования параметров, влияющих на длину волны селективного отражения света планарной текстурой, и показали, как угловую зависимость цвета ХЖК можно использовать для определения направления вектора касательных напряжений τ . Для нормального угла падения света любая точка поверхности, находящаяся под воздействием касательного напряжения с компонентой направленной от наблюдателя, характеризуется оптическим откликом со сдвигом длины волны в синюю область видимого спектра. И, напротив, если вектор τ направлен к наблюдателю, то отклика нет, и всегда наблюдается темно-коричневый цвет. Влияние угла регистрации оптического отклика ХЖК относительно

направления вектора касательного напряжения подтверждается и в работе [7]. Parmar D. S. исследовал спектральный отклик ХЖК на прямоугольный импульс τ длительностью 100 и 200 мс в диапазоне $\tau \approx 1 - 20$ кПа в геометрии «сэндвич» толщиной 100 мкм. Исследовалось селективное отражение ЖК TI511 (BDH) нечувствительного к температуре, но чувствительного к касательному напряжению при нормальном освещении. Однако в этих экспериментах им была получена очень низкая чувствительность $\Delta\lambda/\Delta\tau \approx 10 \text{ нм/psi} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ нм/Па}$. Можно предположить, что регистрация оптического отклика осуществлялась против течения или при угле азимута более 90° , когда чувствительность к τ сильно уменьшается.

Анализ литературных данных показывает, что явление механохромизма, индуцированного потоком, еще недостаточно изучено, так же как недостаточно отработаны процедуры измерений и алгоритмы обработки данных, зависящие от условий эксперимента.

Оптический отклик ХЖК индикатора зависит от вида механического воздействия. В качестве меры воздействия потока на слой ХЖК обычно рассматривается касательное напряжение вязкого трения $\tau = F/S$ (касательная сила на единицу площади). В аэродинамическом эксперименте форма входного воздействия (сдвиг потоком) зависит от установки. В высокоскоростных установках его можно описать как прямоугольный импульс длительностью от нескольких секунд до десятков минут. При малых дозвуковых скоростях выход на режим может составлять несколько минут, а длительность режима десятки минут и более. Поведение ХЖК при различных формах воздействия может быть разным. Кроме этого, приводимые в литературе данные получены на коммерческих смесях, состав которых не приводится. Это не позволяет сделать вывода о влиянии состава используемых ХЖК на их чувствительность к механическому сдвигу.

В качестве оптического отклика ЖК-покрытия на механическое воздействие обычно рассматривается спектральный отклик $\lambda(t)$. Но поскольку спектральные методы не дают информации по всей исследуемой поверхности в один момент времени, для изучения отклика ХЖК выполняется регистрация изображения поверхности с помощью видеокамер с последующей цифровой обработкой в системе колориметрических координат HIS (H – цветовой тон, S – насыщенность, I – интенсивность). [4]. Поэтому отбор ХЖК-составов по их чувствительности к сдвигу и диагностика τ также должны осуществляться с помощью калибровки колориметрических характеристик ХЖК относительно касательного напряжения.

Цель работы – исследование влияния механического сдвига, индуцированного дозвуковым потоком, на спектр и колориметрические характеристики многокомпонентных смесей ХЖК.

ЖК-материалы, используемые для диагностики касательного напряжения

Диагностическая смесь ХЖК должна иметь слабую температурную чувствительность селективного отражения (при высокой чувствительности к сдвигу), хорошую адгезию к материалу модели и определенную исходную ориентацию молекул в слое на поверхности.

В ИТПМ на основе эфиров холестерина были разработаны слабо чувствительные к температуре составы. В эти составы входили следующие эфиры холестерина: нонаноат (А), валерат (Ва), хлорид (Хл) и глицерин.

Экспериментальная установка

Для калибровки колориметрических характеристик ХЖК использовался стенд, созданный на основе лабораторной дозвуковой мини-трубы с поперечным сечением рабочей части 12×100 мм (рис. 1). Система регистрации и освещения состояла из осветителя на основе телеобъектива от камеры Pentazet-35, в фокусе которого была установлена галогенная лампа; поворотной обоймы, надетой на корпус объектива; со съемными штангами, на конце которых находятся узлы крепления фотокамеры. Цветные фотокамеры могли осуществлять видеозапись со скоростью 30 кадров в сек с нескольких угловых положений одновременно. Контроль исходной ориентации молекул в слое относительно поверхности осуществляется с помощью спектрального анализа (портативный многоканальный спектрофотометр «Колибри-2» с опто-волоконным приемником излучения).

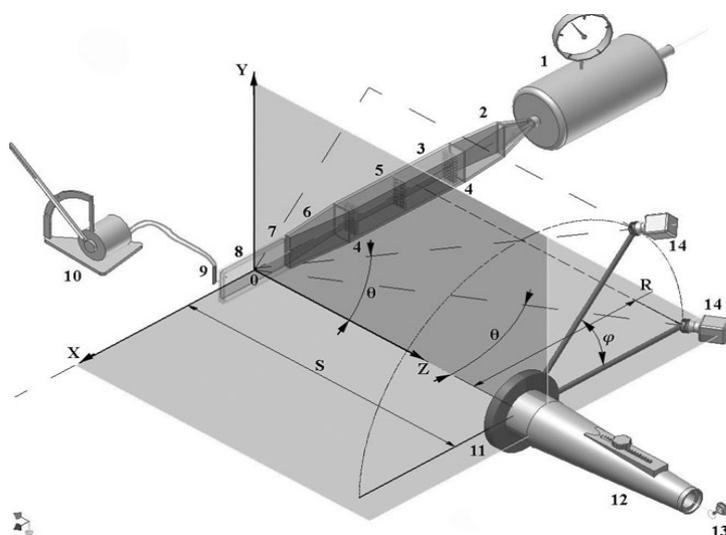


Рис. 1. Стенд для калибровки ХЖК относительно сдвига:

- 1 – форкамера, 2 – диффузор; 3÷5 – участок подготовки воздуха; 6 – конфузор,
7 – турбулизатор, 8 – рабочая часть, 9 – датчики Престона и статического давления,
10 – микроманометр, 11 – поворотная обойма, 12 – телеобъектив, 13 – галогенная лампа,
14 – узлы крепления фотокамеры или цифрового аппарата

Результаты измерения

Для практического использования в аэродинамике представляют интерес 2 текстуры ХЖК: конфокальная и планарная. Изучение оптического отклика этих текстур показало, что под влиянием сдвига наблюдаются разные эффекты, которые мы рассмотрим подробнее далее.

Оптический отклик конфокальной текстуры ХЖК

Первый эффект, характерный для ХЖК, – это, так называемый, текстурный переход. Под влиянием воздушного потока происходит упорядочение ориентации в слое с конфокальной текстурой и возникает планарная спиральная текстура, селективно рассеивающая свет. Время текстурного перехода зависит от величины касательного

напряжения и регистрируется по изменению состояния поверхности из бесцветного на цветное [5 – 7]. Коммерческие смеси, описанные в литературе, работают при достаточно высоких уровнях сдвига. Для исследования течений с малыми дозвуковыми скоростями (< 50 м/с) необходимы ЖК-составы, работающие в диапазоне τ приблизительно до 10 Па. Исследуемая нами смесь ХЖК была предназначена для этих условий. На рис. 2 – 4 показано изменение колориметрических координат интенсивности I , насыщенности S и цветового тона H в ходе текстурного перехода при трех скоростях набегающего потока (уровнях касательного напряжения) для тройной смеси АВa30Хл27. Колориметрические данные усреднялись по окну 10 на 10 пикселей. Видно, что время текстурного перехода, определяемое как время достижения максимума интенсивности отражения $t_{I_{\max}}$, заметно уменьшается с увеличением касательного напряжения (рис. 5). На рис. 5 приведено также сравнение спектральных и колориметрических данных.

Экспериментальные данные о времени текстурного перехода $t(\tau)$ в логарифмических координатах хорошо аппроксимируются прямой линией. На рис. 6 показана такая зависимость для трех смесей ХЖК, отличающихся процентным содержанием глицерина (0; 3,5 и 7 % в смеси АВa30Хл27).

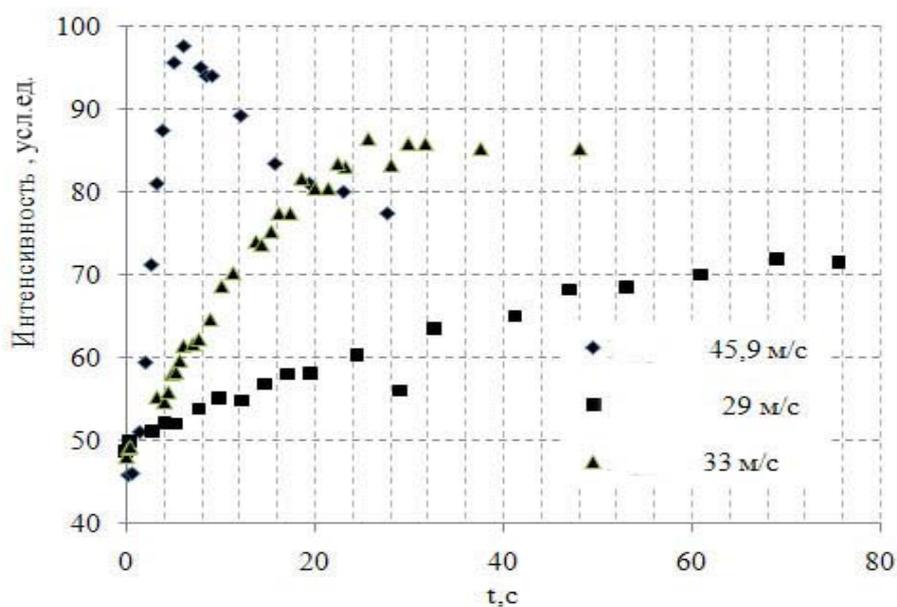


Рис. 2. Изменение интенсивности цвета в ходе текстурного перехода при трех скоростях набегающего потока

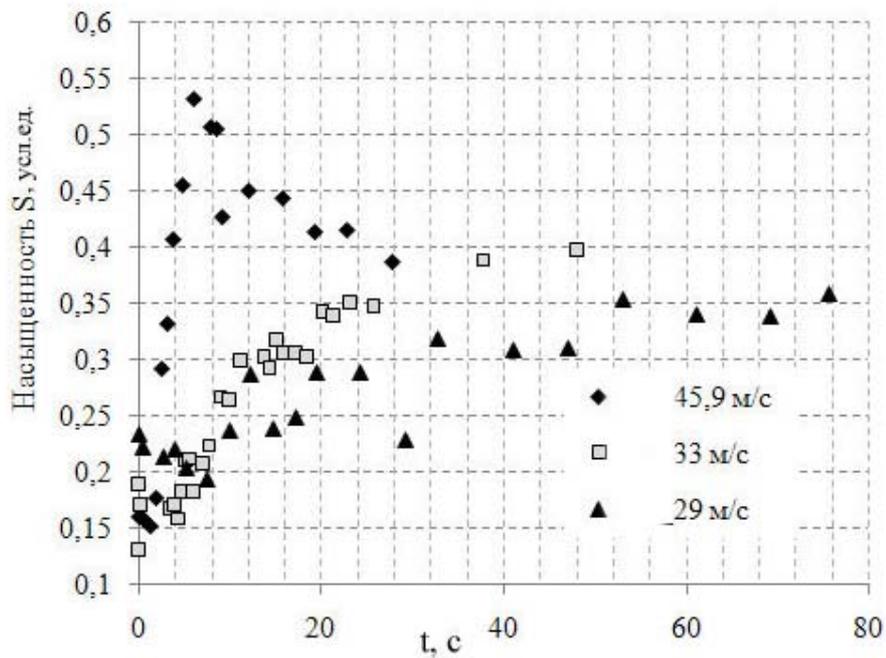


Рис. 3. Изменение насыщенности в ходе текстурного перехода при трех скоростях набегающего потока

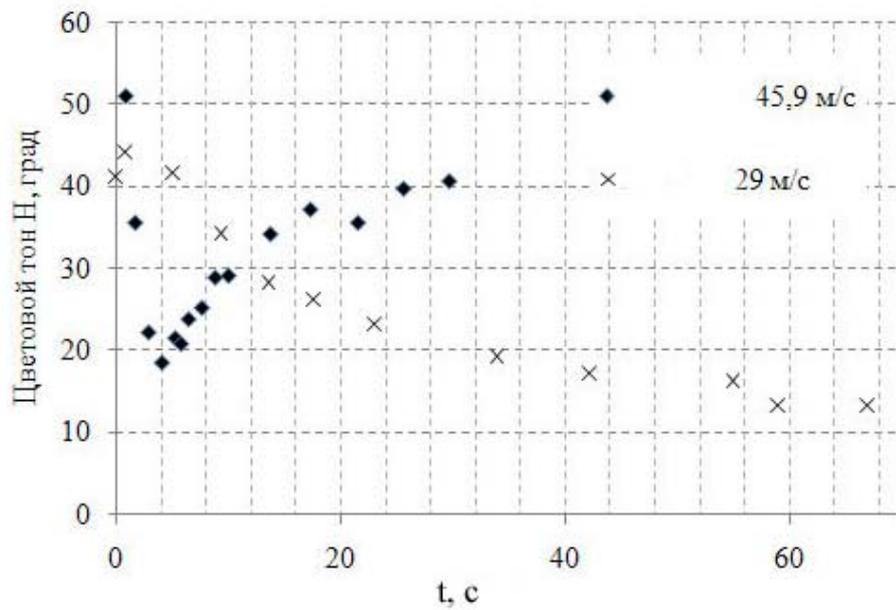


Рис. 4. Изменение цветового тона в ходе текстурного перехода при трех скоростях набегающего потока

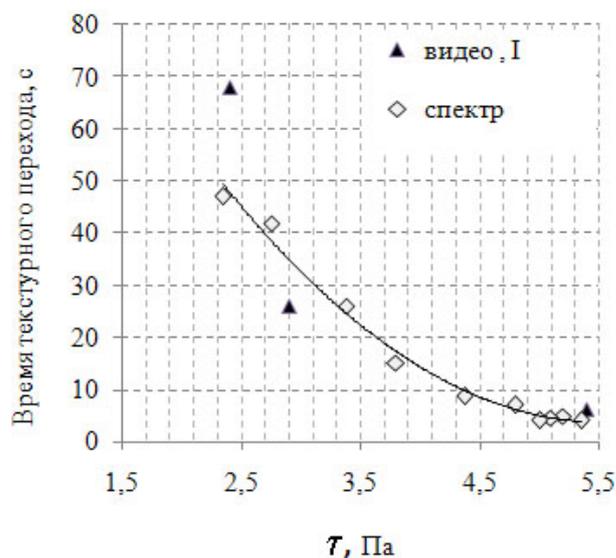


Рис. 5. Зависимость времени текстурного перехода от касательного напряжения, полученная по колориметрической интенсивности и спектрам

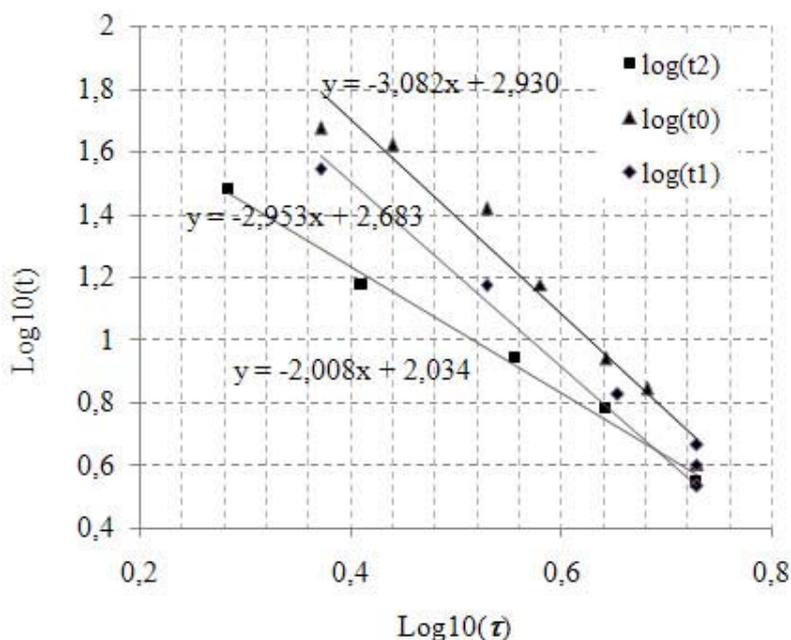


Рис. 6. Зависимость времени текстурного перехода от касательного напряжения, для трех ХЖК составов: t_0 – без глицерина, t_1 – 3,5 %; t_2 – 7 % глицерина

В результате измерений установлено, что при исходной конфокальной текстуре:

1. Время текстурного перехода t_{max} уменьшается с увеличением τ .
2. Пик интенсивности отражения I_{max} падает с увеличением τ .
3. После выключения воздействия $\lambda_{\text{планар}}(t) \approx \text{const}$ в течение длительного времени (эффект памяти). Поэтому данный эффект может применяться для визуализации в каналах без оптического доступа. Однако, при этом сама длина волны $\lambda_{\text{планар}}$ зависит от

времени экспозиции в поток Δt и от уровня τ . Таким образом, в результате текстурного перехода мы получим планарную текстуру с максимальной длиной волны отражения $\lambda_{\text{max}} = \lambda(\Delta t, \tau)$, зависящей от уровня касательного напряжения и времени воздействия. К сожалению, из полученных данных неясно, зависят ли установившиеся значения $\lambda_{\text{планар устан}}(\Delta t = \infty)$ и $I_{\text{уст}}(\Delta t = \infty)$ получившейся планарной текстуры от τ .

Эффект смещения пика селективного отражения планарной текстуры под влиянием потока

Рассмотрим результаты, полученные для исследованных нами ХЖК-материалов, обладающих планарной текстурой. Рис. 7 подтверждает эффект смещения пика селективного отражения в синюю область спектра при одновременном его уширении и уменьшении интенсивности. На этом же рисунке показано изменение интенсивности от времени воздействия потока (рис. 7, б).

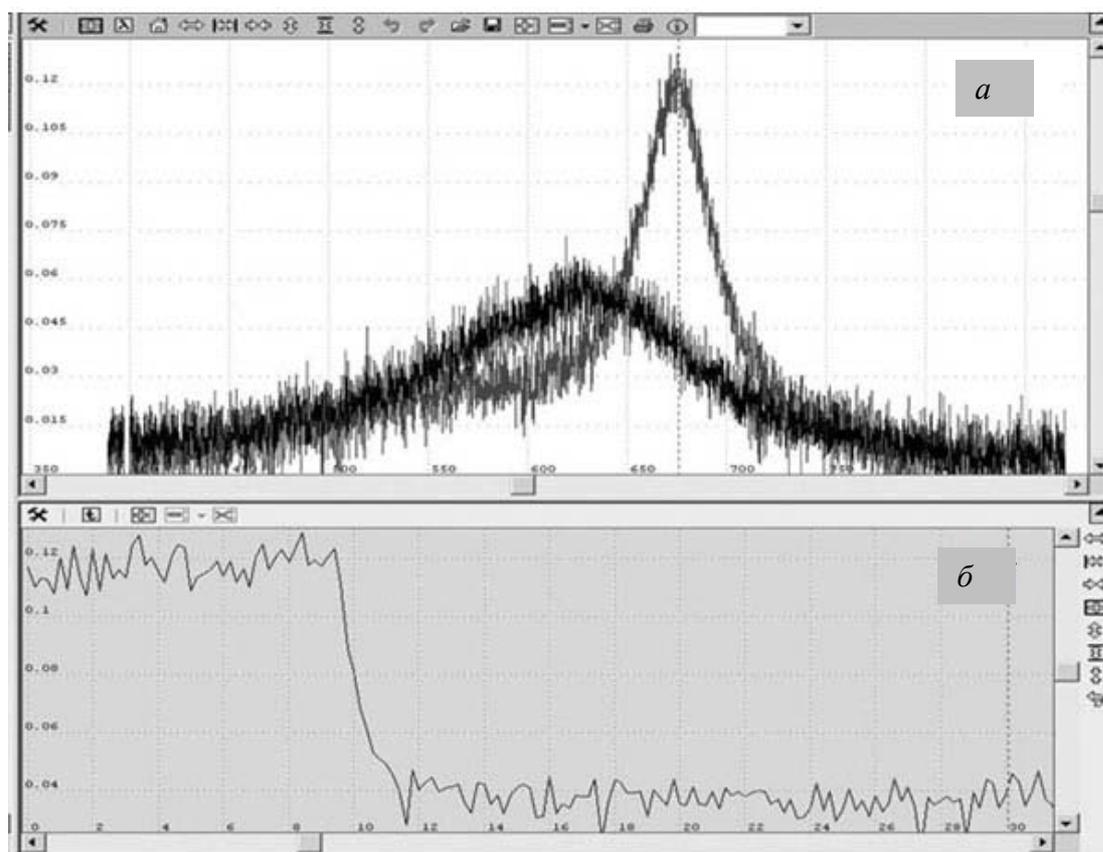


Рис. 7. а – Сдвиг максимума спектра селективного отражения под влиянием потока (вверху); б – изменение интенсивности отражения от времени на исходной λ_{max}

На рис. 8 показано влияние касательного напряжения на величину колориметрической координаты – цветовой тон H . Известно, что для данной смеси при возрастании τ до 5 Па происходит сдвиг λ_{max} на 60 нм (от красного к желтому цвету), что соответствует чувствительности 12 нм/Па. Колориметрическая координата – цветовой тон H изменяется обратно-пропорционально λ , соответственно H увеличивается с увеличени-

ем τ . Данные приведены для угла азимута 15° относительно скорости набегающего потока или вектора τ . Влияние угла относительно нормали к поверхности θ показано на рис. 9. Видно, что с увеличением полярного угла также наблюдается сдвиг максимума спектра селективного отражения.

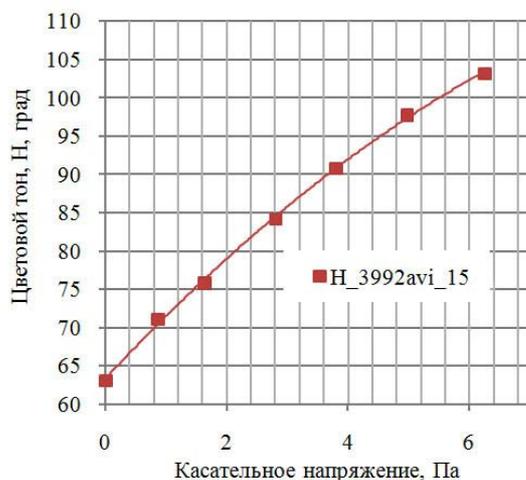


Рис. 8. Влияние касательного напряжения на величину колориметрической координаты – цветовой тон

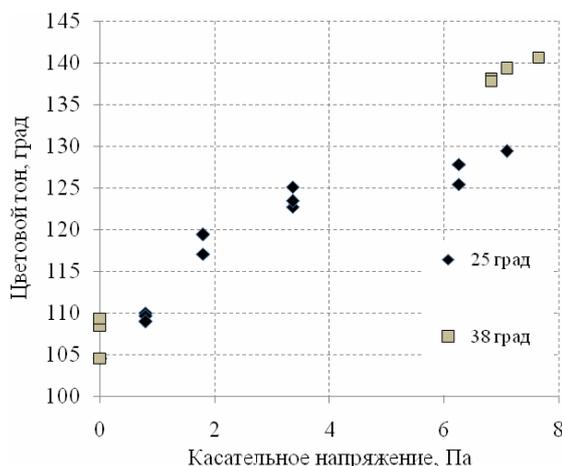


Рис. 9. Влияние угла относительно нормали к поверхности θ

Заключение

Исследовано явление механохромизма ХЖК, индуцированного турбулентным потоком со скоростями от 29 до 46 м/с, при обтекании модели с тонким слоем ХЖК, нечувствительных к температуре и чувствительных к касательным напряжениям для двух случаев.

1. Для случая конфокальной исходной текстуры установлено, что:

- время текстурного перехода, определенное по пику колориметрической интенсивности $t_{\text{Имах}}$, уменьшается с увеличением уровня касательного напряжения τ ;
- пик колориметрической интенсивности отражения $I_{\text{мах}}$ падает с увеличением τ ;
- пик насыщенности $S_{\text{мах}}$ падает с увеличением τ .

Временная зависимость колориметрической координаты – цветовой тон $H(t)$ при $\tau = \text{const}$ имеет экстремум $H_{\text{мин}}$, который зависит от уровня τ . В результате текстурного перехода мы получили планарную текстуру с максимальной длиной волны отражения $\lambda_{\text{луст}} = \lambda(\Delta t, \tau)$, зависящей от уровня касательного напряжения и времени воздействия.

После выключения воздействия длина волны максимума отражения сформированной планарной текстуры сохраняется постоянной $\lambda_{\text{планар}}(t) \approx \text{const}$ в течение длительного времени (эффект памяти). Поэтому данный эффект может применяться для визуализации в каналах без оптического доступа.

2. Для случая исходной планарной текстуры установлено, что:

- с увеличением уровня касательного напряжения τ наблюдается уменьшение длины волны пика селективного отражения λ_{\max} («синий сдвиг») и увеличение значения колориметрической координаты – цветовой тон H ;
- Зависимость цветового тона от угла азимута $H(\varphi)$ симметрична относительно прямой $\varphi=0$ (наблюдение по потоку). С увеличением угла азимута φ от 0 до $\pm 90^\circ$ наблюдается возрастание H , который увеличивается и при возрастании полярного угла θ (при удалении от нормали к поверхности)

Полученные результаты качественно хорошо согласуются с литературными данными для коммерческих составов ЖК с винтовой надмолекулярной структурой [1, 9 – 10].

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы СО РАН – ЦАГИ.

Список использованной литературы

1. Klein E. J., Margozi A. P. // Rev. Sci. Instrum., 1970. Vol. 41. P. 238 – 239.
2. Reda D. C., Muratore J. J. // AIAA J. 1994. Vol. 32. P. 1576 – 1582.
3. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. // Proc. of the XVth International conference on the methods of aerophysical research. November, 1– 6, 2010. Novosibirsk, 2010. Part 1. P. 253 – 254.
4. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. et al. // Proc. of the 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-8). August 21st – 25th, 2011 Moscow, 2011. № 113. P. 1 – 5.
5. Bonnett P., Jones T. V., McDonnell D. G. Shear-stress measurement in aerodynamic testing using cholesteric liquid crystals // Liquid Crystals. 1989. Vol. 6. Issue 3. P. 271 – 280.
6. Mee D. J., Walton T. W., Harrison S. B., Jones T. V. A comparison of liquid crystal techniques for transition detection // AIAA 91-0062, 29th Aerospace Sciences Meeting. Jan.7 – 10, 1991. P. 8.
7. Parmar D. S. // Review of Scientific Instruments. 1991. Vol. 62. № 6. P. 1596 – 1608.
8. US Patent 5 438 879. Method for measuring surface shear stress magnitude and direction using liquid crystal coatings / D. C. Reda. 1995.
9. Dismille P. J., Toy N. Full Field Surface Shear Stress Measurements Using Liquid Crystals / Report A332933. 1994.
10. Zhao Ji Song, Scholz P., Liang Xian // Chinese Science Bulletin, Fluid mech. 2011. Vol. 56. № 27. P. 2897 – 2905.

Поступила в редакцию 20.09.2012 г.