

УДК 533.6.071.3+532.783

Экспериментальное исследование текстурного перехода в жидких кристаллах под воздействием касательного напряжения поверхностного трения

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

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: Kovrizh@itam.nsc.ru

Приведены результаты изучения оптического отклика жидких кристаллов с винтовой надмолекулярной структурой на воздействие касательного напряжения поверхностного трения в аэродинамическом эксперименте. Рассматривается эффект переориентации молекул из конфокальной текстуры (рассеивающей падающий на нее свет) в планарную (селективно отражающую). Текстурный переход исследуется спектральным и колориметрическими методами. Получены зависимости спектров отражения формирующейся планарной текстуры от времени и среднего уровня касательного напряжения. Показано, что зависимость времени текстурного перехода от уровня касательного напряжения в логарифмических координатах хорошо аппроксимируется линейной зависимостью, что позволяет использовать этот эффект для диагностики потоков.

Ключевые слова: касательные напряжения трения, визуализация и измерение, жидкие кристаллы, текстурный переход.

Введение

К числу современных методов панорамной диагностики пристенных течений относятся методы, использующие тонкопленочные покрытия [1]. Среди них — покрытия на основе жидких кристаллов (ЖК), обладающих макроскопической упорядоченностью длинных осей молекул в пространстве, которая описывается единичным вектором n . Он называется директором и указывает направление преимущественной ориентации длинных осей молекул. Высокая чувствительность локальной ориентации директора к внешним воздействиям обуславливает многообразие оптических эффектов в жидких кристаллах, что позволяет использовать их для диагностики различных параметров (температуры, касательных напряжений поверхностного трения, концентрации примесей и др.). В аэродинамических исследованиях нашли применение термотропные холестерические жидкие кристаллы (ХЖК) с винтовой структурой в качестве цветowych термоиндикаторов [2]. Помимо визуализации и измерения полей температур и тепловых потоков, актуальной является разработка панорамных методов диагностики величины и направления вектора касательного напряжения вязкого трения τ , индуцированного потоком на поверхности модели [3].

В основе изучаемых и тестируемых аэродинамиками методов диагностики вектора τ с помощью ЖК, нечувствительных к температуре, но чувствительных к сдвигу, лежат два оптических эффекта, которые обусловлены свойствами двух разных текстур холестерических ЖК (ХЖК) — конфокальной и планарной. (Здесь текстура — совокупность структурных деталей тонкого слоя ХЖК, выявленная оптическим методом.) Первый эффект — зависимость времени оптического отклика конфокальной текстуры на воздействие касательного напряжения от уровня τ . Второй — зависимость длины волны максимума селективного отражения $\lambda_{\max} = \lambda(I_{\max})$ планарной текстуры ХЖК от уровня и направления вектора τ .

В числе экспериментальных работ, посвященных изучению первого из отмеченных эффектов (текстурного перехода в ХЖК) с целью его применения для диагностики касательных напряжений в аэродинамике, были исследования [4–5]. В работах [6–7] он использовался для визуализации структуры пристенного течения на поверхности компактного теплообменника. Современное состояние развития второго метода измерения с помощью ХЖК практически соответствует методике, изложенной, например, в работах [8–10], за исключением прогресса в технике видеозаписи и цифровой обработке изображений. Авторы провели более детальные исследования параметров, влияющих на длину волны максимума селективного отражения света планарной текстурой, и показали, как угловую зависимость цвета ХЖК можно использовать для определения направления вектора касательных напряжений.

Чтобы адаптировать оба метода к различным аэродинамическим установкам, необходимо учитывать ряд моментов. Так, режимы деформирования ХЖК зависят от типа установки: в дозвуковой аэродинамической трубе выход на стационарный режим может составить несколько минут, тогда как в гиперзвуковой ударной трубе это время исчисляется миллисекундами. Граничные условия на поверхности исследуемой модели (адгезия и энергия сцепления ХЖК с поверхностью) будут определяться ее материалом и характеристиками слоя черной краски, необходимого на светлых поверхностях для получения достаточного оптического контраста. Модели могут быть изготовлены из металла или материала с низкой теплопроводностью, что предпочтительнее.

ХЖК являются анизотропной средой, реологическое поведение которой в зависимости от типа ХЖК, химического состава и условий их применения, может быть описано как ньютоновской, так и неньютоновской моделями и еще недостаточно изучено. Поэтому при проведении эксперимента и рассмотрении результатов необходимо учитывать ориентацию молекул в слое (их начальную текстуру) относительно деформации. Получить совершенную планарную текстуру на большой поверхности иногда сложнее, чем конфокальную, поэтому представляет практический интерес изучение текстурного перехода. За рубежом в аэродинамическом эксперименте в основном используются составы на основе коммерчески доступных холестериков и хиральных нематиков. В ИТПМ СО РАН разрабатываются, изучаются и тестируются в аэродинамическом эксперименте составы на основе двойных и тройных смесей ХЖК [11–12].

Цель настоящей работы — исследовать первый из числа вышеуказанных оптических эффектов в холестерических ЖК, разработанных в ИТПМ СО РАН, применительно к условиям дозвукового потока. Для этого необходимо экспериментально изучить спектральный и колориметрический отклик ХЖК в процессе текстурного перехода из конфокальной текстуры ХЖК в планарную и зависимость времени текстурного перехода от уровня касательного напряжения, которая является рабочей характеристикой исследуемых ЖК индикаторов.

1. Начальная текстура ХЖК и геометрия эксперимента

В рассматриваемом методе исходная текстура ХЖК — конфокальная. Она получается при охлаждении из изотропного расплава и характеризуется хаотичной ориентацией доменов ЖК в тонком слое, что приводит к сильному рассеянию света

метода измерения касательного напряжения τ использовался метод Престона с градуировочной зависимостью Пейтеля [13, 14].

Коллиматор дает квазипараллельный пучок белого света, направление которого нормально поверхности исследуемого покрытия, находящегося в плоскости XU , и совпадает с осью Z системы координат. Ось X совпадает с направлением потока используемой установки. Конструкция установки позволяет выставлять полярный θ и азимутальный φ углы с хорошей точностью.

Для измерения спектрального отклика использовался портативный спектрофотометр «Колибри-2» с оптоволоконным приемником, которые позволили осуществить точечные измерения.

Для панорамных измерений τ необходимо перейти к регистрации, цифровой обработке и анализу цветных изображений оптического отклика ХЖК. Это осуществлялось с помощью цифровой видеокамеры с высоким пространственным разрешением и скоростью 25 кадров в секунду. При цифровой обработке использовалась система колориметрических координат HSI (цветовой тон H , насыщенность S и интенсивность I) [15].

3. Текстурный переход из конфокальной текстуры ХЖК в планарную

Под влиянием воздушного потока происходит упорядочение и переориентация молекул в слое с начальной конфокальной текстурой и возникает планарная спиральная текстура, селективно рассеивающая свет.

На рис. 2 показан пример панорамной ЖК визуализации уровня касательного напряжения, индуцированного дозвуковой струей на плоской поверхности. Фотокамерой зарегистрированы две области с разной текстурой в пять моментов времени в течение 4,4 с после включения струи. Слева на изображениях — окрашенная планарная текстура ХЖК, полученная в результате текстурного перехода при воздействии струи из трубки радиусом 10 мм. Справа — конфокальная текстура, невозмущенная потоком. При увеличении касательного напряжения от точки к точке наблюдается как изменение времени отклика ЖК (времени текстурного перехода), так и изменение цвета, длины волны максимума отражения в сторону более коротких длин волн. В зависимости от состава ЖК покрытия при больших градиентах касательного напряжения по поверхности

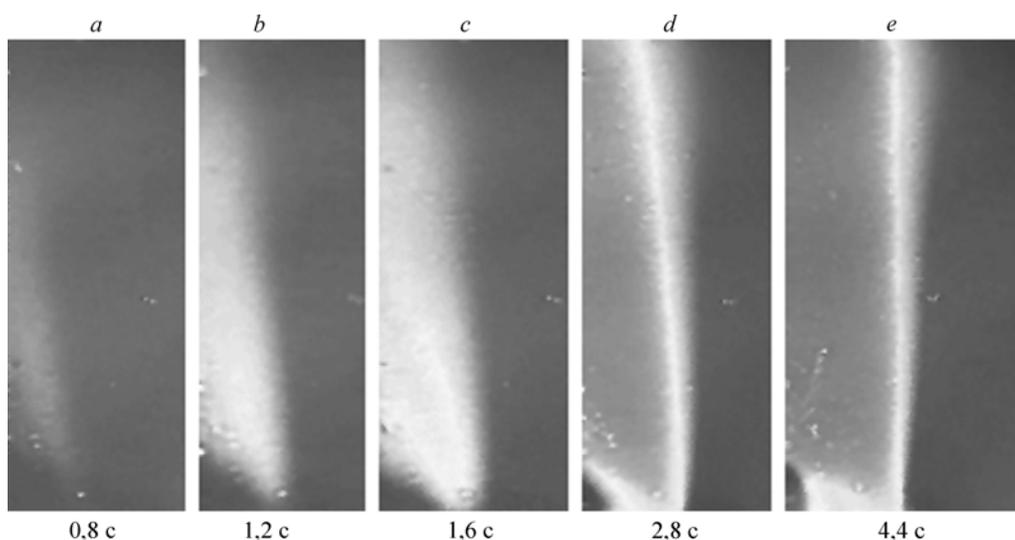


Рис. 2. ЖК визуализация касательного напряжения в ходе текстурного перехода. Ось струи — левая граница кадра. Направление потока снизу вверх.

цвет изменяется от красного к желтому и зеленому, $\Delta\lambda \sim 200 \div 300$ нм, при малых — наблюдается изменение оттенка, $\Delta\lambda \sim 50$ нм. Если уровень касательного напряжения τ окажется ниже порогового, то и в поле течения (например, в области отрыва потока) ЖК покрытие останется невозмущенным.

Описанный эффект текстурного перехода обладает большим временем релаксации («памятью»): после окончания эксперимента продолжительное время сохраняется зафиксированная картина распределения τ . При этом остается открытым вопрос, каким уровням τ она соответствует. Эффект «памяти» может применяться для визуализации τ в каналах без оптического доступа. Пример такой визуализации структуры пристенного течения в канале теплообменника с гофрированными стенками можно найти в [7]. Полученная на гофрированной стенке ЖК визуализация со временем экспозиции продолжительностью пять минут сравнивалась с сажемасляной визуализацией и было получено хорошее совпадение.

Большое время релаксации позволило сразу после выключения потока измерить угловую зависимость спектров отражения сформировавшейся планарной текстуры от угла φ при постоянном угле θ . Оказалось, что влияние азимутального угла на длину волны пика интенсивности для данного состава ЖК пренебрежимо мало (смещение $\Delta\lambda = 3$ нм). При этом максимальная интенсивность пика наблюдалась при регистрации перпендикулярно вектору сдвига.

4. Время текстурного перехода

Время текстурного перехода зависит от величины касательного напряжения в точке и регистрируется по изменению состояния поверхности из бесцветного на окрашенное [4]. Чтобы определить этот параметр более точно, рассмотрим процесс текстурного перехода подробнее. На рис. 3 показана динамика оптического отклика ЖК на ступенчатое воздействие набегающего потока со скоростью $V_\infty = 45,6$ м/с. В данном случае показано изменение интенсивности отражения $I(t)$ в видимой области спектра от 550 до 650 нм в ходе работы установки. Видно, что под воздействием потока некоторое время до насыщения происходит нарастание интенсивности отражения (все большее число молекул вовлекается в переориентацию). Причем максимум интенсивности наблюдается при $\lambda = 630$ нм к моменту времени $t = 4,5$ с (момент начала воздействия потока $t_{\text{нач}} = 1$ с), а затем уровень сигнала падает с выходом на «полку» $I_{\text{уст}}$. Установившийся режим соответствует полученной планарной текстуре.

Известно, что некоторые ХЖК могут обладать тиксотропией: их вязкость уменьшается с увеличением времени воздействия механического сдвига, возможно, что и время отклика может уменьшиться. На рис. 4. показана зависимость $I(t)$ для нескольких длин волн вблизи пика $\lambda(I_{\text{max}})$ максимального отражения в ходе более длительного пуска $\Delta t = 56$ с. Начало воздействия потока соответствует моменту $t_{\text{нач}} = 4$ с. Видно, что при данной длительности режима в пределах погрешности измерений время достижения пика максимального отражения и установившегося значения такое же, как при длительности 19 с. (рис. 3).

Если принять момент достижения пика $t(I_{\text{max}})$ за время текстурного перехода, то по данным спектральных измерений можно построить зависимость времени текстурного перехода от уровня касательного напряжения. На рис. 5 показана зависимость $t_{I_{\text{max}}}(\tau)$ для трех разных составов ХЖК. В исследованном диапазоне касательных напряжений в логарифмических координатах экспериментальные данные хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, что совпадает с данными работы [4].

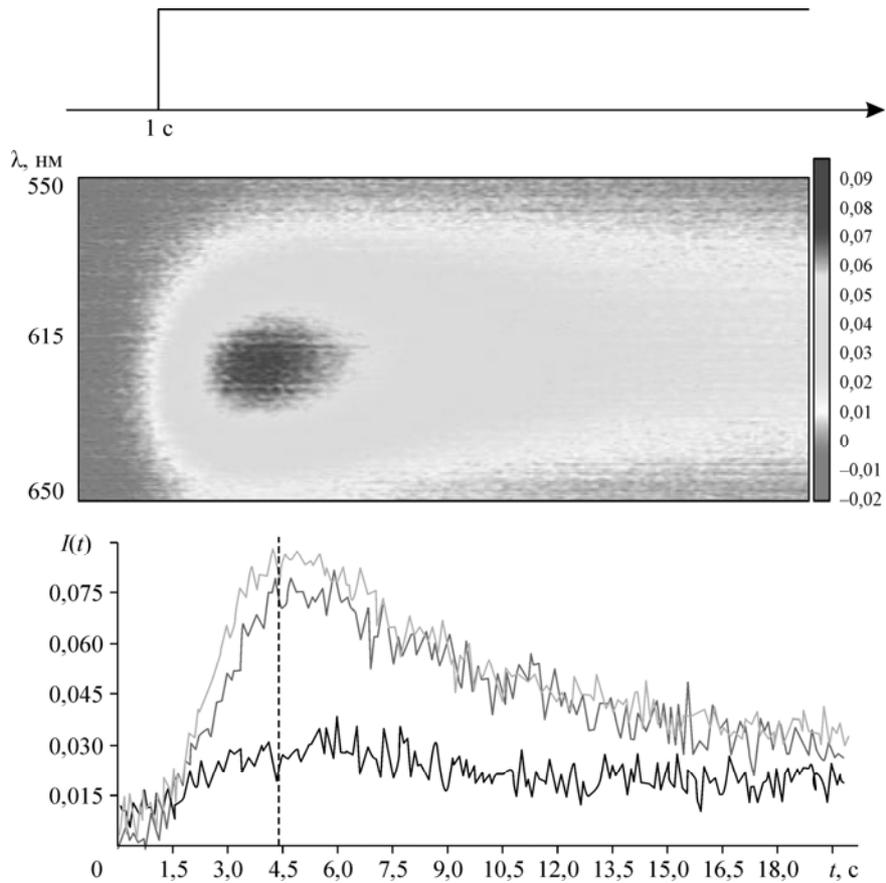


Рис. 3. Спектральный отклик ЖК на ступенчатый импульс: $I(t, \lambda)$ (в центре) и графики $I(t)$ для трех длин волн вблизи пика $\lambda_{\max} = 630$ нм. Длительность пуска $\Delta t = 19$ с.

Таким образом, для исследованных составов ЖК данные дискретных спектральных измерений показали наличие эффекта уровня касательного напряжения τ на время текстурного перехода.

В то же время для получения панорамного распределения τ необходимо перейти к анализу чувствительности колориметрических координат к уровню τ . С этой целью рассмотрим динамику изменения колориметрических координат в ходе текстурного перехода и, в первую очередь, колориметрическую интенсивность. В данной серии измерений цветные изображения задней стенки рабочей части трубы регистрировались с помощью цифровой фотокамеры. Момент начала воздействия потока на слой ХЖК

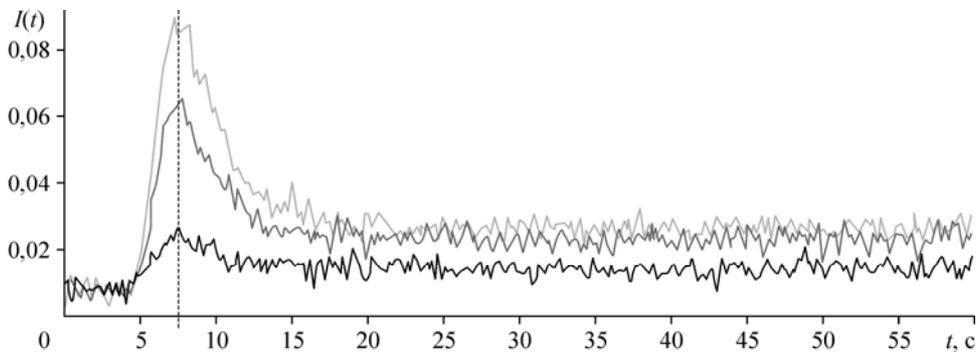


Рис. 4. Зависимость $I(t)$ для трех длин волн в ходе пуска длительностью $\Delta t = 56$ с.

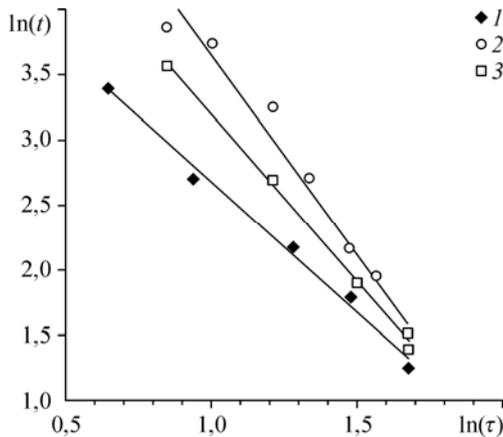


Рис. 5. Пример калибровочных зависимостей для трех разных составов ЖК.

$$1 — \ln(t) = -3,082 \ln(\tau) + 6,746, \text{ ЖК}_1; \quad 2 — \ln(t) = -2,575 \ln(\tau) + 5,78, \text{ ЖК}_2; \quad 3 — \ln(t) = -2,008 \ln(\tau) + 4,685, \text{ ЖК}_3.$$

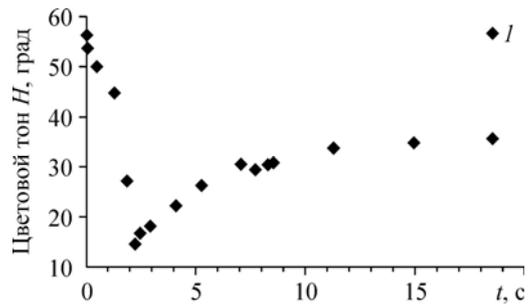


Рис. 6. Изменение цветового тона в ходе текстурного перехода.

$$I — H_{cp} \text{ при } \tau = 5 \text{ Па.}$$

с известным уровнем τ определялся с точностью до кадра (40 мс). На рисунках 6–8 показаны графики изменения координат H , S и I в зависимости от времени в ходе текстурного перехода в одном из пусков.

Видно, что форма кривых $I(t)$ и $S(t)$ на рис. 7–8 совпадает с формой спектрального отклика ХЖК (рис. 3), а временная зависимость $H(t)$ отличается, но также имеет экстремум и установившееся значение. Времена достижения максимумов $I(t)$ и $S(t)$ совпадают и составляют $t = 6$ с, а экстремум цветового тона H наблюдается ранее, при $t = 2$ с. Уровень τ заметно влияет на максимальное значение интенсивности (рис. 8). Причем, чем больше касательное напряжение, тем меньше время достижения I_{max} и тем больше I_{max} . Полученные данные позволяют оцифровать ЖК визуализацию полей касательных напряжений. В то же время времена отклика, полученные по временной зависимости интенсивности от касательного напряжения двумя способами (спектральным и колориметрическим) несколько отличаются. Причинами расхождения могут быть погрешности измерения времени, текстурный шум на изображении, размер окна для усреднения колориметрических координат и другие факторы, которые требуют дальнейшего исследования.

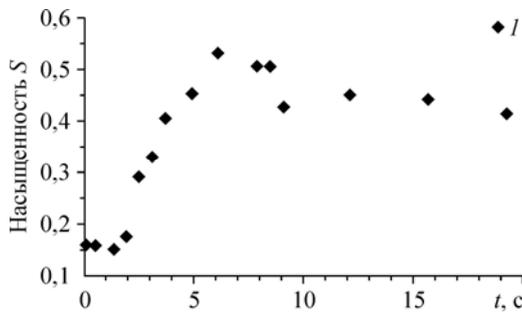


Рис. 7. Изменение насыщенности цвета в ходе текстурного перехода.

$$I — S_{cp} \text{ при } \tau = 5 \text{ Па.}$$

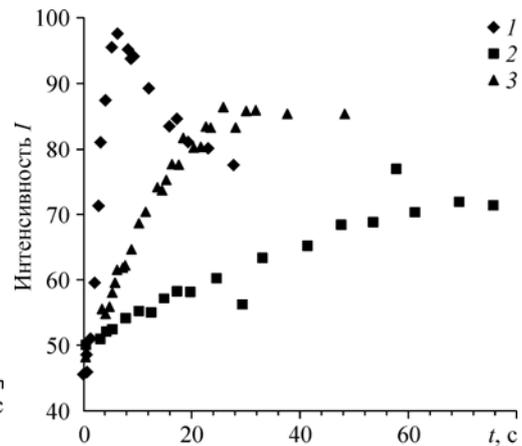


Рис. 8. Изменение интенсивности цвета в ходе текстурного перехода при трех уровнях касательных напряжений: $\tau = 5$ (1), 2, 3 (2), 3 (3) Па.

Заключение

Рассмотрена динамика спектрального и колориметрического отклика конфокальной текстуры ЖК (тройной смеси ХЖК) на ступенчатое воздействие дозвукового потока. Показано, что процесс текстурного перехода можно разбить на два этапа:

- нарастание пика интенсивности отражения до максимального уровня I_{\max} (при постоянной длине волны $\lambda_{\max} = \lambda(I_{\max})$), вызванное переориентацией все большего числа конфокальных доменов по потоку;
- последующий спад с выходом на установившееся значение $I_{\text{уст}}$, соответствующее сформировавшейся планарной текстуре с длиной волны λ_{\max} .

Измерения показали, что при увеличении уровня τ происходит уменьшение времени текстурного перехода. Для трех ЖК составов по спектрам отражения получены зависимости времени текстурного перехода (времени достижения I_{\max}) от уровня τ , которые могут быть использованы как калибровочные зависимости для получения количественной информации о касательных напряжениях.

Показано, что для панорамной диагностики касательных напряжений τ в аэродинамическом эксперименте целесообразно использовать аналогичные зависимости времени текстурного перехода от τ , полученные колориметрическим способом для цветовой координаты I (интенсивность). Кроме того, характер изменения цветовой координаты H (цветовой тон) и S (насыщенность) в процессе текстурного перехода также позволяет определять время текстурного перехода и зависит от уровня τ .

Полученная в результате текстурного перехода планарная текстура обладает большим временем релаксации (до нескольких часов и даже суток в зависимости от состава ЖК). Поэтому данный эффект может применяться также для визуализации τ в каналах без оптического доступа.

Авторы выражают признательность профессору Корнилову В.И. за ценные консультации.

Список литературы

1. Naughton J.V., Sheplak M. Modern developments in shear-stress measurement // Progress in aerospace sciences. 2002. Vol. 38. P. 515–570.
2. Беляков В.А., Сонин А.С. Оптика холестерических жидких кристаллов. Москва: Наука, 1982. 360 с.
3. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208.
4. Bonnett P., Jones T.V., McDonnell D.G. Shear-stress measurement in aerodynamic testing using cholesteric liquid crystals // Liquid Crystals. 1989. Vol. 6, No. 3. P. 271–280.
5. Mee D.J., Walton T.W., Harrison S.B., Jones T.V. A comparison of liquid crystal techniques for transition detection: AIAA Paper. 1991. No. 91-0062. 8 p. (29th Aerospace Sciences Meeting, Jan. 7-10, 1991).
6. Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Мухин В.А., Подъячев С.П., Хачатурян В.М. Применение жидких кристаллов для исследования теплообмена и структуры течения в канале с гофрированными стенками // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9, № 1. С. 103–113.
7. Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Khachatryan V.M. Visualization of Flow Structure in a channel with corrugated walls by liquid crystals // J. of Visualization. 2002. Vol. 5, No 4. P. 311.
8. US Patent 5 438 879, Reda D.C., 1995.
9. Parmar D.S. A novel technique for response function determination of shear sensitive cholesteric liquid crystals for boundary layer investigations // Review of Sci. Instruments. 1991. Vol. 62, No. 6, P. 1596–1608.
10. Reda D.C., Muratore J.J. Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings // AIAA J. 1994. Vol. 32. P. 1576–1582.

11. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P.** Experimental study of thin-film liquid crystal coatings for panoramic diagnostics of shear stress distribution on the model surface // Proc. of the XV-th, Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, 1–6 November, Novosibirsk, Russia, 2010. Pt 1. P. 253–254.
12. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P., Shapoval E.S., Mosharov V.E., Radchenko V.N.** Visualization of boundary layer transition by shear sensitive liquid crystals // Proc. PSFVIP-8: The 8th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing, 21-25 August, Moscow, Russia, 2011. No. 113. P. 1–5. ISBN 978-5-8279-0093-1.
13. **Харитонов А.М.** Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч.2. Методы и средства аэрофизических измерений: учебник. Новосибирск: НГТУ, 2007. 455 с.
14. **Patel V.** Calibration of Preston tube and limitations on its use in pressure gradient // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 23, Pt. 1. P. 185–208.
15. **Гуревич М.М.** Цвет и его измерение. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 268 с.

Статья поступила в редакцию 19 июня 2012 г.