

УДК 532.783

Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Россия,
630090, Новосибирск, Институтская ул., 4/1, E-mail: Kovrizh@itam.nsc.ru

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПРИСТЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ

АННОТАЦИЯ

В докладе приведены результаты исследования композиций на основе термотропных жидких кристаллов для диагностики касательных напряжений индуцированных пристенным течением. Описаны два подхода: использование оптического эффекта при переходе конфокальной текстуры в планарную и сдвиг длины волны селективного отражения планарной текстуры жидких кристаллов под влиянием трения. Даны примеры спектральных и колориметрических калибровок композиций.

ПАНОРАМНАЯ ДИАГНОСТИКА, ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ТЕМПЕРАТУРА

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач в прикладных аэродинамических исследованиях является экспериментальное определение локальных и интегральных значений сопротивления трения летательного аппарата. Поэтому разработка новых методов измерения и совершенствование существующих является актуальной. Среди косвенных методов измерения трения особый интерес представляют методы тонкопленочных покрытий, изменяющих свои оптические свойства под влиянием поверхностного трения. Связано это с тем, что они позволяют получить в одном эксперименте панорамную картину значений поверхностного трения, которая изменяется при изменении структуры пристенного течения.

Покрытие на основе анизотропных жидких кристаллов (ЖК) характеризуются многообразием оптических эффектов, которые возникают при переориентации ЖК под влиянием воздушного потока и температуры [1-8].

Для диагностики касательного напряжения поверхностного трения τ необходимы ЖК мало-чувствительные к температуре. Путем целенаправленного подбора состава многокомпонентной ЖК композиции, а также введением в состав композиции немезогенных микро – и нанодобавок, можно изменять чувствительность к температуре, касательному напряжению или угловому положению, а также времена отклика и релаксации.

Многообразие граничных условий на исследуемой поверхности требует разработки новых методик, алгоритмов и программ цифровой обработки оптической информации, полученной с помощью жидких кристаллов.

Целью данной работы было исследование механо-оптических свойств холестерических ЖК и отработка панорамных методов ЖК диагностики средних уровней касательных напряжений, индуцированных набегающим потоком на исследуемой поверхности.

ЖК МАТЕРИАЛЫ И ИХ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В качестве материалов использовались смеси холестерических ЖК (ХЖК), имеющих спиральную структуру с определенным шагом спирали. Комбинируя 3 ÷ 4 компонента ряда эфиров холестерина и ряда жирных кислот, удается варьировать в широких пределах шаг холестерической спирали и его температурную зависимость.

Характер возникающих оптических эффектов определяется исходной ориентацией молекул ЖК на исследуемой поверхности (текстурой). Для диагностики с помощью ХЖК использовались 2 текстуры: конфокальная и планарная. Конфокальная текстура рассеивает падающий на нее свет, планарная – селективно отражает.

На рис. 1 показана схема получения этих текстур из изотропного расплава ЖК и их вид, а также пример спектров отражения. Смесь ХЖК методом напыления наносится на предварительно почерненную исследуемую поверхность, затем расплавляется и медленно охлаждается. В результате формируется конфокальная текстура 1, которую механическим сдвигом можно трансформировать в планарную 2, цвет которой зависит от уровня касательного напряжения и/или температуры.

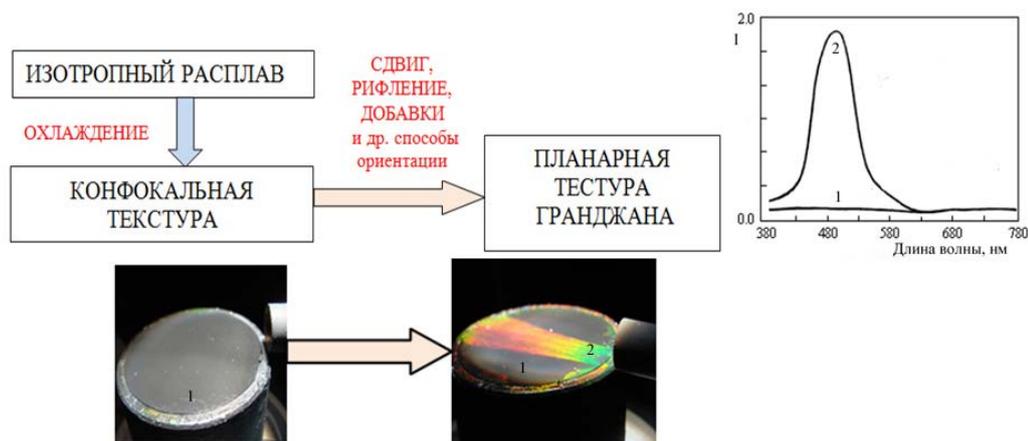


Рис. 1. Схемы получения конфокальной (1) и планарной (2) текстур; их изображения и спектры отражения (справа)

Установлено, что под влиянием набегающего потока в слое ЖК с начальной конфокальной текстурой происходит переориентация молекул, называемая далее текстурным переходом, в результате чего формируется планарная текстура. Время текстурного перехода t монотонно зависит от уровня τ и может быть описано, например, полиномом, рис. 2. Этот механо-оптический эффект может использоваться для панорамной диагностики течений.

В свою очередь, планарная текстура ХЖК обладает свойством избирательно отражать свет разной длины волны и разной круговой поляризации. Длина волны максимума селективного отражения λ_{max} зависит от величины шага холестерической спирали, которая может быть очень чувствительна к внешним воздействиям. На рис. 3 для 4х-компонентного ЖК состава показан пример зависимости селективного отражения от касательного напряжения $\lambda_{max}(\tau, T)$ при двух температурах, $T=21,5$ и 40°C . Для этого состава наблюдается так называемый «синий сдвиг» λ_{max} при увеличении касательного напряжения τ и «красный сдвиг» при повышении температуры, но чувствительность к температуре заметно ниже, $\Delta\lambda/\Delta T \cong (0,5 \div 0,7)$ нм/град, $\Delta\lambda/\Delta\tau \cong (2,2 \div 3)$ нм/Па. Влияние касательного напряжения на величину и положение пика селективного отражения можно описать, например, полиномом 2-3 порядка.

Полученная с помощью калибровок карта τ может быть дополнена картой температур T с помощью двумерной тарировки или полимерно-жидкокристаллических композитов, нечувствительных к касательным напряжениям. Добавим, что в аэродинамических экспериментах на дозвуковых режимах обтекания перепады температур по поверхности, обусловленные структурой течения в пограничном слое, обычно малы (от долей до нескольких градусов). Поэтому влиянием продольных градиентов температур можно пренебречь.

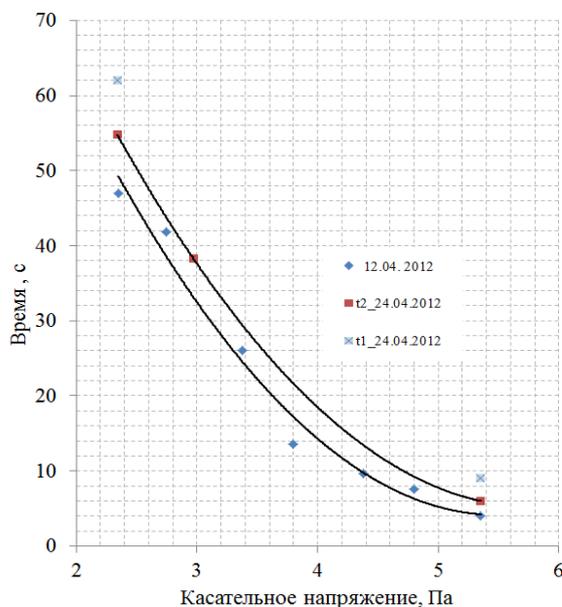


Рис. 2. Влияние касательного напряжения на время текстурного перехода из конфокальной в планарную текстуру $t_1 = 4,5689\tau^2 - 50,181\tau + 141,92$; $t_2 = 4,1924\tau^2 - 48,452\tau + 145,22$

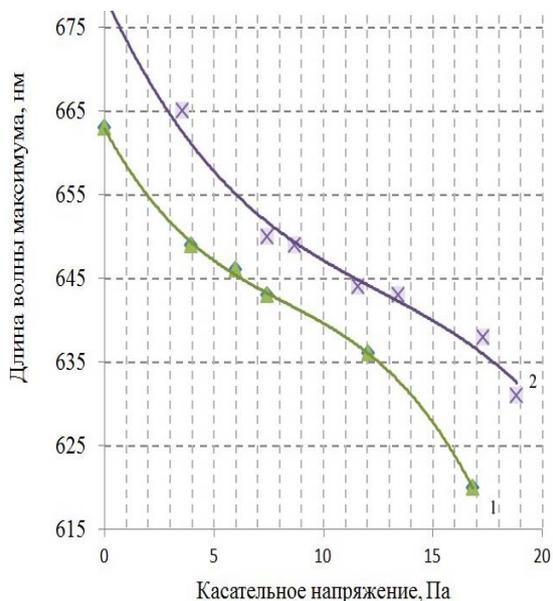


Рис. 3. Влияние касательного напряжения и температуры на селективное отражение планарной текстуры 1 - 21,5°C и 2 - 40°C

Ниже на рис. 4 показано как изменяется спектр оптического отклика планарной текстуры ЖК со временем $\lambda_{max}(\tau, t)$ при нарастании уровня касательного напряжения до $\tau=15,5$ Па в ходе эксперимента с двумя включениями. На левой панели цветом показана интенсивность I отражения, которая возрастает от красного к синему цвету (длина волны по вертикальной шкале, а время в секундах по горизонтали). Справа вверху показано изменение спектра селективного отражения (два момента времени), на котором видно смещение пика селективного отражения планарной текстуры $\Delta\lambda$ в коротковолновую часть видимого спектра и его уширение под воздействием потока с последующей релаксацией. График $I(t)$ приведен справа внизу.

Дискретные измерения $t(\tau)$ или $\lambda_{max}(\tau)$ подтверждают принципиальную возможность локальной диагностики τ , но для получения панорамного распределения необходимо перейти к видео регистрации и анализу цветного оптического отклика ЖК на воздействие потока и его изменения со временем. При этом для получения распределения $\tau(x, y)$ по исследуемой поверхности необходима высокая чувствительность колориметрических координат к измеряемой величине.

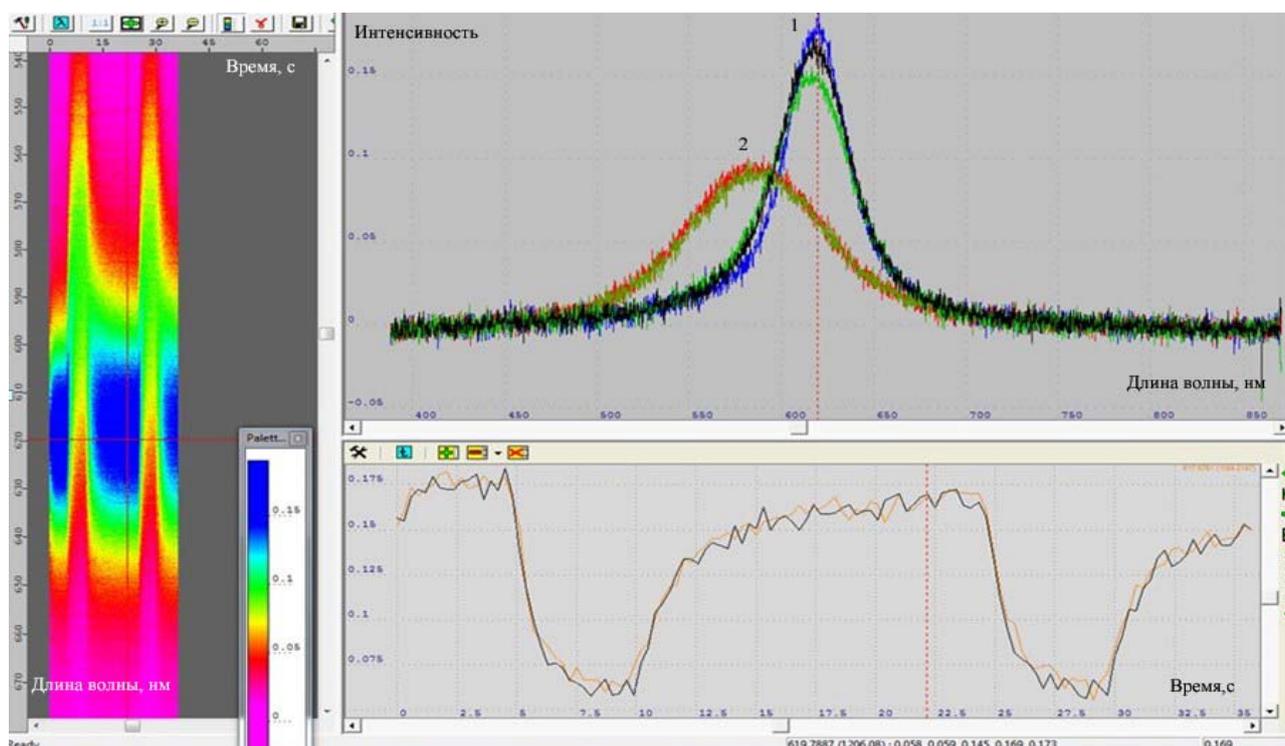


Рис. 4. Изменение спектра оптического отклика ЖК со временем при нарастании уровня касательного напряжения до $\tau = 15,5$ Па, 2 включения. 1- $\tau = 0$; 2 - $\tau = 15,5$ Па

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖК

Анализ литературы показывает, что для калибровки цвета ЖК покрытия относительно могут использоваться различные колориметрические системы. В наших работах для оцифровки касательного напряжения использовались две колориметрические системы:

HSI (цветовой тон *Hue*, насыщенность *Saturation* и интенсивность *Intensity*) и *HSV* (цветовой тон, насыщенность и светлота, *Value*) [10-11].

В частности, в этих колориметрических системах цвет характеризуется в величинах, понятных для его интуитивного восприятия. Ниже на рис. 5 показана используемая шкала цветового тона *H* и соответствующие ему цвет и длина волны. Величина цветового тона для чистых (не смешанных) цветов характерных жидким кристаллам не превышает 240 градусов.

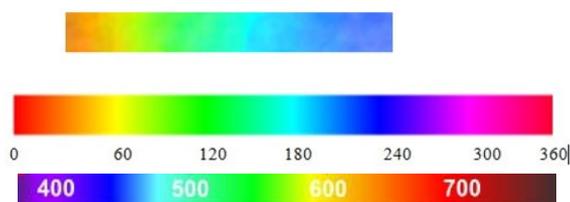


Рис. 5. Цвета ЖК (вверху), шкала цветового тона *H* (град), длина волны, нм (внизу)

На рис. 6 показан пример колориметрического отклика (цветовых координат) в двух базисах: *RGB* (красный, зеленый и синий) и *HSV* на 8-кратное воздействие потока (касательное напряжение τ).

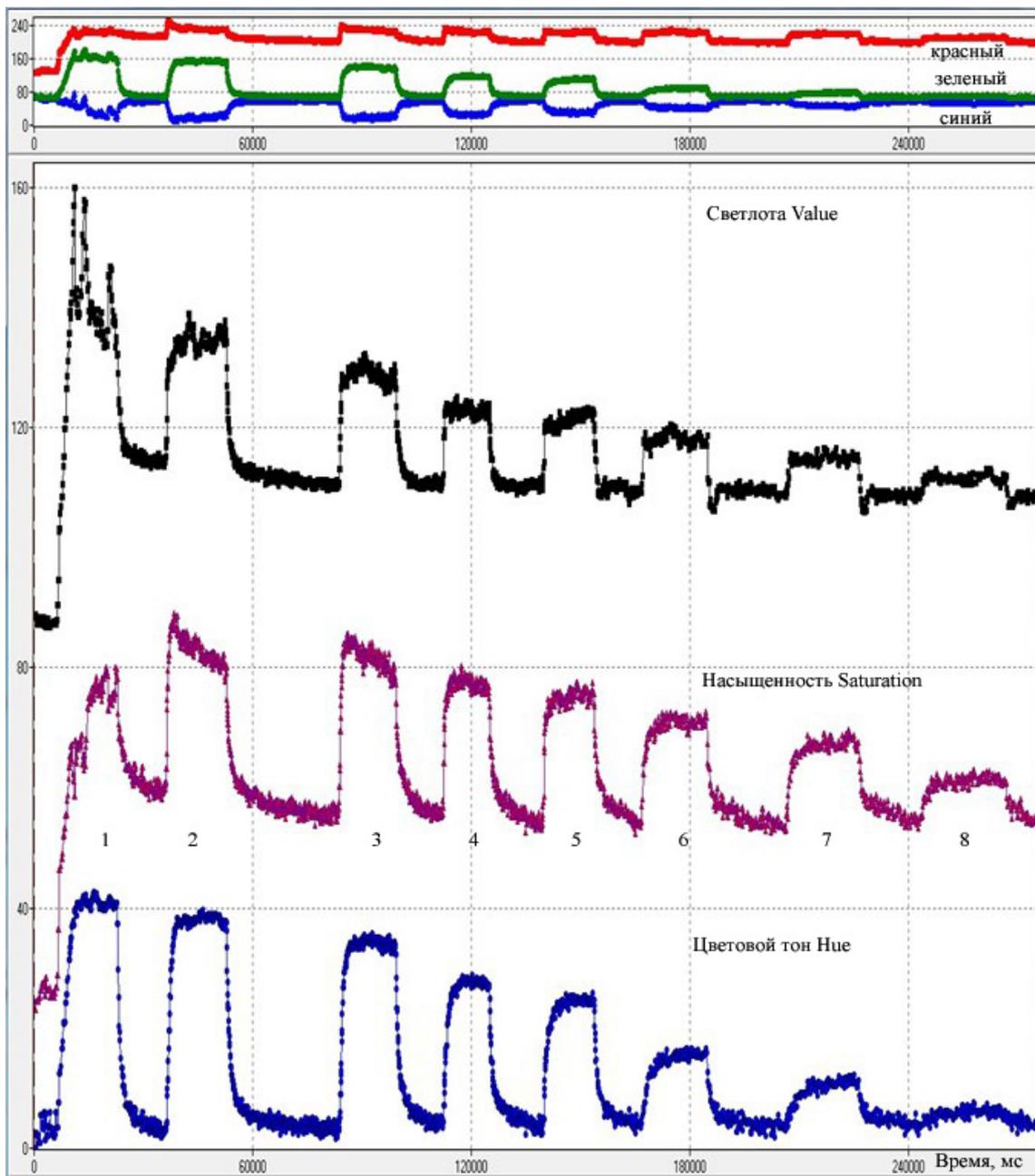


Рис. 6. Пример отклика цветковых координат в двух базисах RGB и HSV на касательное напряжение τ (8 включений по убыванию τ). Горизонтальная ось времени - в мс

На Рис.7 показан пример типичной зависимости цветкового тона от касательного напряжения $H(\tau)$. Установлено, что на эту характеристику заметно влияет качество исходной текстуры и способ ее получения. Кроме этого, приведенный ЖК состав обладает угловой зависимостью (θ - угол между направлениями освещения и регистрации), которая может быть использована для определения направления вектора касательного напряжения [7]. Видно, что с увеличением θ цветовой тон возрастает.

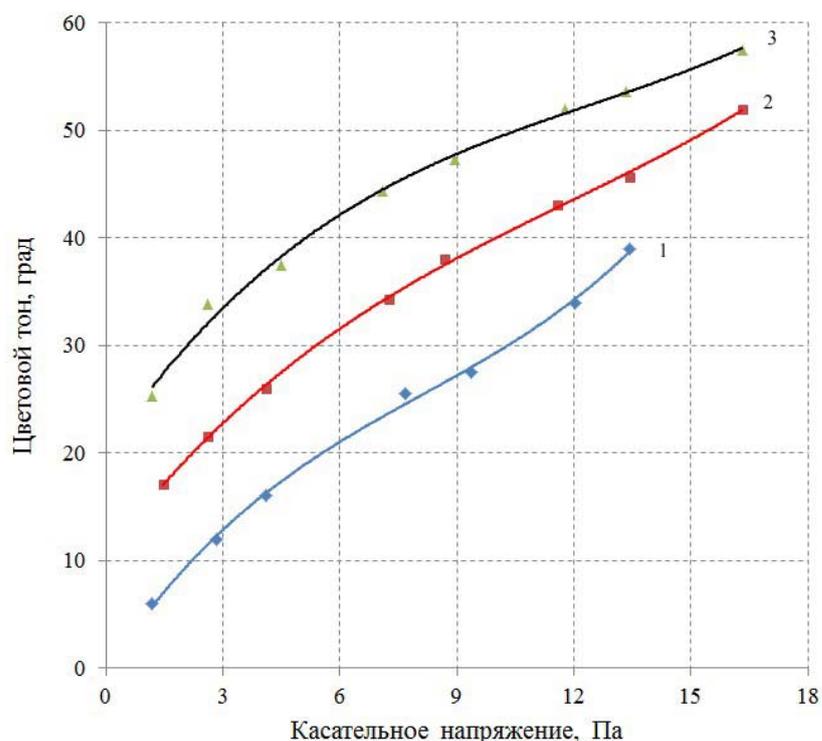


Рис. 7. Зависимость цветового тона от касательного напряжения $H(\tau)$. Влияние угла наблюдения: 1- $\theta = 30$; 2 - 45; 3 – 60

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное исследование разработанных в ИТПМ ЖК композиций показало, что изучаемые механо-оптические эффекты в холестерических ЖК позволяют осуществить панорамную визуализацию пристенных течений, а именно средних уровней касательных напряжений поверхностного трения, индуцированного до- и трансзвуковым потоком на поверхности моделей с малой кривизной. Карты τ , полученные с помощью ЖК, позволяют выбрать места для установки дискретных датчиков, проводить сравнительные параметрические исследования и т. д. Ценность полученных экспериментальных данных заключается и в том, что они позволяют построить математическую модель пленочного ЖК индикатора для предсказания оптического/колориметрического отклика и его характеристик.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

τ – касательное напряжение, Па;

λ – длина волны, нм;

$\Delta\lambda$ - смещение длины волны максимума, нм;

T – температура, К;

t – время, с;

θ – угол относительно нормали к поверхности, градус;

R, G, B – цветовые координаты красный, зеленый, синий;

H – цветовой тон, градус;

S – насыщенность, безразм.;

I – интенсивность, безразм.;

V – светлота, безразм.;

R, G, B - цветовые координаты красный, зеленый, синий. Безразм.

Индексы:

мах – максимальный;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляков В.А., Сонин А.С.** Оптика холестерических жидких кристаллов Москва: Наука.1982. 360с.
2. **Г.М. Жаркова, А.С. Сонин.** Жидко - кристаллические композиты. Наука. Новосибирск. 1994. 214 с.
3. **М. Л. Блинов** Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013.
4. **Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина, В.М. Хачатурян.** Экспериментальное исследование дозвуковых течений методом жидкокристаллической термографии. /ПМТФ, т.43, №2. 2002. с. 122-128.
5. **Жаркова Г.М., Коврижина В.Н** О задачах и перспективах панорамной жидкокристаллической диагностики в аэродинамическом эксперименте.// Сб. мат-лов конф. по измерительной технике и метрологии для экспериментальных исследований летательных аппаратов (КИМИЛА – 2014), 28-29 окт. 2014 г., ФГУП ЦАГИ, г. Жуковский, с. 197-218.
6. **Klein E.J., Margozi A.P.** Apparatus for the calibration of shear-sensitive liquid crystals.// Rev Sci. Instrum., 1970, 41, P. 238–239.
7. **Reda D.C., Muratore J.J.** Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings //AIAA J., 1994, 32, P. 1576-82.
8. **G.M. Zharkova, V.N. Kovrizhina, A.P. Petrov.** Shear-sensitive liquid crystals for diagnostics of boundary layer structure in aerodynamic experiment. // Visualization of mechanical processes, VMP, Vol. 3, Issue 1, 2013.
9. **Kovrizhina V.N., Shapoval E.S., Zharkova G.M.** Problems and achievements in panoramic shear stress diagnostics by liquid crystals./ Congress proceeding.29th Congress of the Int. Council of the aeronautical sciences, ICAS 2014, Russia, St. Petersburg, September, 7-12, 2014 г.
10. Гуревич М.М. Цвет и его измерение. — Издательство Академии наук СССР, 1950.
11. <http://www.linuxlib.ru/gimp/gimp/node148.html#poverhnostistvetovodinakovogotona>

G.M. Zharkova, V.N. Kovrizhina

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russia
630090, Novosibirsk, Institutskaya st., 4/1, E-mail: Kovrizh@itam.nsc.ru*

LIQUID CRYSTALS AND TECHNIQUES FOR NEAR-WALL FLOWS DIAGNOSTICS

The paper presents the results of thermotropic liquid crystals studies for diagnostics of shear stresses induced by near-wall flow. Two approaches are outlined: textural transition from confocal to planar texture and selective reflection shift of planar texture under shear stress. Spectral and colorimetric calibrations versus shear stress are given.

PANORAMIC DISTRIBUTION, LIQUID CRYSTALS, SHEAR STRESS, TEMPERATURE.