

**Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 26 — 30 июня 2017 г.**

УДК 535. 651:535.42

Г.М. Жаркова<sup>1</sup>, В.Н. Коврижина<sup>1</sup>, С.П. Подъячев<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> *Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Россия, 630090, Новосибирск, Институтская ул., 4/1. E-mail: [Zharkova@itam.nsc.ru](mailto:Zharkova@itam.nsc.ru)*

<sup>3</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им А.А. Трофимука СО РАН,  
пр. Академика Коптюга, 3. E-mail: [sergpody@yandex.ru](mailto:sergpody@yandex.ru)*

**АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ВИДЕОРЕГИСТРАЦИИ  
ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ЖК ПОКРЫТИЯМИ**

**АННОТАЦИЯ**

*Оптическая диагностика газодинамических параметров на поверхности обтекаемой модели может выполняться с помощью холестерических жидких кристаллов. Для цифровой обработки видеозаписей панорамного цветного оптического отклика холестерических жидких кристаллов на внешние возмущения (касательное напряжение поверхностного трения, температура) необходимо специализированное программное обеспечение. В докладе будут описаны возможности качественной и количественной диагностики с помощью ПО задач аэро- и теплофизического эксперимента, разработанного с использованием интегрированной среды быстрой разработки приложений Lazarus.*

**ПАНОРАМНАЯ ДИАГНОСТИКА, ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ВИДЕЗАПИСЬ, ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА.**

**ВВЕДЕНИЕ**

Существует несколько видов ЖК покрытий, чувствительность которых к тому или иному воздействию (температура  $T$ , касательное напряжение  $\tau$ , давление  $P$ , изменение состава - примеси) может изменяться в определенных пределах. Регистрация нестационарного оптического отклика тонкопленочного покрытия на основе жидких кристаллов холестерического (ХЖК) или нематического (НЖК) типов на внешнее воздействие осуществляется с помощью цифровой фото - и /или видео техники. Причем в зависимости от задачи, число регистрирующих камер может увеличиваться до 3÷5. Большой объем полученных экспериментальных данных по изучению жидких кристаллов (ЖК) и их применению в аэрофизических исследованиях требует анализа и их интерпретации [1-5].

В настоящее время существует немало инструментов автоматизированного анализа многомерных данных и визуализации результатов измерений (статистический, факторный, регрессионный и т.д.). А также открытых сред для разработки специализированных пакетов программ и отдельных модулей, в том числе для панорамных оптических измерений. Некоторые из них позволяют реализовать широкий спектр процедур и методов, не требуя профессионального опыта программирования и с использованием отдельных модулей свободно - распространяемого программного обеспечения (ПО) и сред для его разработки, например Lazarus [6].

Lazarus - это Интегрированная Среда Разработки программ (Integrated Development Environment, IDE), использующая компилятор FPC (Free Pascal Compiler), редакторы кода, форм, инспектор объектов, отладчик и многие другие инструменты. [7]. Другое ее название - среда Быстрой Разработки Приложений (Rapid Application Development, RAD). Lazarus является первой IDE, доступной образовательным и государственным учреждениям бесплатно. Это проект с открытым исходным кодом (Open Source), который доступен для изучения и модификации, поддерживается множеством языков, в том числе и русским: Он базируется на оригинальной кроссплатформенной библиотеке визуальных компонентов Lazarus Component Library (LCL). Большим преимуществом этой программы является возможность компиляции для любых операционных систем (Windows, OSX, Linux и Windows CE).

На сегодняшний день для автоматизации обработки и анализа результатов фото и видео регистрации оптического отклика ЖК на внешние воздействия в ИТПМ СО РАН разработан ряд программных модулей, которые могут быть использованы наряду со стандартными средствами обработки цветных изображений (Photoshop, VirtualDub и др.) [8]. При разработке ставилась задача автоматизации максимального количества процедур и приближения от полу-автоматического режима обработки экспериментальных данных к максимально автоматизированному. В работе кратко описываются операции первичной (получение физических величин) и вторичной обработки цветной видеозаписи оптического отклика ЖК используемые для изучения структуры дозвукового обтекания исследуемой поверхности.

## **ОБРАБОТКА ЦИФРОВОГО ВИДЕОПОТОКА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ МЕТОДОМ ЖК**

Апробация и тестирование разработанного ПО осуществлялись при разрешении цветного изображения 1280 на 720 пикселей и частоте съемки 25 кадров (50 полей) в сек. Такая частота является оптимальной для холестерических ЖК.

Зарегистрированная видеозапись содержала временную последовательность сжатых цветных изображений, которые распаковывались в формат RGB. Для обработки цветных изображений использовалась система колориметрических координат HIS. В этой системе  $H$  (*hue*) - цветовой тон, интуитивно понятная величина, которая обратно-пропорциональна доминирующей длине волны. Как показали измерения, в области селективного отражения ХЖК эта величина в определенном оптическом диапазоне длин волн однозначно связана с измеряемой физической величиной. Как правило, при увеличении температуры или касательного напряжения поверхностного трения наблюдается сдвиг длины волны селективного отражения ХЖК в коротковолновую часть спектра или изменение цвета ЖК покрытия от красного к синему.

Другие две координаты ( $S$  – насыщенность и  $I$  – интенсивность) использовались для дополнительного анализа и предварительной обработки исходных данных (отбраковка аномальных значений или значений, не имеющих физического смысла; заполнение пропусков).

В первичной обработке экспериментальных данных с ЖК можно выделить следующие основные операции:

- просмотр и навигация по видеозаписи в форматах MP4, AVI;
- выбор рабочего временного интервала; при этом можно установить значения времени для трех видеок кадров - базового, кадра 1 и кадра 2 и положение маркера в кадре. Заданное время кадра 1 и кадра 2 можно ввести в полях ввода. При нажатии соответствующей кнопки будет установлено время текущего кадра.

- выделение окна с текущим кадром, в котором изображение можно вращать, указав значения угла поворота в поле ввода; Эта процедура необходима для пространственного

совмещения кадров, зарегистрированных при различных угловых положениях регистрирующей аппаратуры.

- осреднение цветовых координат по заданному окну;
- получение масштабирующих коэффициентов по двум координатам;
- калибровка цветовых координат относительно измеряемой величины;
- задание калибровки в виде полинома или таблицы;
- оцифровка полученного цветного изображения;
- экспорт данных в буфер.

В общем случае разработанное ПО позволяет осуществлять калибровку цветового тона ХЖК в зависимости от

- уровня (модуля) входного воздействия ( $T, P, \tau$ )
- направления вектора входного воздействия (вектора  $\tau$ ), т.е. углового положения регистрирующей аппаратуры.

При использовании эффекта текстурного перехода ХЖК из конфокальной в планарную текстуру для измерения модуля  $\tau$  осуществляется калибровка времени отклика ЖК покрытия  $t_{откл}$  на ступенчатое воздействие относительно модуля  $\tau$  [8].

Полученные калибровочные зависимости используются для последующей оцифровки изображений.

Вторичная обработка включает операции:

- графическое пространственно-временное представление; Графики создаются по значениям вдоль верхней или левой границы выделенного прямоугольника. Их можно с помощью мыши перемещать, а также выделить область графика для более детального показа (или вернуть обратно пределы для показа всего графика).

- 2D и 3D представление данных о цветовом тоне и оцифрованных физических величинах;

- вычитание фона и/или нормирование физической величины;
- экспорт данных для сохранения их в буфер и получения полей исследуемых физических величин.

Карта цветового тона может представлять комбинацию значений цветового тона 2-х кадров - базового и выбранного текущего кадра. Для этого надо указать операцию «Вычитать» или «Делить» и указать коэффициенты соответствующих формул. Если выбрать меню «Без операции», то  $H$  высчитывается только для выбранного текущего кадра. Интенсивность (яркость) показывается только для текущего.

При вычислении значению цветового тона  $H$  можно указать необходимые условия - минимальную яркость ( $I$ ) и минимальную насыщенность цвета ( $S$ ) отсутствие насыщения амплитуды компонент  $R, G, B$ ). Если условия не выполняются, то выводится черный цвет. Кроме этого для  $H$  можно выводить не все цвета из диапазона ( $H_{min} - H_{max}$ ). Если  $H$  меньше  $H_{min}$ , то выводится черный цвет. Если  $H$  больше  $H_{max}$ , то выводится белый цвет.

Вычитание начального кадра из текущего позволяет, например, определить относительное пространственное положение и протяженность областей одномерного (1D) отрыва потока, в которых ЖК покрытие не претерпело изменения цвета. Или же исключить влияние дефектов. Такая операция с матрицами цветового тона  $H$  будет корректной только на участке линейной зависимости касательного напряжения  $\tau$  от  $H$ .

Интерпретация полученных данных зависит от целей эксперимента и формы входного воздействия (ступенчатое, импульсное или произвольное.). В настоящее время большинство экспериментаторов, применяющих ЖК для аэродинамических и теплофизических исследований, как для калибровки ЖК, так и для измерений используют ступенчатое входное воздействие или последовательность кратковременных прямоугольных импульсов. В этом случае упрощается вторичная цифровая обработка экспериментальных результатов.

## Пример применения цифровой обработки

Рассмотрим некоторые процедуры цифровой обработки на данных эксперимента, целью которого является диагностика структуры дозвукового турбулентного течения на стенке узкого канала с выступом и детектирование ее особенностей. Для детектирования особенностей пристеночных течений могут быть использованы методы визуализации линий тока, полей температур, полей касательного напряжения с помощью ЖК разных типов. Оптическая визуализация позволяет увидеть необходимые экспериментатору закономерности и связи между параметрами 2D картины, линии тренда и аномалии, дефекты исследуемой поверхности или диагностического покрытия.

Метод визуализации поверхностных линий тока с помощью ЖК чувствительных к сдвигу аналогичен методам сажа - масляной пленки, методу густого масла или пленке двуокиси титана в керосине. Основное различие этих методов заключается в интерпретации (расшифровке и истолковании) этих данных, что зависит от конечной цели и физической зависимости входной и выходной величин. ЖК визуализация линий тока осуществляется путем напыления ЖК смеси на исследуемую поверхность. Поверхностные линии тока наблюдаются невооруженным глазом как результат течения ЖК по поверхности. При этом разным уровням касательного напряжения будут соответствовать разные оттенки (или цвета струйки). Для улучшения качества изображения оно может быть преобразовано цифровым способом с помощью стандартных фильтров с целью выделения интересующих признаков (границ областей отрыва или присоединения потока и т.д.).

На рис. 1-2 показан результат применения фильтра filter Emboss 10pix Adobe Photoshop к ЖК визуализации линий тока на поверхности узкого канала с выступом трапецевидной формы в плане при дозвуковом обтекании. Такая фильтрация помогает визуально подчеркнуть особенности структуры (линии или области отрыва, присоединения, область перехода из ламинарного течения в турбулентное). Это позволяет более точно определить геометрические характеристики структуры течения с целью дальнейшего исследования.

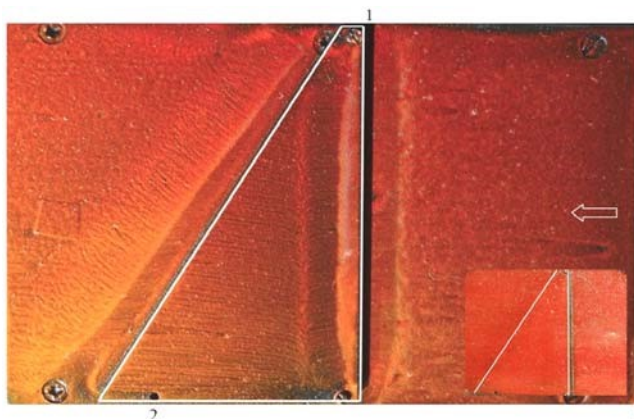


Рис. 1. ЖК визуализация линий тока. 1- тень от выступа, 2- цилиндрическая каверна. Врезка справа внизу - вид ЖК покрытия перед пуском.

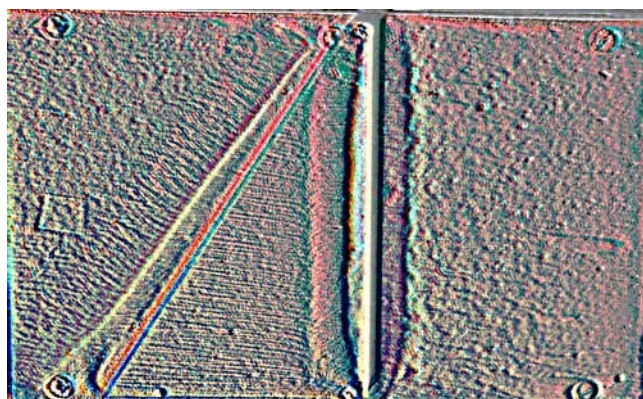


Рис.2. ЖК визуализация линий тока после цифровой обработки фильтром Emboss Рис. 1.

На рисунках 3 и 4 приведены ЖК визуализация и карта цветового тона, полученная в эксперименте с ЖК покрытием нечувствительным к температуре, но чувствительным к касательному напряжению. Покрытие данного типа так же, как и линии тока позволяет локализовать основные структуры исследуемого течения и их характеристики. Видно, что основные элементы структуры поля согласуются с данными, полученными выше.

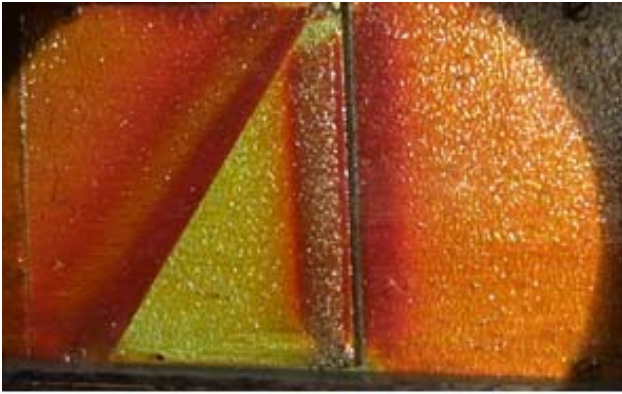


Рис. 3. Оптический отклик ЖК покрытия, чувствительного к касательному напряжению.

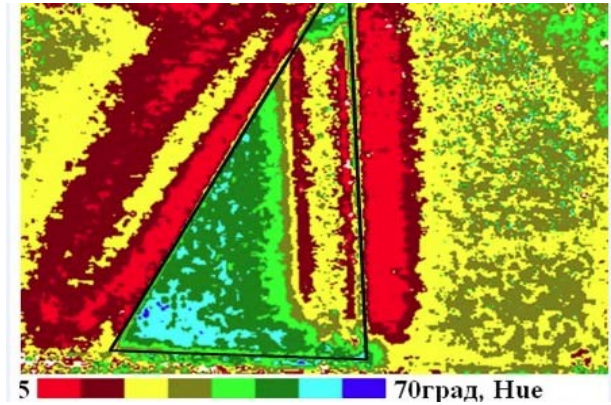


Рис.4. Карта цветового тона  $H(x,y)$  для оптического отклика ЖК покрытия, чувствительного к касательному напряжению.

В тех случаях, когда в эксперименте нет априорной информации об ожидаемом разбросе измеряемой величины, для предварительной оценки используется экспресс-диагностика. На Рис. 5 показаны результаты такой диагностики поля температур на этой же модели с помощью термоиндикаторного ЖК: вид поверхности модели с ЖК покрытием до эксперимента (а) и на режиме (с). Карты распределения цветового тона  $H$  (б, д) позволили, в частности, выявить дефекты покрытия, малозаметные глазом, оценить их значимость количественно, локализовать области их влияния на картине результирующего распределения (д).

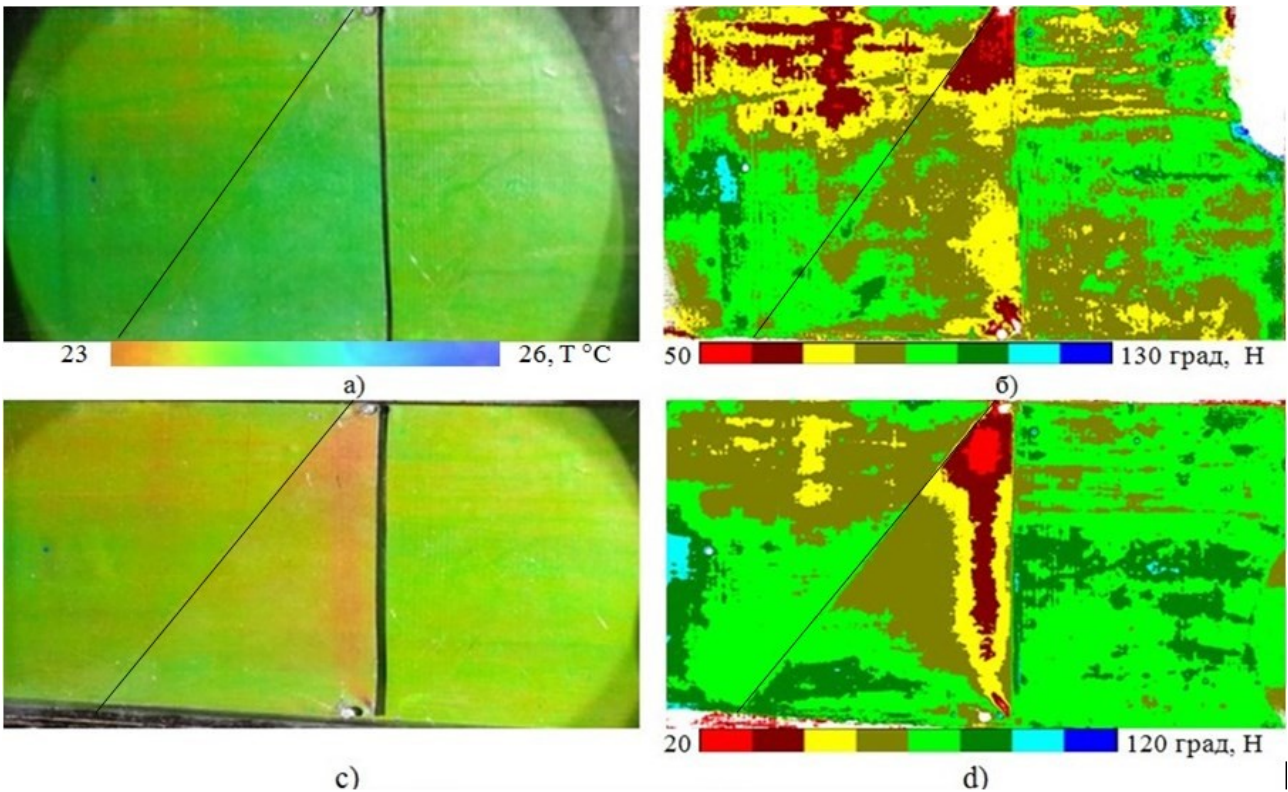


Рис. 5. Оптический отклик термоиндикаторного ЖК (а - без потока, с- на режиме) и соответствующее ему распределение цветового тона (б, д).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье кратко описана программа цифровой обработки цветной видеозаписи оптического отклика жидких кристаллов, разработанная с использованием интегрированной среды Lazarus и стандартных средств обработки изображений. Показаны возможности программы, позволяющие выявлять тонкие детали пристенного обтекания модели из картин визуализации в аэро- и теплофизических экспериментах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жаркова Г.М., Коврижина В.Н.** Механо-оптические эффекты в жидких кристаллах и методы их использования для исследования потоков // Сб. трудов 11-той Междун. Научн.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков» М.:МЭи 27 — 30 июня 2011 г., Доклад № 86, 15 с. – ISBN 978-5-9902974-1-8 – № гос. регистрации 0321101669.
2. **Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Хачатурян В.М.** Полимерно-жидкокристаллические материалы для оптической диагностики поверхностных температур и их применение в аэрофизическом эксперименте // коллективная монография «Современные оптические методы исследования потоков». Под ред. Б.С. Ринкевичюса. М.: Оверлей, 2011.с.360., с. 275-290.
3. **Жаркова Г.М., Коврижина В.Н.** Жидкокристаллические материалы и методы диагностики пристенных течений//«Оптические методы исследования потоков» (ОМИП2015), XIII-тая Междун. науч.-технич. конференция [Электр.ресурс]: Труды конф. – Электрон дан. - М., НИУ «МЭИ», 2015-CD-ROM.-С.8-14 –ISBN 978-5-00086-752-5.
4. **Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Петров А.П., Подъячев С.П.** Панорамная диагностика касательных напряжений на стенке канала с выступом с помощью жидких кристаллов/Теплофизика и аэромеханика, Том 23, №6, 2016 г. 865-873.
5. **Жаркова Г.М., Коврижина В.Н., Подъячев С.П.** О возможности измерения касательных напряжений методом жидких кристаллов/ Сборник материалов II отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов (КИМИЛА 2016). ФГУП ЦАГИ, г.Жуковский, 25-26.10.2016. .(Электр ресурс) CD-ROM.с.452-459.
6. [<http://www.intuit.ru/studies/courses/13745/1221/lecture/23276>]
7. <http://lazarus.freepascal.org>].
8. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P.** Panoramic liquid crystal indicators of shear stresses: three effects and three approaches to measurements//Int. conf. on the methods of aero-physical research (ICMAR-2014). June 30– July 6, Novosibirsk, Russia. Abstracts Part 2. / ITAM SB RAS. – 2014. – Pp. 237-238.

G.V. Zharkova<sup>1</sup>, V.N. Kovrizhina<sup>1</sup>, S.P. Podyachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics (ITAM SB RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, Institutskaya str., 4/1. E-mail: [Zharkova@itam.nsc.ru](mailto:Zharkova@itam.nsc.ru)*

<sup>2</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, prospect of Academician Koptyug, 3. E-mail: [sergpody@yandex.ru](mailto:sergpody@yandex.ru)*

## ANALYSIS AND INTERPRETATION OF VIDEO REGISTRATION DATA FROM EXPERIMENTS WITH LIQUID CRYSTALS COATINGS

*Optical diagnostics of gas-dynamic parameters on the model surface may be realized by cholesteric liquid crystals. For digital processing of video records with panoramic color response*

*of LCs on external disturbances (skin friction shear stress and temperature) the special software is required. The possibilities of qualitative and quantitative diagnostics by means of software developed for aero- and thermos-physical studies and IDE Lazarus will be outlined in the paper*

PANORAMIC DIAGNOSTICS, LIQUID CRYSTALS, SHEAR STRESS, VIDEO RECORD, DIGITAL PROCESSING