

Научный обзор

УДК 532.783 + 533.6.071.3

**МЕХАНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

Галина Михайловна Жаркова*, Валентина Николаевна Коврижина

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича, Новосибирск, Россия

И Н Ф О Р М А Ц И Я

История статьи:

Поступила 4.07.2022

Одобрена 28.07.2022

Принята 1.08.2022

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
ориентационные эффекты,
визуализация и измерение,
касательные напряжения

А Н Н О Т А Ц И Я

В статье представлен краткий обзор оптических свойств низкомолекулярных термотропных жидкокристаллов и результатов их использования в аэrodинамике как панорамных жидкокристаллических сенсоров поверхностного трения. Анализируются различные подходы к измерению величины и направления вектора касательного напряжения. Приводятся примеры панорамной диагностики касательных напряжений на поверхностях аэродинамических моделей при различных скоростях потока.

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.3.6

Для цитирования:

Жаркова Г. М., Коврижина В. Н. Механо-оптические эффекты в жидкокристаллах и их использование для измерения касательных напряжений в аэродинамическом эксперименте // Жидк. крист. и их практич. использ. 2022. Т. 22, № 3. С. 6–25.

*Адрес для переписки: zharkova@itam.nsc.ru

© Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., 2022

Review

**MECHANO-OPTICAL EFFECTS IN LIQUID CRYSTALS AND THEIR USE
FOR SHEAR STRESS MEASURING IN AERODYNAMIC EXPERIMENT**

Galina M. Zharkova*, Valentina N. Kovrzhina

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 4 July 2022
Approved 28 July 2022
Accepted 1 August 2022

The brief review of the optical properties of low molecular weight thermotropic liquid crystals and the results of their use in aerodynamics as panoramic liquid crystal shear stress sensors are presented. Various approaches to measuring the magnitude and direction of the shear stress vector are analyzed. Examples of panoramic diagnostics of shear stresses on the surfaces of aerodynamic models at various flow rates are given.

Key words:

liquid crystals,
orientational effects,
visualization and
measurement,
shear stresses

DOI:

10.18083/LCAppl.2022.3.6

For citation:

Zharkova G. M., Kovrzhina V. N. Mechano-optical effects in liquid crystals and their use for shear stress measuring in aerodynamic experiment. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (3), 6–25 (in Russ.).

* Corresponding author: zharkova@itam.nsc.ru

© Zharkova G. M., Kovrzhina V. N., 2022

Введение

Уменьшение сопротивления трения летательного аппарата представляет собой один из наиболее крупных резервов экономии энергоресурсов. Неудивительно, что поиск путей и методов воздействия на структуру пристенного течения с этой целью продолжает оставаться одной из основных задач прикладной аэродинамики [1]. Вместе с тем эта задача требует разработки новых и совершенствования старых приборов и средств диагностики пристенных течений. Поэтому актуальной является разработка панорамных методов диагностики как величины, так и направления вектора касательного напряжения. Список существующих панорамных оптических методов измерения поверхностного трения весьма невелик. Он включает различные модификации лазерной интерферометрии масляной пленки, метод термочувствительных покрытий в сочетании с аналогией Рейнольдса между поверхностным трением и теплоотдачей, упругие полимерные пленки, чувствительные к сдвигу [2–4].

Для визуализации направления вектора касательного напряжения традиционно используются методы визуализации предельных линий тока (метод шелковинок, масляных точек, двуокись титана с керосином, метод сажи – масляной визуализации [5, 6]).

Впервые применять жидкокристаллические покрытия для диагностики температуры и трения предложил Klein E. [7, 8]. На исследуемую поверхность наносится тонкий слой жидкких кристаллов (ЖК), чувствительных к касательным напряжениям, и по изменению оптических свойств покрытия, судят о величине касательного напряжения и направлении вектора касательного напряжения. Предложенный метод интенсивно развивался. Использование современных методов цифровой обработки изображений позволило получать не только качественные результаты, но и количественные данные о панорамной картине течения, зафиксированной с помощью ЖК.

Цель данной работы – краткий обзор механо-оптических эффектов в тонком слое нематических и холестерических ЖК и их использования для диагностики распределения средних уровней и направления векторов касательных напряжений поверхностного трения.

Оптические эффекты в термотропных ЖК

Описанию жидкких кристаллов и их свойств посвящена обширная литература [9–11]. В прикладной аэродинамике сформировались и совершились два подхода к визуализации и измерению касательных напряжений с помощью ЖК. Они базируются на свойствах молекулярной структуры двух разновидностей ЖК. Это нематические (НЖК) и холестерические (ХЖК) кристаллы, надмолекулярная структура, которых в жидкокристаллическом состоянии, показана в табл. 1. Оптические свойства ЖК проявляются только при определенной ориентации молекул в слое. Каждый тип ЖК при заданной ориентации образует свои характерные текстуры, получение которых на исследуемой поверхности является важным технологическим условием их применения для диагностики течений.

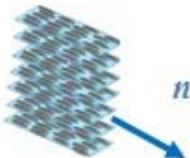
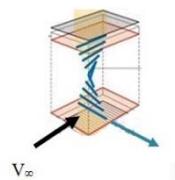
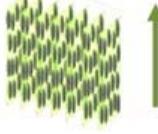
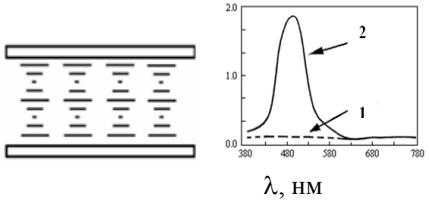
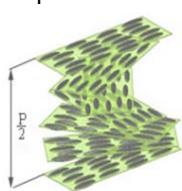
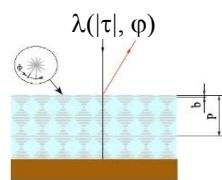
У НЖК можно выделить преимущественное направление длинных осей молекул, называемое директором *n*, поэтому они обладают свойствами одноосного кристалла с оптической осью параллельной директору *n*, в частности, двулучепреломлением и дихроизмом.

Для практического использования в аэродинамике представляют интерес две текстуры НЖК: планарная (длинные оси молекул расположены параллельно подложке), и гомеотропная (длинные оси молекул перпендикулярны подложке). Обычно планарную ориентацию ЖК-молекул на подложках получают механическим натиранием стекла бумагой или тканью. Гомеотропная ориентация, как правило, достигается нанесением на подложку различных поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Холестерические ЖК – это разновидность нематических ЖК со спиральной слоистой структурой. Расстояние *P* вдоль холестерической оси, на котором директор поворачивается на 360°, носит название шага холестерической спирали. ХЖК в отсутствии внешних возмущений и в зависимости от способа нанесения на поверхность, могут образовывать конфокальную или планарную текстуру. В конфокальной текстуре оси холестерических спиралей ориентированы беспорядочно относительно друг друга, вследствие чего образец сильно рассеивает свет, и слой ХЖК выглядит бесцветным.

Таблица 1. Текстуры и эффекты в ЖК, применяемые для диагностики поверхностного трения

Table 1. Textures and effects used for shear stress diagnostics

Начальная ориентация	НЖК	
	Без потока	В потоке
планарная	<p>n – направлен параллельно поверхности</p> 	<p>Эффект вращения плоскости поляризации света твист-структурой при $V_\infty \perp n$</p> 
гомеотропная	<p>n – направлен перпендикулярно поверхности. Между скрещенными поляризаторами в пучке света, проходящего параллельно оптической оси, образец темный из-за отсутствия двулучепреломления.</p> 	<p>Эффект изменения двойного лучепреломления. Возникает деформация продольного изгиба и двойное лучепреломление. Образец просвetaется при освещении монохроматическим светом или окрашивается при освещении белым светом</p>
ХЖК		
	Без потока	В потоке
конфокальная	<p>n – направлен произвольно поверхность не окрашена</p> 	<p>Текстурный переход из конфокальной в окрашенную планарную ориентацию. Эффект памяти.</p>  $\ln(\tau) = A + B \cdot \ln(t)$
планарная	<p>n – направлен параллельно поверхности, ось спирали – перпендикулярно поверхности. Поверхность окрашена.</p> 	<p>Дифракция Вульфа-Брэгга, Эффект изменения длины волны селективного отражения циркулярно-поляризованного света.</p> 

Планарная текстура ХЖК (ось спирали параллельна подложке) обладает свойством селективного отражения света и имеет дифракционную природу. По Вульфу – Брэггу длина волны света с максимальной интенсивностью $\lambda_{\max} = 2nd \sin \alpha$, где $d = p/2$ – период решетки; α – угол между падающим лучом и холестерической плоскостью. При освещении белым светом перпендикулярно поверхности $\lambda_{\max} \approx nP$, ширина пика селективного отражения $\Delta\lambda = P\Delta n = \lambda(\Delta n/n)$. В реальности в отличие от дифракции Вульфа – Брэгга угловая зависимость селективного отражения из-за несовершенства образцов имеет более сложную угловую зависимость длины волны максимума селективного отражения и наблюдается только один пик при нормальном падении [10].

Вязкоупругие свойства жидких кристаллов

Упругие и вязкостные характеристики ЖК в основном определяют их поведение при деформациях различной природы и влияют на их релаксационные характеристики. В отличие от деформации твердого тела в жидких кристаллах деформация сжатия – растяжения очень мала, а деформации сдвига приводят к течениям. Поэтому основной является упругость, связанная с локальным изменением ориентации директора. Для диагностики потоков с помощью оптических эффектов ЖК нужна высокая чувствительность локального поля директора ЖК к малым изменениям внешнего воздействия.

Основой рассмотрения практически всех явлений в ЖК, связанных с пространственными изменениями директора, является свободная энергия Франка, которая в векторных обозначениях для случая произвольной деформации ХЖК имеет вид:

$$F = \frac{1}{2} [K_{11}(\operatorname{div} \vec{n})^2 + K_{22}(\vec{n} \cdot \operatorname{rot} \vec{n} + \frac{\pi}{2P_0})^2 + K_{33}(\vec{n} \cdot \operatorname{rot} \vec{n})^2]$$

Здесь первый член соответствует поперечному изгибу, второй – кручению и спиральному закручиванию в отсутствие внешних деформаций, третий – продольному изгибу. В уравнении для НЖК отсутствует член $\pi/2P_0$. Данное уравнение хорошо описывает деформации ЖК в результате воздействия внешних механических напряжений и температуры. В последнем случае от температуры зависят константы упругости и шаг спирали ХЖК.

Поскольку константы упругости ЖК очень малы, а структурные элементы жидких кристаллов связаны достаточно слабыми дисперсионными силами, то экстремально малые внешние воздействия приводят к значительным деформациям. Это, в свою очередь, вызывает резкое изменение их текстуры и всех оптических свойств (в силу большой оптической анизотропии ЖК).

Ориентационные эффекты в НЖК и методы диагностики пристенных течений на их основе

Жидкие кристаллы в потоке подвергаются одновременному воздействию температуры, давления и поверхностного трения. Поэтому при разработке методов измерения касательного напряжения поверхностного трения необходимо исключить влияние на них температуры и давления (или нормальные напряжения). Влияние температуры можно значительно уменьшить, подбирая ЖК-смеси, нечувствительные к температуре.

Известно, что перекрестные вторичные эффекты между нормальными и касательными напряжениями исчезают при планарной и гомеотропной ориентации НЖК. Поэтому именно эти две ориентации НЖК изучаются для диагностики касательных напряжений, обусловленных потоком в аэродинамическом эксперименте.

Для ХЖК было показано, что в диапазоне статического давления от 760 до 0,005 мм. рт. ст. ($1,013 \cdot 10^5$ –0,67 Па) уменьшение давления на текстуру и оптические свойства ЖК практически не оказывают влияния [7, 12]. Таким образом, остается проанализировать оптические эффекты, возникающие в тонком слое ЖК под влиянием касательных напряжений, и оценить возможность их применения для диагностических целей в аэродинамическом эксперименте.

Эффект изменения двойного лучепреломления при переориентации НЖК с гомеотропной ориентацией

Впервые влияние сдвига на НЖК с гомеотропной ориентацией применительно к аэродинамическим целям было исследовано в работе [13], где было численно рассчитано возникающее в НЖК сдвиговое течение и соответствующая переориентация длинных осей молекул кристалла (директора n). По полученным данным находится оптический отклик всей системы.

В частности, показано, что по изменению фазы прошедшей через слой НЖК необыкновенной световой волны можно определить как скорость потока газа на свободной поверхности НЖК, так и константу напряжения сдвига. На основании этого предложен алгоритм измерения поверхностного трения. Гомеотропный образец НЖК, характеризуется свойствами кристаллической решетки, вырезанной из одноосного кристалла перпендикулярно оптической оси. Если такую пластинку поместить между скрещенными поляризаторами, то в пучке света, проходящего параллельно оптической оси, она будет выглядеть темной из-за отсутствия двупреломления. Под влиянием потока возникает деформация продольного изгиба НЖК и двойное лучепреломление. Образец просветляется при освещении монохроматическим светом или окрашивается при освещении белым светом. Таким образом, теоретически по оптическому сигналу возможно определение величины напряжения сдвига.

Однако одной из трудностей при практической реализации предложенного метода является сложность формирования слоя НЖК с гомеотропной ориентацией на твердой поверхности со свободной верхней границей, так как ЖК стремятся образовывать капли. Поэтому более перспективным представляется случай планарной (тангенциальной) ориентации молекул в слое НЖК, формирование которой осуществляется достаточно просто.

Эффект закручивания планарной текстуры НЖК и изменения удельного вращения плоскости поляризации света

Если направление осей молекул НЖК, изначально ориентировано планарно и перпендикулярно направлению сдвиговой деформации, индуцированной набегающим потоком, планарная текстура переходит в закрученную твист-структуре. В результате этого изменяется оптическая активность НЖК, возникает эффект вращения плоскости поляризации света, и интенсивность света, как отраженного от НЖК покрытия достаточной толщины, так и проходящего, изменяется. Оптический отклик зависит от приложенного напряжения сдвига, времени воздействия, вязкости и коэффициента двойного лучепреломления НЖК.

В Институте теоретической и прикладной механике (ИТПМ) было выполнено теоретическое рассмотрение возможности использования оптического отклика НЖК с планарной текстурой на стационарную сдвиговую деформацию перпендикулярную директору НЖК в одноконстантном приближении [14]. Поскольку в данном случае деформация директора происходит не в одной плоскости, для описания переориентации молекул НЖК необходимо было рассматривать 2 угла, полярный и азимутальный. Показано, что воздействие потока приводит к возникновению так называемой твист-структуры с характерной толщиной переходного слоя, зависящей от величины градиента скорости. Получены приближенное аналитическое решение для изменения азимутального угла φ по толщине слоя НЖК для стационарного случая, оценки для толщины переходного слоя, изменения кажущейся вязкости в зависимости от градиента скорости. При малом градиенте скорости (или скорости верхней границы слоя) переориентация будет проходить слабо $\varphi \approx 0$ и $\eta \approx \eta_3$ (конечная планарная ориентация), а при больших скоростях или градиентах скорости $\varphi = \pi/2$ и $\eta \approx \eta_2$ (конечная планарная ориентация, течение Пуазейля с установленнымся полярным углом θ_0 ($\operatorname{tg}^2 \theta_0 = (\alpha_3/\alpha_2)$), где α_3, α_2 вязкие параметры ЖК).

Аэродинамический эксперимент в такой геометрии описан в [15]. Эксперимент проводился в канале прямоугольного сечения 8×25 мм, измерения осуществлялись при малых дозвуковых скоростях потока. На нижней стенке канала помещалась плоская пластина с нанесенным на нее слоем поливинилацетата (ПВА), натертым мягкой тканью в одном направлении и задающим планарную ориентацию НЖК, перпендикулярную направлению потока. В качестве НЖК использовалась смесь аллоксицианбифенилов с широким температурным диапазоном существования ЖК-фазы (примерно, 40°). Через верхнюю прозрачную стенку канала образец освещался плоско поляризованным светом (под углом 30° к плоскости пластины).

В отсутствии потока плоско поляризованный свет с ориентацией, параллельной ориентации НЖК, проходит через слой НЖК, и далее установленный перед фотоприемником поляризационный фильтр с перпендикулярной ориентацией не пропускает его.

Под влиянием потока молекулы НЖК начинают ориентироваться в его направлении, но силы сцепления между молекулами НЖК и нанесенным слоем полимера препятствуют этому, в результате возникает закрученная структура, которая изменяет первоначальную поляризацию проходящего света. По мере переориентации жидкокристаллического слоя за счет приложенного касательного напряжения интенсивность света, проходящего через второй поляризатор, резко возрастает. Установлено, что при постоянной скорости потока отклик НЖК оказался постоянным в течение 3 мин (рис. 1, *a*). При уменьшении скорости потока от 5,5 м/с до 1,4 м/с, сигнал интенсивности НЖК также уменьшался. Показано, что оптический отклик слоя НЖК (интенсивность, нормированная на оптический отклик невозмущенного НЖК, $- H/h$) под действием потока воздуха в некотором интервале скоростей однозначно определяет тангенциальное напряжение в точке на обдуваемой поверхности (рис. 1, *б*). Экспериментальная зависимость H/h хорошо аппроксимируется прямой $H/h = 1 + C U_{\infty}^{3/2}$, где C – константа, не зависящая от U_{∞} . Как известно, зависимость поверхностного трения от скорости потока над плоской пластиной выражается формулой $\tau \sim U_{\infty}^2/(Re_y)^{1/2}$. Учитывая, что $Re_y = U_{\infty}y/v$ (y –

координата точки наблюдения, v – кинематический коэффициент вязкости), получим $\tau \sim U_{\infty}^{3/2}$.

В исследованном диапазоне скоростей потока воздуха толщина слоя НЖК не влияет на оптический сигнал в течение «рабочего времени» ($t_2 - t_1$). Использование нормирования сигнала позволяет исключить влияние угловой зависимости на отклик, поскольку используется отношение 2-х сигналов, каждый из которых зависит от угла наблюдения одинаковым образом. Полученные экспериментальные результаты в одной точке соответствуют математической модели рассматриваемого течения, предложенной в [14].

Использование видео-регистрации с последующим вводом данных в ПК позволяет получать панорамное распределение поверхностного трения на всей исследуемой поверхности, применяя этот метод, как в режиме проходящего через слой НЖК света, так и отраженного от него. В серии работ группы исследователей из Оксфордского университета и университета Южного Квинсленда (Австралия) представлены результаты исследования влияния сдвига на оптический отклик НЖК (интенсивность и время переориентации), а также тестирования этого подхода измерения [16–18].

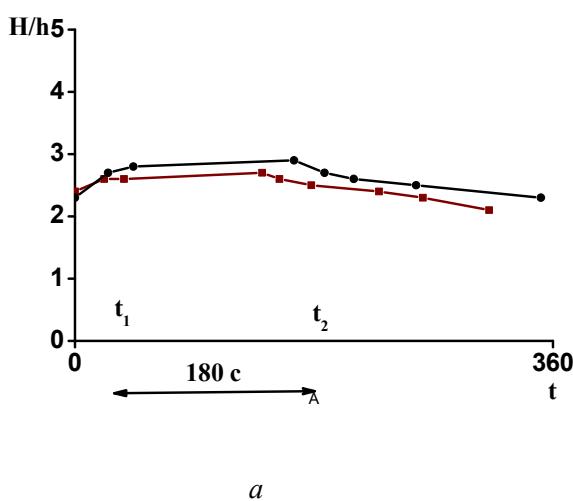
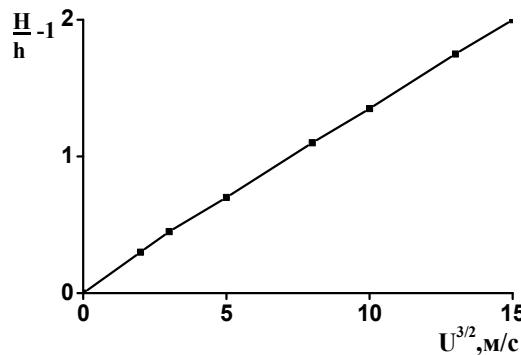
*a**б*

Рис. 1. Зависимость величины интенсивности оптического отклика от времени (*a*) и зависимость $(H/h - 1)$ от скорости набегающего потока U_{∞} в степени 3/2 (*б*) [15]

*Fig. 1. Dependence of the intensity of optical response on time (*a*) and dependence of $(H/h - 1)$ on the free stream velocity U_{∞} to the power of 3/2 (*b*) [15]*

В частности, в [16, 17] была исследована чувствительность НЖК к направлению приложенного вектора касательного напряжения. Эксперименты выполнялись в ламинарном потоке с использованием вращающейся вставки, вмонтированной в нижнюю часть канала прямоугольного сечения $1 \times 20 \times 180$ мм, что позволяло изменять угол ориентации директора НЖК относительно потока. Вставка покрывалась слоем поливинилацетата, по которому с помощью вельвета наносились бороздки. Использовались нематические ЖК марки E7 (*Merck Ltd, England*).

Динамика и стационарный оптический отклик НЖК фиксировались видео-камерой в поляризованном монохроматическом свете. Измерения осуществлялись как в режиме регистрации интенсивности проходящего света, так и отраженного при очень низких уровнях касательных напряжений от 0,05 до 0,31 Па. Использовалось освещение с помощью кварцевой лампы через матовую бумагу и фильтр 670 нм. Времена релаксации НЖК марки E7 изменялись от 0,73 с до 1,37 с при увеличении касательного напряжения от 0,05 до 0,31 Па, что позволило использовать этот метод в экспериментах длительностью несколько секунд.

Авторы пришли к выводу, что НЖК могут применяться как для измерения величины, так и направления вектора касательного напряжения [18]. Предложены две различных стратегии измерений: с использованием зависимости уровня сигнала интенсивности от начальной ориентации директора относительно потока или с использованием зависимости времени релаксации от начальной ориентации директора. Однако при любом подходе оказалось важно избежать определенных уровней сдвига и начальных углов ориентации, которые приводят к потере чувствительности (пороговый эффект). Для измерения этих неопределенных уровней сдвига возможно повторение эксперимента с использованием НЖК с другими константами

упругости, толщиной слоя и начальной ориентацией. Подходящая начальная ориентация директора может быть получена путем простого подбора требуемого направления бороздок при подготовке поверхности.

Описанные эксперименты выполнялись на небольших стендах при малых уровнях касательных напряжений длительностью эксперимента от нескольких секунд до сотен секунд. После подтверждения данного эффекта его тестирование было реализовано авторами в условиях дозвуковой аэродинамической трубы университета в Оксфорде с размерами рабочей части $0,3 \div 0,5$ м в диапазоне скоростей $u = 3 \div 13.9 \text{ мс}^{-1}$ и $\tau < 1,5 \text{ Па}$ [18].

В экспериментах, выполненных в ИТПМ, диапазон исследуемых значений касательного напряжения был расширен до 15 Па [19]. Исследования выполнялись на дозвуковой трубе с размером сечения рабочей части 12×80 мм в режиме отражения линейно-поляризованного света. В качестве исследуемой смеси использовался нематик отечественного производства: ЖК1289 (ГНЦ НИОПиК), область существования мезофазы которого $\Delta T = (-20 \div 62^\circ\text{C})$. Цель работы – исследование спектрального отклика НЖК на воздействие касательных напряжений, индуцированных дозвуковым потоком, набегающим перпендикулярно директору. Показано, что в диапазоне касательных напряжений до $\tau \approx 15$ Па (или скоростей набегающего потока до 80 м/с) нормированная интенсивность света, отраженного от слоя закрученного нематика, монотонно увеличивается более чем в 3 раза и позволяет уменьшить влияние толщины ЖК-покрытия (рис. 2, а). Такая чувствительность НЖК к сдвиговой деформации может быть использована для диагностики касательных напряжений в аэродинамическом эксперименте (рис. 2, б).

Видно, что чувствительность ЖК1289 к сдвигу выше, если измерения производятся с уменьшением касательного напряжения.

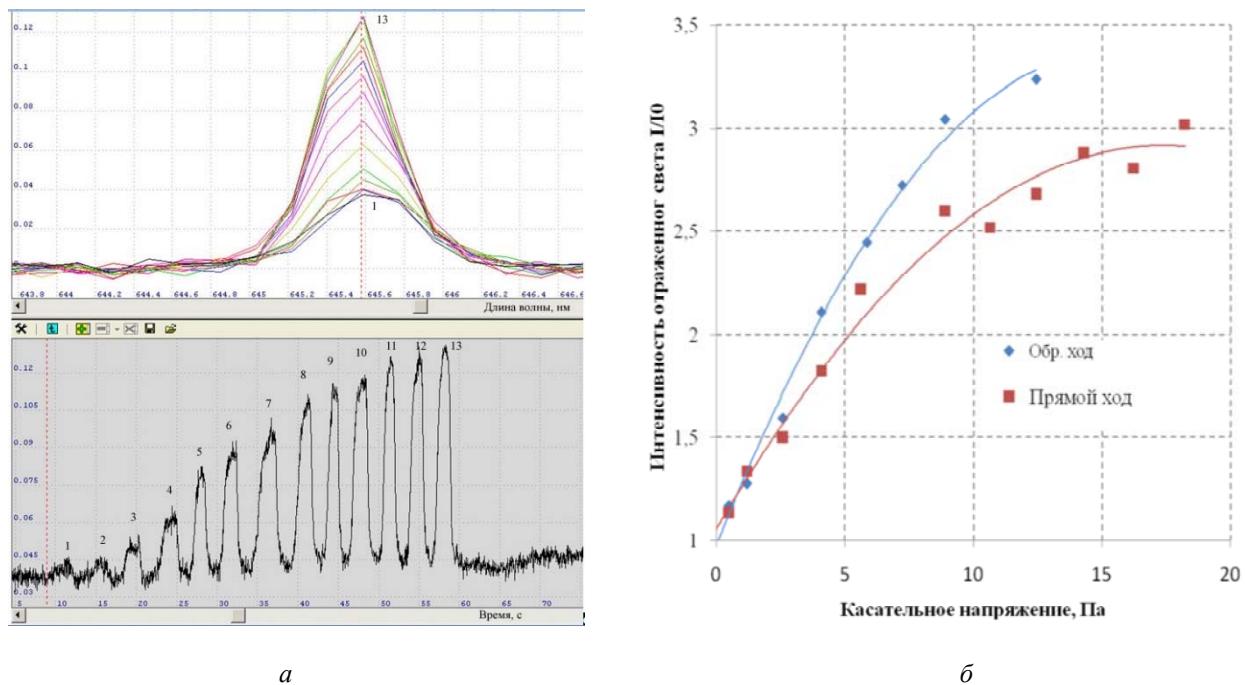


Рис. 2. Оптический отклик системы (ЖК1289 на ПВА) на кратковременные пуски с нарастающим уровнем касательного напряжения: *a* – $I_R(\lambda)$ при разных τ ; *b* – сравнение калибровок, полученных в экспериментах с нарастающим и убывающим уровнем касательного напряжения $I_R(t)$ для $\lambda = \lambda_{\max} \approx 645,6$ нм [19]

Fig. 2. Optical response of the system (LC1289 on PVA) to short-term starts with an increasing level of shear stress. *a* – $I_R(\lambda)$ for different τ ; *b* – comparison of calibrations obtained in experiments with increasing and decreasing levels of shear stress $I_R(t)$ for $\lambda = \lambda_{\max} = 645.6$ nm [19]

Ориентационные эффекты в холестерических жидкокристаллах и методы диагностики пристенных течений на их основе

Текстурный переход ХЖК из конфокальной в планарную текстуру

Жидкокристаллическое покрытие с конфокальной текстурой, нанесенное на исследуемую поверхность, рассеивает свет и выглядит бесцветным. В потоке под воздействием поверхностного трения (τ) происходит текстурный переход конфокальной текстуры в окрашенную планарную текстуру. Вначале переход происходит в областях с самым высоким уровнем касательных напряжений. Затем постепенно окрашиваются участки с более низкими уровнями τ . Текстурный переход является необратимым. Такой метод визуализации касательных напряжений независим от источника излучения, ни от направления

наблюдения, и может применяться в условиях без оптического доступа к исследуемой модели.

В числе первых экспериментальных работ, посвященных применению эффекта текстурного перехода в ХЖК для измерения касательных напряжений, были работы [20–21]. В [20] отрабатывались основные технологические приемы метода. В частности, методы нанесения ЖК на поверхность: напыление, кисть и нанесение через трафарет (*silk-screen printing*). Калибровка жидкокристаллов относительно касательных напряжений осуществлялась с помощью вращающегося диска. В сужающемся канале авторами было реализовано течение с уровнями τ до 100 Па. Измерения выполнялись для ряда композиций (закрученных, хиральных НЖК *BDH Ltd.* и *Hallcrest Ltd.*) на основе E7, E9, E44, CB15 и C-T/G114F.

Кроме этого, исследовано влияние времени эксперимента и температуры ХЖК (вязкости) на

положение границы текстурного перехода (окрашивание поверхности). В [20] также показано, что калибровочная зависимость хорошо аппроксимируется временной функцией вида $\ln(t) = A + B \ln(\tau)$. Предложен метод модификации реологических свойств ЖК путем добавления Аэросила, что позволяет расширить диапазон измеряемых уровней τ за счет увеличения вязкости.

В [21] метод текстурного перехода впервые был использован для количественного измерения поверхностного трения в переходном пограничном слое. Визуализация и измерение распределения касательных напряжений на модели плоской пластины выполнялись в трубе периодического действия при дозвуковых скоростях потока (до 40 м/с). Использовалось покрытие на основе ЖК марки TI511(BDH Ltd. of Poole, England). Диапазон измеренных касательных напряжений составлял $\tau \approx 2,5 \div 4$ Па. Выполнено сравнение с расчетными данными. Отмечается, что условие прилипания слоя ЖК к поверхности нарушается раньше в областях с высокими касательными напряжениями, где ЖК начинают течь.

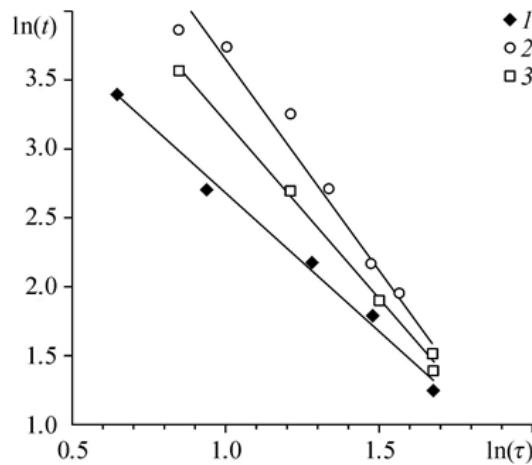


Рис. 3. Пример калибровочных зависимостей для трех ЖК составов эфиров холестерина [22]

Fig. 3. An example of calibration curves for three LC compositions of cholesterol esters [22]

Вследствие этого на участках с большими отрицательными градиентами касательного напряжения в направлении потока текущие ЖЖК могут маскировать участки с низкими τ , где еще сохранилась конфокальная текстура. Экспериментальные данные показали, что для низких значений напряжения сдвига (< 2 Па) этот метод недостаточно надежен для получения количественных результатов. Достоверные результаты были зафиксированы при скоростях потока 33,5 и 63,5 м/сек. Чтобы получить результаты при более низких значениях сдвига, необходимо использовать ЖК низкой вязкости.

В работе [22] рассмотрена динамика спектрального и колориметрического отклика конфокальной текстуры ЖЖК на ступенчатое воздействие дозвукового потока. Исследования проводились в лабораторной дозвуковой мини-трубе с перечным сечением 12×80 мм, при дозвуковых скоростях < 80 м/с. В экспериментах использовались смеси эфиров холестерина и ряда кислот, работающие в диапазоне τ до 10 Па.

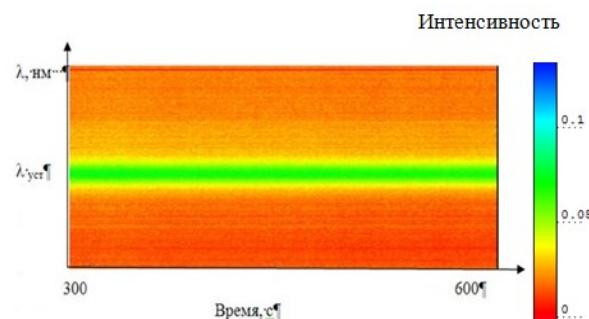


Рис. 4. Зависимость длины волны и интенсивности отраженного света от времени после окончания текстурного перехода [22]

Fig. 4. Dependence of reflected light wavelength and intensity on time after the texture transition [22]

Измерения показали, что при увеличении уровня τ происходит уменьшение времени текстурного перехода эфиров холестерина также в соответствии с уравнением $\ln(\tau) = A + B \ln(t)$, а время отклика зависит от состава используемых ХЖК (рис. 3). Картинка распределения максимальных уровней τ , полученная в процессе текстурного перехода ХЖК, сохраняется продолжительное время,

рис. 4. Это позволяет использовать данный эффект (память ЖК) в каналах без оптического доступа к исследуемой поверхности и изучать картину течения после остановки потока. Так, метод текстурного перехода ХЖК успешно применялся для визуализации структуры пристенного течения в канале теплообменника с гофрированными стенками, рис. 5 [23].

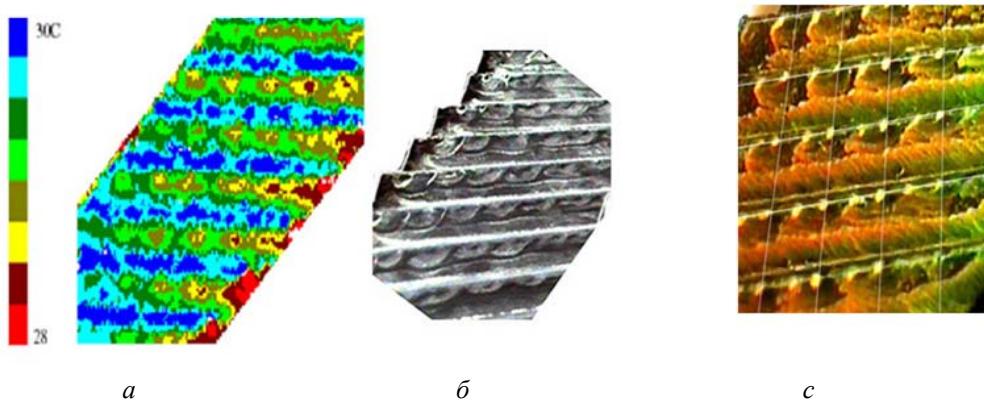


Рис. 5. Визуализация поля температур (a), линий тока (б) и касательного напряжения (c) на поверхности гофрированной пластины в канале теплообменника методом текстурного перехода в ХЖК [23]

Fig. 5. Visualization of temperature (a), streamlines (b) and shear stresses (c) on the corrugated plate surface by textural transition in cholesterics [23]

Эффект смещения пика селективного отражения планарной текстуры ХЖК под влиянием механического сдвига

Влияние механического сдвига на оптические свойства планарно ориентированных ХЖК было исследовано многими авторами, например [24, 25]. Основные выводы этих исследований – деформация ХЖК, вызываемая сдвигом, сопровождается изменением спектра отражения. Предполагалось, что холестерическая спираль реагирует на сдвиг как жесткий стержень, наклоняющийся при сдвиге перпендикулярном оси спирали со слабым разрушением (табл. 1), при этом изменяется длина волны света, отраженного от поверхности ХЖК.

Впервые применение эффекта изменения цвета ХЖК со спиральной структурой под влиянием механического сдвига в аэродинамическом эксперименте было предложено Е. Klein [7, 8].

Экспериментально установлено, что для многих исследованных смесей ХЖК при этом наблюдалось смещение $\Delta\lambda_{\max}$ длины волны отраженного света, как правило, в синюю область спектра.

Известно также, что длина волны, отраженного от слоя ХЖК света, зависит от угла между падающим лучом и осью регистрирующей аппаратуры. При фиксированном угле наблюдения относительно нормали к исследуемой поверхности длина волны λ_{\max} зависит не только от модуля $\vec{\tau}$, но и от азимута ϕ , т.е. угла в горизонтальной плоскости между вектором $\vec{\tau}$ и направлением наблюдения (проекцией оси камеры). Reda D.C. предложил применять нечувствительные к температуре холестерические ЖК не только для измерения уровня касательных напряжений, но и для определения направления вектора касательных напряжений [26, 27].

Для получения панорамной количественной информации, зарегистрированные цветные изображения оцифровываются с помощью калибровки. При этом цветное изображение (матрица цветовых координат R,G,B) в результате цифровой обработки преобразуется в цветовой тон H , насыщенность S и интенсивность I для последующего анализа и измерения физических параметров.

В работах Reda D.C отмечалось, что существует определенная нечувствительность длины волны селективного отражения света к направлению вектора τ , когда угол между вектором τ и углом измерения не превышает 15 градусов. Исторически применение ХЖК покрытий развивалось по двум направлениям: 1 – визуализация и измерение средней величины касательного напряжения; 2 – измерение величины касательного напряжения и визуализация вектора касательного напряжения.

Визуализация и измерение средней величины касательного напряжения

Любые структурные изменения в пристенных течениях сопровождаются изменением распределения касательных напряжений на поверхности обдуваемой модели. Под влиянием этих напряжений изменяется цвет ХЖК-покрытия, нанесенного на модель, по которому можно отслеживать такие явления как переход ламинарного течения в турбулентное, отрыв или присоединение потока и др. Визуализация и измерение средней величины поверхностного трения позволяет с успехом использовать метод ХЖК при исследовании структуры пристенных течений [28–46].

В [28–30] приведены результаты летных испытаний ХЖК-покрытий для определения структуры пристенного течения (перехода ламинарного течения в турбулентное) летательных аппаратов на различных высотах и скоростях потока (дозвуковых, сверхзвуковых). В исследованиях использовались холестерические жидкие кристаллы разных типов (эфиры

холестерина и хиральные нематики). Выбор кристаллов определялся требованием широкого рабочего температурного интервала ХЖК, чтобы они работали на всех высотах дозвуковых и сверхзвуковых полетов. Результаты, полученные с помощью жидких кристаллов, совпадают с результатами, полученными традиционными методами на основе сублимирующихся покрытий и масляной пленки. Обратимость свойств жидких кристаллов и их быстрая реакция на изменение структуры пристенного течения, делает их применение более предпочтительным, чем традиционные методы.

В работах [32, 33] возможности ЖК активно использовались для исследования коммерческих составов ХЖК и их применения для диагностики касательного напряжения на моделях различной геометрии (круговая, эллиптическая, прямоугольная каверны и др.). В частности, получены представляющие практический интерес калибровочные зависимости $\lambda(\tau)$ и цветового тона $H(\tau)$ для 7 составов фирмы *Hallcrest Inc*. Эти составы с вязкостью от 250 до 40000 сП исследовались в широком диапазоне касательных напряжений τ до 250 Па, а также углов падения и наблюдения. Кроме этого, результаты испытаний одного из составов ЖК BCN/65 (смесь ХНЖК и ХЖК) на модели осесимметричного тела в АТ при до- и трансзвуковых числах Маха $M = 0,19 – 1,0$ показали высокую информативность метода.

В ИТПМ ХЖК, чувствительные к касательным напряжениям, были использованы для диагностики структуры сложного отрывного турбулентного течения в лабораторной АТ, представляющей собой узкий канал прямоугольного сечения с выступом [34]. В исследованиях использовались разработанные ХЖК составы на основе эфиров холестерина [35].

На рисунках 6 и 7 показано, что ХЖК визуализация наглядно отражает основные качественные особенности топологии обтекания трапециевидного в плане выступа и изменение уровня касательного напряжения τ вдоль выступа на линии A₁–A.

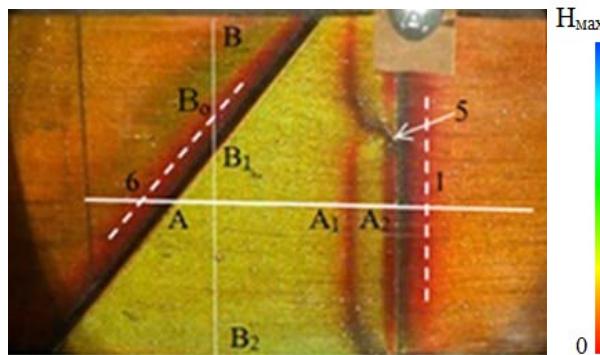


Рис. 6. Оптический отклик ХЖК на воздействие потока со скоростью $V_\infty = 84$ м/с [34]

Fig. 6. Optical response of the CLC to the impact of a flow with the speed of $V_\infty = 84$ m/s [34]

Выполненные эксперименты продемонстрировали высокую чувствительность поверхностного трения к перестройке структуры пристенного течения и возможность отображения этих изменений с помощью жидкокристаллических покрытий.

Применимость разработанных ЖК-композиций для детектирования ламинарно-турбулентного перехода пограничного слоя на

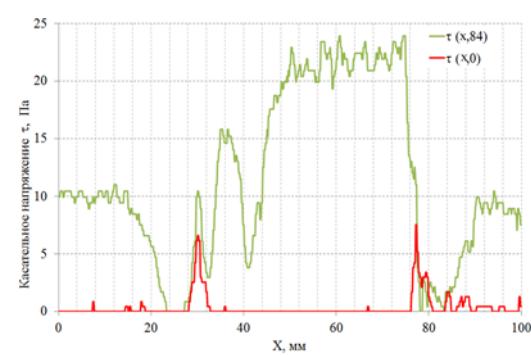


Рис. 7. Изменение уровня касательного напряжения вдоль выступа на линии А₁–А [34]

Fig. 7. Change in the level of shear stress along the ledge on the line A₁–A [34]

моделях при дозвуковых и трансзвуковых скоростях исследовалась также в промышленных аэродинамических трубах Т-128 и Т-103 (ЦАГИ) [37–39]. Некоторые примеры визуализации средних уровней τ в ходе исследования влияния скорости потока (10–80 м/с) и угла атаки $\alpha = 0 \div 6^\circ$ на структуру течения в АДТ-103 показаны на рис. 8.

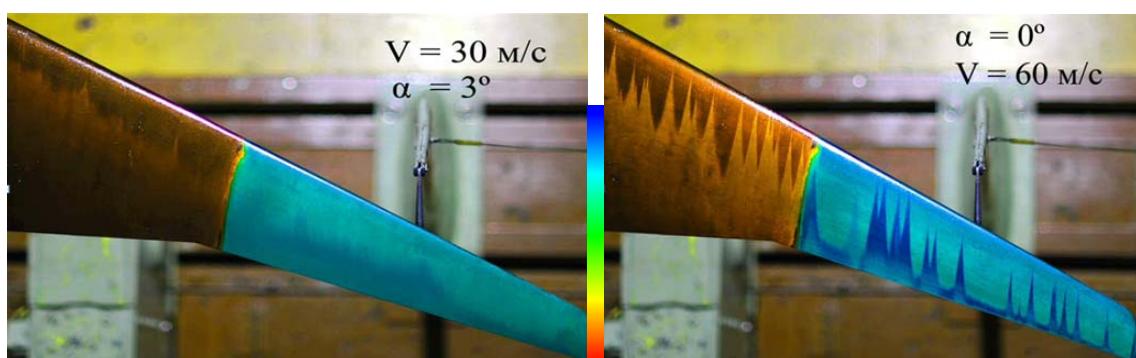


Рис. 8. Визуализация ламинарно-турбулентного перехода на крыле в АТ128-ЦАГИ с помощью ХЖК разных составов при различных скоростях и углах атаки [38]

Fig. 8. Visualization of the transition on the wing in AT128-TsAGI using CLC of different compositions at different speeds and angles of attack [38]

Метод ХЖК-покрытий нашел применение также при исследовании структуры течения на поверхности модели при наличии на ней различного рода каверн [40–44]. Даже самые простые полости, могут вызывать возмущение потока, в результате чего структура течения резко изменяется.

Разработанные в ИТПМ ХЖК-композиции показали широкий рабочий диапазон, пример визуализации распределения поверхностного трения τ на пластине с мелкой прямоугольной кавернной при числе Маха $M = 0,65$ и $1,98$ представлен на рис. 9, *а* и *б*.

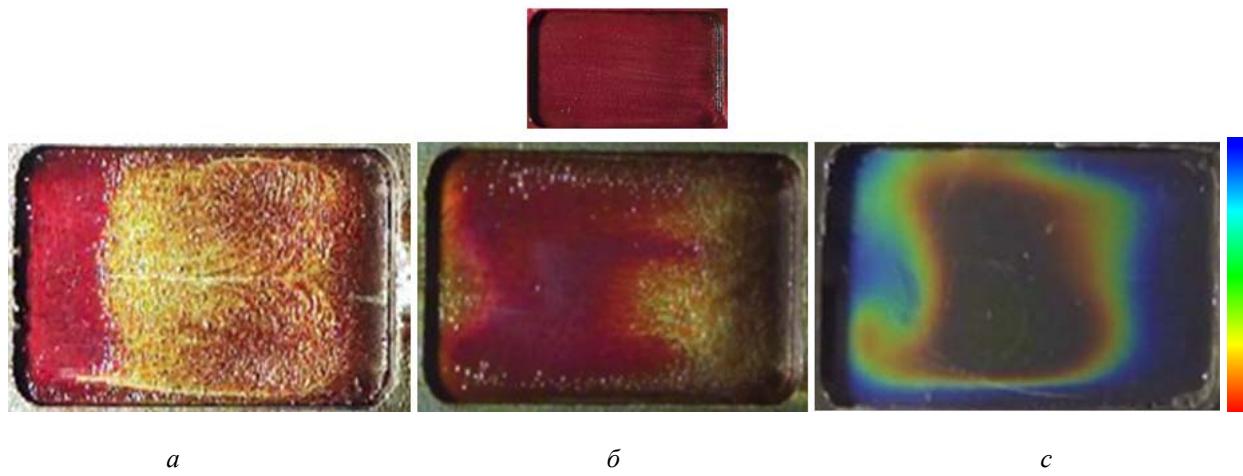


Рис. 9. Визуализации течения в мелкой прямоугольной каверне. Без потока – верхний ряд.
 $M = 0,65$ (а), $M = 1,98$ (б, с). Поле температур (с)

Fig. 9. Visualization of the flow in a shallow rectangular cavity. No flow (top row).
 $M = 0,65$ (a), $M = 1,98$ (b, c). Temperature field (c)

Измерение и визуализация векторов касательного напряжения

Методика измерения и визуализации векторов касательного напряжения, разработанная Reda D.C [45], в дальнейшем развивалась и применялась в аэродинамических экспериментах [46–53].

Сущность метода заключается в том, что для получения величины $|\tau|$ и направления φ_τ вектора касательного напряжения $\tau(x,y)$ используется двухпараметрическая тарировка оптического отклика ЖК. В качестве количественной меры оптического отклика при панорамных измерениях используется хроматическая координата цветовой тон H . Для получения зависимости цветового тона от величины и направления вектора касательного напряжения $H(|\tau|, \varphi)$ ЖК-покрытие освещается белым светом нормально к поверхности. Регистрация $H(x,y)$ на камеру осуществляется под углом $\alpha_c \approx 30^\circ$ к поверхности с нескольких ракурсов, охватывающих по возможности все измеряемые направления вектора τ . Ранее было установлено, что экспериментальную угловую зависимость $H(\varphi, \tau = \text{const})$ можно представить Гауссовой кривой [33]. Угол φ_τ , при котором фиксируется максимальное значение цветового тона $H = H_{\max}(x,y,\varphi)$ соответствует искомому локальному направлению $\varphi_\tau(x,y)$ вектора

касательного напряжения $\tau(x,y)$. Теоретически для получения аппроксимации кривой Гаусса требуется как минимум четыре изображения, но на практике это число обычно увеличивается в соответствии с оптическим доступом к исследуемой поверхности. Значение величины $|\tau|$ определяют с помощью калибровки, полученной с использованием традиционных методов точечных измерений [54]. Предложенный метод был протестирован авторами при малых уровнях касательных напряжений в экспериментах с тангенциальной и наклонной струями [46]. На основании полученных результатов было показано, что метод ЖК, чувствительных к сдвигу, может использоваться для измерений распределения векторов касательного напряжения сдвига на плоских поверхностях с точностью, эквивалентной обычным методам точечных измерений. Метод в дальнейшем успешно использовался в аэродинамических исследованиях.

В [55–57] авторы описывают несколько нестандартных решений, как в постановке эксперимента, так и в обработке данных. Ими используются стробоскопическое освещение и стереоскопическая регистрация на две близко симонтированные камеры. Конструкции позволяет изменять угол между освещением и камерами и осуществлять диагностику на криволинейных поверхностях, в частности, вблизи передней

кромки прямого крыла. На такой модели профиля *NACA0018* предложенный подход был протестирован для случая нестационарного течения (уменьшения скорости от $V_\infty = 15$ м/с) с помощью смеси ХЖК и ХНЖК, нечувствительной к температуре [57]. Используемые ЖК позволили получить распределение τ и детектировать топологию течения. В качестве второго метода определения τ использовался метод *PIV* (*Particle Image Velocimetry*). Сравнение показало хорошее совпадение.

В [58–62] этот метод был протестирован в аэродинамических трубах с использованием стандартного оборудования. В качестве источника света применялась обычная галогеновая лампа, а для регистрации изображений под разными углами использовались шесть синхронизированных фотокамер. Это позволило измерить распределение вектора касательного напряжения на поверхности в нестационарных условиях. Работоспособность метода ЖК была продемонстрирована в условиях высокоскоростных струйных течений. Показана возможность измерения векторного поля касательных напряжений в сверхзвуковом потоке с ударными волнами. Структура сверхзвуковой струи визуализируется с помощью ЖК-покрытия. Результаты хорошо согласуются с результатами, полученными при использовании методов «масляной капли» и *PIV*. Предварительный анализ показывает, что точность предлагаемого метода в определении направления сдвига составляет $1,5^\circ$, а величины касательного напряжения $0,5\%$.

Общие принципы применения жидкокристаллов в установках с движущейся средой

Подготовка модели. Чтобы увеличить контраст в экспериментах с применением ЖК-покрытий необходимо использовать модели черного цвета. Выбор черной краски определяется ее инертностью к поверхности модели и к слою ХЖК. Для привязки по координате и масштабирования на исследуемую модель необходимо нанести сетку или вспомогательные метки.

Нанесение ЖК-покрытия. При использовании чистых жидкокристаллов 10 %-ный раствор выбранной смеси ХЖК в органическом растворителе методом напыления наносится на

модель. После испарения растворителя на поверхности модели образуется слой ХЖК с конфокальной текстурой, которую можно трансформировать в планарную с помощью мягкой кисти.

Выбор жидкокристаллического материала связан с конкретной задачей эксперимента. Для измерения касательных напряжений применяются чистые жидкокристаллы или их смеси, малочувствительные к температуре в определенном диапазоне температур, соответствующем условиям конкретного эксперимента. В рассмотренных статьях применялись коммерческие смеси разных фирм, состав которых неизвестен. Известно, что применяются два типа холестерических жидкокристаллов: хиральные и производные холестерина. Провести сравнительный анализ их составов не представляется возможным. Поэтому остановимся только на общих принципах выбора ЖК-веществ применительно к измерению касательных напряжений.

Две основные характеристики должны учитываться при выборе ХЖК: температурная область существования селективного отражения ХЖК и вязкость. Температурная область существования селективного отражения ХЖК во всем видимом спектральном диапазоне света должна соответствовать температурному режиму планируемого эксперимента. В этом диапазоне температур цвет ХЖК не должен зависеть от температуры.

Практически невозможно найти индивидуальное ЖК-соединение, которое бы раскрашивалось всеми цветами при изменении температуры в широком диапазоне температур. Но полная смешиваемость жидкокристаллов в холестерическом состоянии позволяет при смешивании различных соединений получать смесь, характеризующуюся новой спиральной структурой со своим шагом, знаком кручения и своей температурной областью селективного отражения света. Поэтому используемые жидкокристаллические составы представляют собой смеси разных веществ. В [28, 33, 63] приведен большой список возможных поставщиков ЖК и различных составов. Например, смешивая разные хиральные нематики, *TM74A* и *TM75A* – (смеси фенилбензоатов) фирмы *BDH*, можно варьировать температурную область селективного отражения.

Подобные широкотемпературные ХЖК-смеси можно получать и из эфиров холестерина и ряда кислот (рис. 10). Особенность этих составов в том, что эфиры холестерина легко доступны и известны их характеристики. Смешивая эфиры холестерина и различных кислот, легко регулировать как абсолютную температурную область селективного отражения смеси, так и ее ширину [64]. Вязкостные характеристики некоторых ХЖК-смесей

(*BCN/192* и *BN/R50C*) фирмы *LCR Hallcrest (U.K.)* приводятся в табл. 2 [59]. Видно, что вязкость хиральных нематиков заметно ниже, чем вязкость холестериков. Этот фактор определяет применимость того или иного типа ЖК при различных скоростях потока. Вязкость определяет текучесть ЖК под влиянием потока. Когда используются ЖК для количественных измерений, они не должны течь.

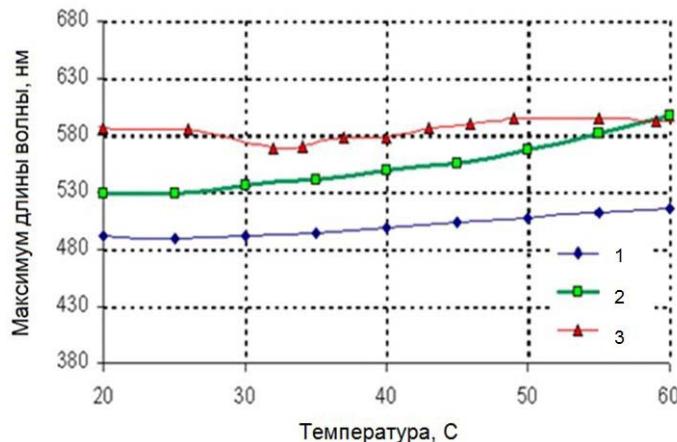


Рис. 10. Зависимость максимальной длины волны селективного отражения от температуры и концентрации холестерилхлорида в смеси холестерилонаоата и холестерилолеата (40:60):
 1 – 20; 2 – 25; 3 – 30 % холестерилхлорида [64]

Fig. 10. Maximum wavelength of selective reflection vs temperature and concentration of cholesterylchloride in the mixture of cholesterylnonanoate with cholesteryl oleate (40:60): 1 – 20; 2 – 25; 3 – 30 % cholesteryl chloride [64]

Таблица 2. Характеристики ХЖК-составов

Table 2. Characteristics of ChLC mixtures

	Тип	Относительная вязкость при 30 °C	Рабочая скорость потока м/с
BN/R50	Хиральный нематик	1	< 30
BCN/192	Смесь	4	30–70
CN/R3	Холестерик	15	75–200

Системы освещения и регистрации. Принципиальная схема эксперимента определяется типом и размерами аэродинамической установки, открытой или закрытой рабочей частью и др. Она состоит из системы освещения, регистрации, ПК для цифровой обработки данных. Источник освещения следует подбирать из условия получения равнознаменательного белого света. На практике

используются разнообразные источники: галогенные, ксеноновые или другие лампы, спектр которых может отличаться от белого. Поэтому калибровку ЖК по касательному напряжению лучше проводить в условиях аэродинамического эксперимента или близким к ним (геометрия, освещение и т.д.).

Чтобы повысить точность результатов измерения, желательно обеспечить равномерную освещенность поверхности и исключить постороннее освещение. В зависимости от задачи и условий эксперимента, число необходимых для регистрации камер может увеличиваться, что требует автоматизации анализа и отображения результатов. Как правило, для измерения цвета используется хроматическая координата цветовой тон H , а насыщенность S и интенсивность, полученные пересчетом из координат RGB, фиксируемых камерой используются как вспомогательные [65–69].

Выводы

Анализ литературы, посвященной изучению механо-оптических свойств нематических и холестерических ЖК и их практическому использованию для исследования структуры пристенных течений в аэродинамическом эксперименте, показал, что наибольший практический интерес представляют механо-оптические эффекты в холестерических ЖК. Это связано с яркими цветными изображениями панорамного распределения поверхностного трения, которое отражает изменение структуры потока. Этот тип ЖК, благодаря современным методам цифровой обработки изображений, позволяет фиксировать и направление векторов поверхностного трения. Это продемонстрировано в исследованиях пристенных течений при дозвуковых, сверхзвуковых скоростях потока, а также в летных испытаниях.

Благодарность: Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 121030500158-0).

Acknowledgments: The work was carried out on the topic of the state task (state registration number 121030500158-0).

Список источников / References

- Корнилов В. И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами // *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т.12, № 2. С. 183–208. [Kornilov V.I. Problems of reducing turbulent friction by active and passive methods. *Thermophysics and aeromechanics*, 2005, **12** (2), 183–208. (in Russ.)].
- Харитонов А. М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч. 2: Методы и средства аэрофизических измерений. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 456 с. [Kharitonov A.M. Technique and methods of aerophysical experiment. Part 2: Methods and means of aerophysical measurements. Novosibirsk: Publishing house of NSTU, 2007. 456 p. (in Russ.)].
- Fonov S., Goss L., Grant J., Crafton J., Fonov V., Patterson W. Surface pressure and shear force fields measurements using elastic polymeric film. *11th International Symposium on Flow Visualization*. Notre Dame, Indiana, USA. 2004.
- Liu T. Global skin friction measurements and interpretation. *Progress in Aerospace Science*, 2019, **111**, 100584. DOI:10.1016/j.paerosci.2019.100584.
- Мошаров В. Е., Радченко В. Н. Новый метод визуализации течений на поверхности аэродинамических моделей. *Датчики и системы*. 2010. № 5. С. 48–53. [Mosharov V.E., Radchenko V.N. A new method for flow visualization on the surface of aerodynamic models. *Sensors and systems*, 2010, **5**, 48–53. (in Russ.)].
- Luntel J., Schulein E. Wall shear stress measurements by white-light oil-film interferometry. *Exp. Fluids*, 2020, **61**, 84. DOI: 10.1007/s00348-020-2917-9.
- Klein E.J. Liquid crystals in aerodynamic testing. *Astronautics and Aeronautics*, 1968, **6**, 70–73.
- Klein E.J., Margozzi A.P. Exploratory investigation of the measurement of skin friction by means of liquid crystals. *Israel J. of Technol.*, 1969, **7** (1–2), 173–180.
- Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1982. 400 с. [De Zhen P. Physics of liquid crystals. M. : Mir, 1982. 400 p. (in Russ.)].
- Беляков В. А., Сонин А. С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М.: Наука, 1982. 360 с. [Belyakov V.A., Sonin A.S. Optics of cholesteric liquid crystals. Moscow : Nauka, 1982. 360 p.(in Russ.)].
- Блинов Л. М. Жидкие кристаллы: структура и свойства. М. : Книжный дом «Либреком», 2013. 480 с. [Blinov L.M. Structure and properties of liquid crystals. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2011, 379 p. DOI: 10.1007/978-90-481-8829-1].
- Pollmann P., Stegemeyer H. Pressure dependence of the helical structure of cholesteric mesophases. *Chem. Phys. Lett.*, 1973, **20** (1), 87–89.
- Жаркова Г. М., Преображенский Н. Г., Трашкеев С. И. Динамика поведения нематических пленок в гидродинамических потоках // *ПМТФ*. 1992. № 6. С. 64–67. [Zharkova G.M., Preobrazhensky N.G., Trashkeev S.I. Dynamics of behavior of nematic films in hydrodynamic flows. *PMTF*, 1992, 6, 64–67. (in Russ.)].

14. Жаркова Г. М., Трашкеев С. И. Сдвиговое течение нематического жидкого кристалла в газодинамическом потоке и его оптическая регистрация // *ПМТФ*. 1994. Т. 34, № 5. С. 60–68. [Zharkova G.M., Trashkeev S.I. Shear flow of a nematic liquid crystal in a gas-dynamic flow and its optical registration. *PMTF*, 1994; **34** (5), 60–68. (in Russ.)].
15. Коротаев В. М., Трашкеев С. И., Жаркова Г. М. Оптический отклик слоя нематического жидкого кристалла на воздействие потока воздуха // *ПМТФ*. 1998. Т. 39, № 4. С. 569–575. [Korotaev V.M., Trashkeev S.I., Zharkova G.M. Optical response of a layer of a nematic liquid crystal to the action of an air flow. *PMTF*, 1998, **39** (4), 569–575. (in Russ.)].
16. Buttsworth D.R., Elston S.J., Jones T.V. Direct full surface skin friction measurement using nematic liquid crystal techniques. *J. Turbomach.*, 1998, **120** (4), 847–853. DOI: 10.1115/1.2841798.
17. Buttsworth D.R., Elston S.J., Jones T.V. Directional sensitivity of skin friction measurements using nematic liquid crystals. *Meas. Sci. Tech.*, 1998, **9** (11), 1856–1865. DOI: 10.1088/0957-0233/9/11/011.
18. Buttsworth D.R., Elston S.J., Jones T.V. Skin friction measurements on reflective surfaces using nematic liquid crystals. *Experiment In Fluids*, 2000, **28** (1), 64–73.
19. Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Петров А. П. Влияние механического сдвига на отражение линейно-поляризованного света закрученным нематиком // *Жидк. крист. и их практ. использ.* 2014. Т. 14, №1. С. 39–44. [Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Petrov A.P. Effect of mechanical shift on the reflection of linearly polarized light by a chiral nematic. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2014, **14** (1), 39–44. (in Russ.)].
20. Bonnett P., Jones T.V., McDonnell D.G. Shear-stress measurement in aerodynamic testing using cholesteric liquid crystals. *Liquid Crystals*, 1989, **6** (3), 271–280. DOI: 10.1080/02678298908029078.
21. Mee D.G., Walton T.W., Harrison S.B., Jones T.V. A comparison of liquid crystal techniques for transition detection. *AIAA 29th Aerospace sciences meeting*. Nevada, January 7–10, 1991. Paper AIAA-91-0062, 9 p.
22. Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Петров А. П. Экспериментальное исследование текстурного перехода в жидких кристаллах под воздействием касательного напряжения поверхностного трения // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 4. С. 315–323. [Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Petrov A.P. Experimental study of the texture transition in liquid crystals under the influence of shear stress of skin friction. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, **20** (4), 315–323. (in Russ.)].
23. Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Khachaturyan V.M. Visualization of flow structure in a channel with corrugated walls by liquid crystals. *J. of Visualization*, 2002, **5** (4), 311. DOI: 10.1007/BF03182340.
24. Giliberty D.F., Dixon G.D. Shear effects on cholesteric liquid crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1973, **20** (1), 27–36. DOI: 10.1080/15421407308083296.
25. Marsh D.G., Pochan J.M. Mechanism of shear – induced structural changes in liquid crystal cholesteric – nematic mixtures. *Chem. Phys.*, 1973, **58** (7), 2835–2839.
26. Reda D.C., Muratore J.J. Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings. *AIAA Journal*, 1994, **32** (8), 1576–1582. DOI: 10.2514/3.12146.
27. Reda D.C., Wilder M.C., Crowder J.P. Simultaneous, full-surface visualizations of transition and separation using liquid crystal coating. *AIAA Journal*, 1997, **35** (4), 615–616. DOI: 10.2514/2.176.
28. Holmes B.J., Gall P. D., Croom C.C., Manuel G. S., Kelliher W.C. A new method for laminar boundary layer transition visualization in flight: color changes in liquid crystal coatings. *NASA Technical Memorandum*, 1986, Article 87666, 10 p.
29. Gall P.D., Holmes B.J. Liquid crystals for high-altitude in-flight boundary layer flow visualization. *AIAA General Aviation Technology Conference*. Anaheim, California, 1986, *AIAA-86-2592*. DOI: 10.2514/6.1986-2592.
30. Bruce J., Holmes, Clifford J. Obara. Advances in flow visualization using liquid-crystal coating. *SAE Technical Paper Series 871017*, 1987. 10 p. DOI: 10.4271/871017. ISSN 0148-7191.
31. Disimile P.J., Toy N. Full field surface shear stress measurements using liquid crystals. Surrey University Guildford (UK) Department of Civil Engineering, University of Surrey: Surrey, UK, 1995. 56 p.
32. Savory E., Hoang Q.H., Toy N., Sykes D.M., Mohan S.R. Calibration and application of liquid crystals for transition detection and skin friction measurements in high speed flows. *3rd Int. Symp. on Engineering Turbulence Modelling and Measurements*. Heraklion, Crete, Greece, 1996, 401–410.
33. Savory E., Sykes D.M., Toy N. Visualization of transition on an axisymmetric body using shear sensitive liquid crystals. *Opt. Diagn. Eng.* 2000, **1**, 16–25.
34. Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Petrov A.P., Pod'yachev S.P. Panoramic diagnostics of shear stresses on the channel wall with a step using the liquid crystals. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, **23**, 831–838.
35. Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Петров А. П. Исследование влияния механического сдвига на колориметрические характеристики холестериков // *Жидк. крист. и их практ. использ.* 2012. Вып. 4. С. 53–61. [Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Petrov A.P. Study of the effect of mechanical shear on the colorimetric characteristics of cholesterics. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, (4), 53–61. (in Russ.)].

36. Ruiyu L.I., Gao L., Zhang S., Li Y., Gao T. Application of shear-sensitive liquid crystal coating to visualization of transition and reattachment in compressor cascade. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, **31** (11), 2073–2079. DOI: 10.1016/j.cja.2018.06.003.
37. Zharkova G.M., Kovrzhina 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. of the 8th Pacific Symp. on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-8)*. Moscow, Russia, 2011, 113, 1–5.
38. Kovrzhina V.N., Shapoval E.S., Zharkova G.M. Problems and achievements in panoramic shear stress diagnostics by liquid crystals. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. St. Petersburg, Russia, 2014, (4), 1027–1033.
39. Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Петров А. П., Мошаров В. Е., Радченко В. Н., Шаповал Е. С. О применении жидких кристаллов для визуализации структуры пристенного течения в экспериментальной аэродинамике // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения: Сборник статей. М. : «Наука» РАН, 2016. С. 113–125. [Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Petrov A.P., Mosharov V.E., Radchenko V.N., Shapoval E.S. On the use of liquid crystals for visualization of the near-wall flow structure in experimental aerodynamics. *Results of fundamental research in applied problems of aircraft engineering: Digest of articles*. M. : Nauka RAN, 2016, 113–125 (in Russ.)].
40. Savory E., Toy N., Gaudet L. Effect of lip configuration on the drag of a circular cavity. *Emerging Techniques in Drag Reduction*. Mechanical Engineering Publications Ltd, 1996, 317–335.
41. Savory E., Toy N., Disimile P.J., DiMicco R.G. The drag of three-dimensional rectangular cavities. *Further Developments in Turbulence Management* / ed. K.K. Prasad. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993, 325–346.
42. Toy N., Disimile P.J., Savory E. Liquid crystal visualization of the vortex flow field within a rectangular yawed cavity at Mach 2. *Flow Visualization and Image Processing*, 2000, **7** (3), 269–279.
43. Czech M., Savory E., Toy N., Mavrides T. Flow regimes associated with yawed rectangular cavities. *Aeronautical Journal*, 2001, **105**, 125–134.
44. Hering T., Savory E. Flow regimes and drag characteristics of yawed elliptical cavities with varying depth. *ASME Fluids Engineering*, 2007, **129**, 1577–1583.
45. Patent US No. 5.438.879. Method for measuring surface shear stress magnitude and direction using liquid crystal coating / D.C. Reda; 1995. Right holders: Reda D.C.
46. Reda D.C., Wilder M.C., Farina D.J., Zilliac G. New methodology for the measurement of surface shear stress vector distributions. *AIAA Journal*, 1997, **35** (4), 608–614. DOI: 10.2514/2.165.
47. Reda D.C., Wilder M.C. Visualization and measurement of surface shear stress vector distributions using liquid crystal coatings, AGARD CP-601. *Advanced Aerodynamic Measurement Technology Conference*. Seattle, WA, 1997, 26-1–26-9 (9 p.).
48. Wilder M.C., Reda D.C. Uncertainty analysis of the liquid crystal coating shear vector measurement technique. *20th Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference*. Albuquerque, NM, 1998. AIAA 98-2717.
49. Reda D.C., Wilder M.C. Quantitative and qualitative aspects of the shear-sensitive liquid crystal coating method. *Proceedings 21st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences* Melbourne, Australia, 1998. ICAS 98-3.3.2.
50. Reda D.C., Wilder M.C., Mehta R., Zilliac G. Measurement of continuous pressure and shear distributions using coating and imaging techniques. *AIAA Journal*, 1998, **36**, 895–899.
51. Reda D.C., Wilder M.C. The shear-sensitive liquid crystal coating method, sensors. *Appl. Sensing Techn.*, 1998, **15** (10), 38–48.
52. Mehta R.D., Bell J.H., Reda D.C., Wilder M.C., Zilliac G.G., Driver D.M. Pressure and shear sensitive coatings. *Flow Visualization: Techniques and Examples*. Imperial College Press, London, 2000, 169–203.
53. Reda D.C., Wilder M.C. Shear-sensitive liquid crystal coating method applied through transparent test surfaces. *AIAA Journal*, 2001, **39** (1), 195–197. DOI: 10.2514/3.14718.
54. Tanner L.H., Blows L.G. A study of the motion of oil film on surface in air flow with application to the measurement of skin friction. *J. Phys. E.*, 1976, **9**, 194–202. DOI: 10.1088/0022-3735/9/3/015.
55. Fujisawa N., Funatani S., Kosaka S. Measurement of shear-stress distribution by liquid-crystal coating. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**, 1655–1661.
56. Nakano T., Fujisawa N. Wind tunnel testing of shear-stress measurement over a surface by liquid-crystal coating. *J. Vis. Jpn.*, 2006, **9**, 135–136.
57. Fujisawa N., Oguma Y., Nakano T. Measurements of wall-shear-stress distribution on an NACA0018 airfoil by liquid-crystal coating and near-wall particle image velocimetry (PIV). *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**, 1–10.
58. Zhao J.S., Scholtz P., Gu L.X. Wind tunnel studies of surface shear stress vector distribution measurement using shear sensitive liquid crystal coatings. *Sci. China Technol.*, 2011, **54**, 2730–2734.

59. Zhao J.S., Scholtz P., Gu L.X. Color change characteristics of two shear-sensitive liquid crystal mixtures (BCN/192, BN/R50C) and their application in surface shear stress measurements. *Chinese Sci. Bull.* 2011, **56** (27), 2897–2905. DOI:10.1007/s11434-011-4673-y.
60. Zhao J.S., Scholtz P., Gu L.X. Measurement of surface shear stress vector distribution using shear-sensitive liquid crystal coatings. *Acta Mech. Sin.*, 2012, **28**, 1261–1270.
61. Zhao J. Measurement of wall shear stress in high speed air flow using shear-sensitive liquid crystal coating. *Sensors*, 2018, **18** (5), 1605. DOI: 10.3390/s18051605.
62. Zhao J. Investigation on wall shear stress measurement in supersonic flows with shock waves using shear-sensitive liquid crystal coating. *Aerospace Science and Technology*, 2019, **85**, 453–463. DOI:10.1016/j.ast.2018.12.034.
63. Томилин М. Г., Пестов С. М. Свойства жидкокристаллических материалов. СПб. : Политехника, 2005. 296 с. [Tomilin M.G., Pestov S.M. Properties of liquid crystal materials. SPb.: Polytechnic, 2005, 219 p. (in Russ.)].
64. Патент № 1023811. Композиция для термоочувствительного материала / Фокин Е. П., Жаркова Г. М., Хачатуриян В. М.; 1980. [Russian patent No. 1023811. Composition for a heat-sensitive material / Fokin E.P., Zharkova G.M., Khachaturyan V.M.; publ. 1980. (in Russ.)].
65. Reda D.C., Wilder M.C., Mehta R.D., Zilliac G. Measurement of continuous pressure and shear distributions using coa-ting and imaging techniques. *AIAA Journal*, 1998, **36** (6), 895–899. DOI: 10.2514/2.484.
66. Camci C., Kimk K., Hippenssteele S.A. A new hue capturing technique for the quantitative interpretation of liquid crystal images used in convective heat transfer studies. *Turbomachinery*, 1992, **114** (10), 765–775.
67. Wang Z., Ireland P.T., Jones T.F., Davenport R. Color image processing system for transient liquid crystal heat transfer experiments. *Am. Soc. Mech. Eng.* (ASME), 1994, 1–11. ISSN 0402-1215.
68. Zharkova G.M., Kovrzhina V.N., Podyachev S.P. Analysis and interpretation of video registration data from experiments with liquid crystals coatings. *Scientific Visualization*, 2017, **9** (3), 96–102.
69. Zhao J., Zhang J., Wang B. A learning-based approach for solving shear stress vector distribution from shear-sensitive liquid crystal coating images. *Chinese J. of Aeronautics*, 2022, **35** (4), 55–65. DOI: 10.1016/j.cja.2021.04.019.

Вклад авторов:

¹Жаркова Г. М. – разработка концепции статьи, проведение исследования, написание текста статьи, подготовка иллюстраций, редактирование текста статьи.

²Коврижина В. Н. – проведение исследования, написание текста статьи, подготовка иллюстраций, редактирование текста статьи.

Contribution of the authors:

¹Zharkova G. M. – development of the paper concept, conducting research, writing the text of the article, preparing illustrations, editing the text of the article.

²Kovrzhina V. N. – conducting research, writing the text of the article, preparing illustrations, editing the text of the article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

¹Orcid – 0000-0002-0173-2962

²Orcid – 0000-0002-0948-4481

Поступила 4.07.2022, одобрена 28.07.2022, принята 1.08.2022
Received 4.07.2022, approved 28.07.2022, accepted 1.08.2022