

УДК 533.6.071.+532.783

Г. М. Жаркова

**ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ПАНОРАМНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ТРЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ**

**LIQUID CRYSTAL SENSORS FOR PANORAMIC DIAGNOSTICS
OF SHEAR STRESS AND TEMPERATURE FIELDS**

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1. E-mail: zharkova@itam.nsc.ru

В статье рассматриваются свойства панорамных жидкокристаллических сенсоров температуры и трения применительно к аэродинамическим экспериментам. Исследуются эффекты влияния температуры и трения на длину волны селективного отражения холестерических жидких кристаллов, приводятся примеры использования жидкокристаллических сенсоров для исследования структуры пристенных течений при дозвуковых и гиперзвуковых скоростях потока.

Ключевые слова: *холестерические жидкие кристаллы, касательное напряжение, температура, длина волны селективного отражения, аэродинамический эксперимент.*

The paper considers properties of the panoramic liquid crystal sensors of temperature and shear stress applicable to aerodynamic experiments. The effects of temperature and shear stress on the wavelength of the selective reflection of the light of cholesteric liquid crystals are examined. The examples of the use of liquid crystal sensors for investigation of the structure of the near-wall flows under subsonic and hypersonic flow velocity are presented.

Key words: *cholesteric liquid crystals, shear stress, temperature, selective reflection wavelength, aerodynamic experiment.*

Введение

Для панорамной визуализации полей температур и поверхностного трения в аэродинамическом эксперименте применяются методы, основанные на использовании жидкокристаллических (ЖК) покрытий, которые изменяют свои оптические свойства под влиянием внешних воздействий. Тонкий слой ЖК-покрытия на исследуемой поверхности не вносит возмущений в пограничный слой, а оптический отклик ЖК на различного рода деформацию позволяет использовать их для измерения этой деформации (температуры и механического сдвига). Эти два параметра чувствительны к изменению структуры пограничного слоя. Поэтому панорамное распределение температуры и трения вблизи обдуваемой поверхности позволяют визуализировать области перехода ламинарного течения в турбулентное, отрыва и присоединения потока, а также влияние ударных волн на пограничный слой.

Впервые ЖК были использованы в аэродинамическом эксперименте Клейном [1]. И позже многими исследователями применялись подобные покрытия для визуализации структуры пограничного слоя применительно к обтеканию моделей дозвуковым, сверхзвуковым и гиперзвуковым потоками [2 – 6]. Развитие методов цифровой обработки изображений, которые интенсивно развивались в последние годы, позволили широко применять ЖК-покрытия для количественных измерений температуры и тепловых потоков в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Со времени первого применения ЖК-покрытий в аэродинамических исследованиях достигнуты определенные успехи в области синтеза специальных ЖК-материалов применительно к аэродинамике, технике их использования в различных условиях аэродинамического потока.

Физика ЖК-сенсоров

При разработке и создании панорамных ЖК-сенсоров наибольшее распространение в нашей стране получили холестерические жидкие кристаллы (ХЖК), характеризующиеся спиральной надмолекулярной структурой (рис. 1). В основе их применения лежит их свойство селективного отражения света. Поскольку структурные элементы ЖК связаны достаточно слабыми дисперсионными силами, то небольшие внешние воздействия (температура, электрические и магнитные поля, механические напряжения) приводят к деформации ХЖК и соответственно к изменению длины волны селективного отражения света.

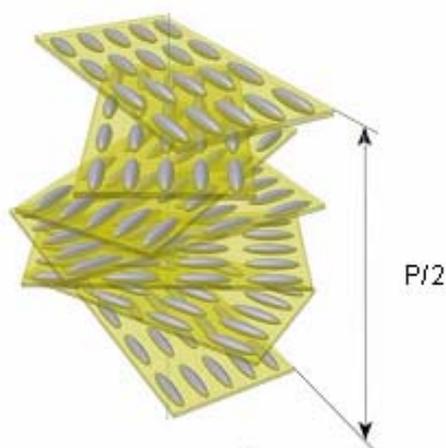


Рис. 1. Структура холестерических жидких кристаллов

Применение ЖК-сенсоров зависит от исходной ориентации молекул ЖК в тонком слое покрытия. Текстура ЖК определяет их оптические свойства. Холестерики между двух стеклянных подложек могут образовывать два типа текстур: фокально-коническую и Гранжановскую или планарную (рис. 2).

В фокально-конической текстуре холестерические спирали содержат отдельные образования, называемые конфокальными доменами. Директор в таких доменах ориентирован относительно соседнего домена беспорядочно. Падающий на такую текстуру свет рассеивается на беспорядочно ориентированных доменах.

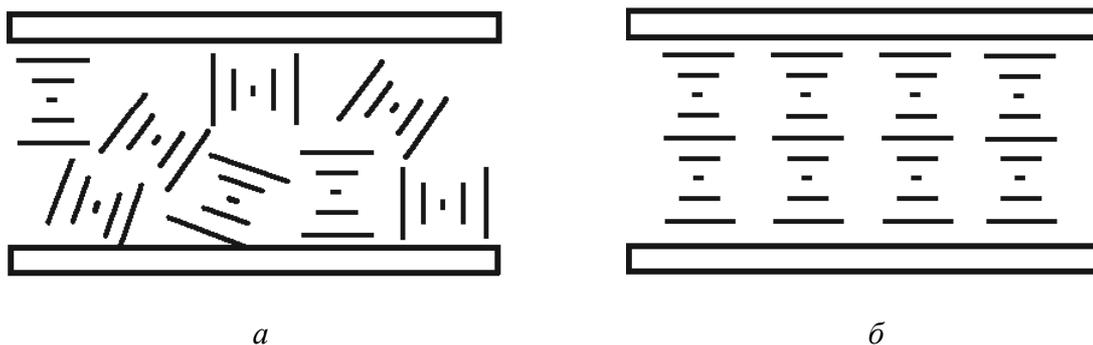


Рис. 2. Текстура ХЖК: а – фокально-коническая, б – планарная

В планарной текстуре ось холестерической спирали перпендикулярна поверхности стекол, а директор каждого слоя лежит в плоскости, параллельной стеклам. Когда неполяризованный белый свет проходит через тонкий слой ХЖК, он разлагается на две волны. В зависимости от структуры ХЖК (правая спираль или левая спираль) одна волна проходит без изменения, другая отражается. Вследствие этого слой ХЖК может выглядеть окрашенным. Эффект избирательного отражения возникает тогда, когда длина волны падающего света близка шагу спирали P . При изменении температуры изменяется шаг спирали, а, следовательно, длина волны селективного отражения.

Влияние механического сдвига на оптические свойства ХЖК также зависит от текстуры ХЖК [7 – 8]. В случае планарной текстуры холестерическая спираль реагирует на сдвиг как жесткий стержень, наклоняющийся при сдвиге (сдвиг перпендикулярен оси спирали) со слабым разрушением (рис. 3).

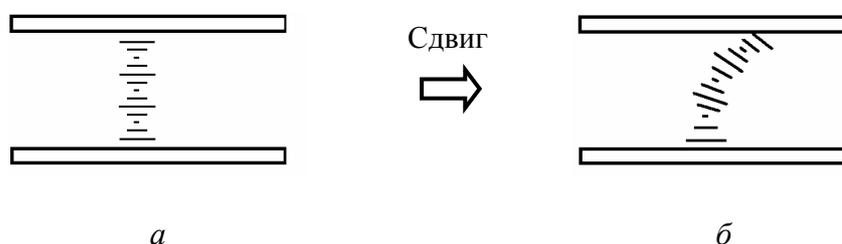


Рис. 3. Влияние механического сдвига на планарную текстуру ХЖК: а – совершенная планарная текстура; б – нарушенная планарная текстура

Если исходная текстура фокально-коническая, то при сдвиге она трансформируется в планарную.

Материалы

Создание ЖК-сенсоров имеет давнюю историю. Первый патент об использовании низкомолекулярных ЖК-индикаторов для регистрации температуры был зарегистрирован Фергасоном в 60 годы прошлого столетия [9]. Пионерами данного направления в Советском Союзе были сотрудники Ивановского университета во главе с И. Г. Чистяковым. Позднее эти работы были продолжены в ВНИИОФИ в отделе под руководством А. С. Сониной, в Институте Кристаллографии РАН с активным участием И. И. Гориной. Наиболее весомый вклад в развитие этого направления внесли сотруд-

ники Харьковского НПО «Монокристаллреактив», под руководством В. Г. Тищенко. Заслуга последних состоит не только в разработке методов синтеза и рецептуры термочувствительных ЖК-веществ, но и в организации их промышленного выпуска.

Начиная с 70-х годов, исследования по разработке термоиндикаторных сенсоров применительно к аэродинамическим исследованиям параллельно проводились в Институте теоретической и прикладной механики СОРАН (ИТПМ). Необходимость в самостоятельных исследованиях была связана с широким температурным диапазоном характеристик, реализуемых на установках Института (от -20 до 3000 °С) и рядом дополнительных требований, предъявляемых к материалу. К числу таких требований относятся: высокая адгезия индикаторов к исследуемой поверхности, гидрофобность, отсутствие анизотропии теплопроводности и др.

В качестве исследуемых материалов нами были выбраны низкомолекулярные эфиры холестерина с рядом насыщенных и ненасыщенных кислот. Выбор этих соединений был связан с доступностью исходных соединений и относительной простотой синтеза на их основе различных эфиров холестерина. Применительно к аэродинамическому эксперименту разработка ЖК-составов велась по двум направлениям: создание энантиохромных и монохромных составов.

При разработке энантиохромных составов практический интерес вызывают те холестериники, которые селективно отражают свет во всем видимом диапазоне спектра. В рассматриваемых нами рядах холестериников отражение света во всем видимом спектре наблюдается в узком температурном интервале вблизи перехода в смектическую фазу у трех эфиров холестерина: каприлат, пеларгонат, капринат. При подходе к температуре фазового перехода в смектическую фазу длина волны селективного отражения резко падает. Эти соединения преимущественно используются в качестве основных компонентов при разработке термоиндикаторных составов.

Для понижения температурной области селективного отражения названных соединений используются холестерил олеат, для повышения – эфиры холестерина с бензойной кислотой (рис. 4).

Для других холестериников, не имеющих смектической фазы, существует слабая зависимость селективного отражения от температуры. Поэтому основной принцип создания температурно-чувствительных смесей основан на смешивании двух и более компонентов, обладающих разными свойствами.

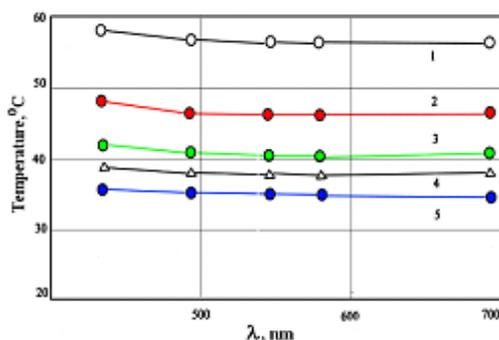


Рис. 4. Зависимость максимальной длины волны селективного отражения от температуры и состава для холестеринических смесей холестерилнонаноата и холестерилолеата:

1 – 20 %, 2 – 40 %, 3 – 60 %, 4 – 80 %, 5 – 100 % холестерилолеата

Чтобы поменять температурную чувствительность и область селективного отражения, в смесь дополнительно вводятся холестерики, длина волны отражения которых слабо зависит от температуры. Это соединения с короткими боковыми углеводородными заместителями.

При высоком содержании в смеси холестериков с короткими заместителями (формиат, ацетат, хлорид) образуются монохромные составы, у которых длина волны селективного отражения слабо зависит от температуры (рис. 5).

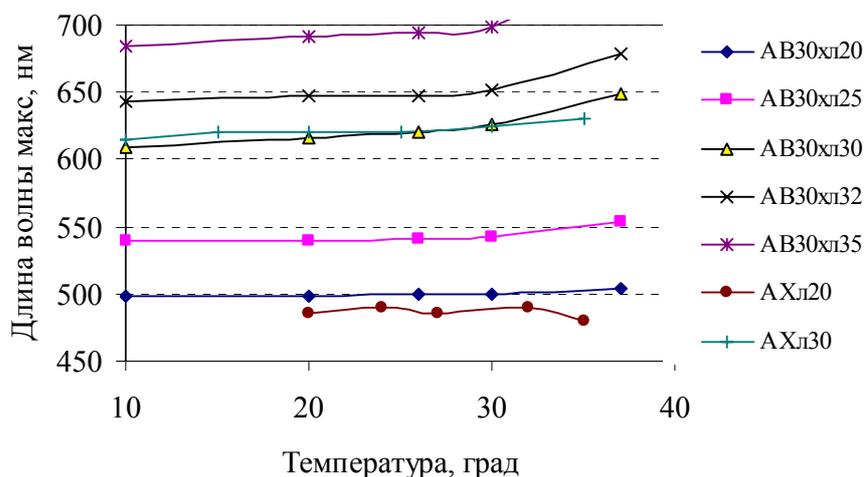


Рис. 5. Зависимость максимальной длины волны селективного отражения от температуры и состава для холестерических бинарных (нонаноат-А и хлорид) и тройных (нонаноат-А,олеат-В-хлорид) смесей

Старение и стабилизация

Большинство холестериков и их смесей являются неустойчивыми соединениями. Под влиянием УФ-излучения и кислорода со временем изменяются их физические и оптические свойства. Проблема стабилизации ХЖК возникла сразу же при их практическом использовании. Эта проблема решалась нами двумя способами: 1 – введением в состав ХЖК антиоксидантов и поглотителей УФ-излучения; 2 – капсулированием ХЖК в полимерную матрицу. Это обеспечивает сохранность цвето-температурных характеристик в течение нескольких лет. При капсулировании холестериков материал оболочек должен удовлетворять определенным требованиям: 1) не реагировать с холестериком, 2) быть прозрачным и эластичным при изменении температуры, 3) обладать физико-химическими свойствами (поверхностным натяжением), определяющими необходимую ориентацию молекул холестерика внутри полимерной капсулы. Коэффициент преломления материала должен быть близким к среднему коэффициенту преломления холестерика. При создании сенсоров для аэродинамических экспериментов дополнительным требованием является гидрофобность. Исходя из перечисленных требований, нами в качестве материала для полимерной матрицы были выбраны производные поливинилового спирта: поливинилацетат и поливинилбутираль. При капсулировании использовался процесс фазового разделения полимера и ХЖК в органических растворителях [9]. Этот способ привлекателен тем, что гомогенный раствор ХЖК и полимера может поливаться или наносится методом напыления на любую поверхность. Когда растворитель испарится, смесь распадается на 2 фазы и после окончательного высуши-

вания образуется полимерная пленка с равномерно распределенными по ее толщине включениями холестерика правильной почти сферической формы (рис. 6).

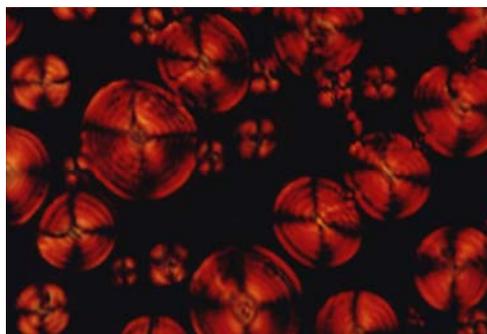


Рис. 6. Структура полимерно-жидкокристаллической дисперсии в поляризационном микроскопе

Введение холестериков в полимерную матрицу приводит к снижению интенсивности селективного отражения и небольшому сдвигу длины волны (рис. 7). Ухудшение характеристик оптического отклика композитного материала связано с многократным отражением света от границ холестерик – полимер.

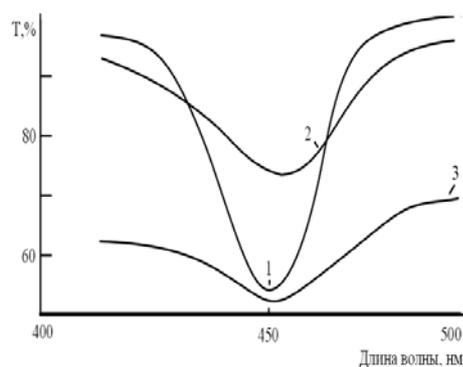


Рис. 7. Спектры селективного пропускания света планарным слоем свободных ХЖК (1); текстурой ХЖК в пленке (2); слоем капсул (3)

Одновременно с этим несколько уменьшается угловая зависимость длины волны отражения и увеличивается время оптического отклика на внешнее воздействие. Все разработанные термоиндикаторные составы проявляют практически те же цветотемпературные характеристики и в полимерной пленке. Ниже приведены характеристики термоиндикаторных пленок, разработанных в ИТПМ СОРАН.

Основные характеристики пленки:

толщина пленки, мкм	10 – 20
область температур, °С	–5 +150
пороговая чувствительность, Вт/см ²	5×10^{-4}
пространственное разрешение, линии/мм	5 – 7
постоянная времени, s	0,04 – 0,3
количество циклов нагрев, более	5000

Применение панорамных ЖК-сенсоров температуры

В механике жидкости и газа панорамная визуализация течений с использованием оптических методов занимает особое положение в диагностике течений. Большого искусства требует визуализация структуры течения в пограничном слое из-за ее высокой чувствительности к малым возмущениям потока. Так, любое возмущение потока сопровождается изменением температуры в пограничном слое. Поэтому визуализация распределения температуры вблизи обдуваемой поверхности и ее измерение позволяют идентифицировать такие структурные особенности течения как переход ламинарного течения в турбулентное, отрыв и присоединение потока, влияние ударных волн на пограничный слой и т. д. Одним из методов панорамной визуализации и измерения температур на поверхности аэродинамических моделей является ЖК-термография. Этот метод позволяет определить распределение температуры и тепловых потоков по поверхности сложной модели за один эксперимент.

В ИТПМ СОРАН накоплен большой экспериментальный материал по применению ЖК-покрытий для визуализации и измерения панорамного распределения температуры в аэродинамическом эксперименте. Разработанные термоиндикаторные покрытия были многократно использованы в условиях до-, сверх- и гиперзвукового потоков.

В аэродинамических экспериментах ЖК-покрытие, нанесенное на поверхность модели, подвержено одновременному воздействию температуры и поверхностного трения. Чтобы разделить вклад этих двух факторов в величину шага холестерической спирали при измерении температуры, необходимо защитить ЖК от влияния механического сдвига. Поэтому в тепловых экспериментах, как правило, используются термоиндикаторные пленки. Наряду с общими принципами, которые необходимо выполнять при их применении, в каждом конкретном случае существуют определенные особенности. Во-первых, необходимо приблизительно знать температурную область, в которой должно работать ЖК-покрытие. Во-вторых, покрытие не должно нарушать тепловое поле исследуемой поверхности, т.е. теплоемкость исследуемой поверхности должна быть больше теплоемкости ЖК-покрытия. В-третьих, скорость изменения теплового поля должна быть меньше постоянной времени используемых ЖК-покрытий. Термочувствительное покрытие может формироваться непосредственно на исследуемой поверхности методом напыления или путем наклеивания на поверхность готовой пленки. В дозвуковых потоках, как правило, необходимо осуществлять предварительный подогрев исследуемой поверхности. В эксперименте визуализируется поле температуры поверхности, охлаждаемой набегающим потоком. В отличие от дозвукового обтекания в гиперзвуковых установках регистрируется нагрев поверхности модели. Подготовленный таким образом объект исследования устанавливается в рабочую камеру аэродинамической трубы, освещается белым светом. Цветное изображение поля температур, полученное в эксперименте, фиксируется видеокамерой.

Для количественной интерпретации цветной картины проводится калибровка термочувствительного покрытия. Оптическая схема калибровочной установки должна быть идентичной схеме, применяемой в реальном эксперименте. Таким образом, измерение температуры сводится к измерению цвета (колориметрии) в некоторой системе цветовых координат. Линейная система *RGB*, принятая в цветном телевидении, является декартовой системой координат, построенной в соответствии с трехкомпонентной теорией цветного зрения. Поскольку ЖК отражают чистые спектральные цвета, эта модель не является идеальной для точной идентификации цвета. Поэтому для измерения цвета ЖК-покрытия нами используется нелинейная система *HSI*, в которой цвет

определяется по цветовому тону H , насыщенности S и интенсивности I [10]. При изменении температуры цветовой тон H , в отличие от координат R, G, B , меняется монотонно, поэтому зависимость $H(T)$ может быть использована для калибровки и измерения температуры. Типичные калибровочные зависимости цветowego тона от температуры для смесей различного состава, характеризующие их температурный диапазон и чувствительность, представлены на рис. 8. Используя разработанные программы цифровой обработки изображения и калибровочную зависимость цветowego тона от температуры, можно получить количественное распределение температуры на исследуемой поверхности.

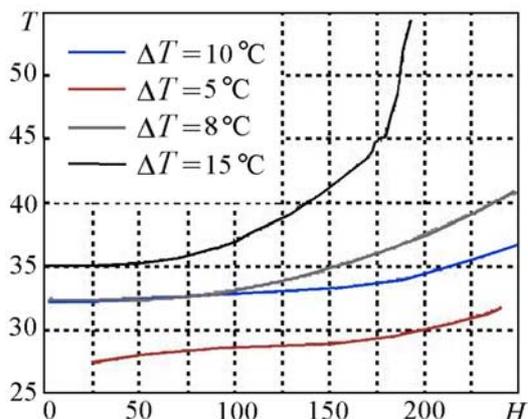


Рис. 8. Калибровочная зависимость цветowego тона ЖК от температуры

Пример использования ЖК-сенсоров для диагностики дозвуковых течений

В качестве примера применения панорамных ЖК-сенсоров можно привести результаты исследования структуры пристенного течения на модели стреловидного крыла при обтекании его под разными углами атаки дозвуковым потоком при повышенной степени турбулентности [11]. Впервые показано, что незначительные неоднородности набегающего турбулированного потока, создаваемые проволочной сеткой, оказывают существенное влияние на структуру течения в пограничном слое.

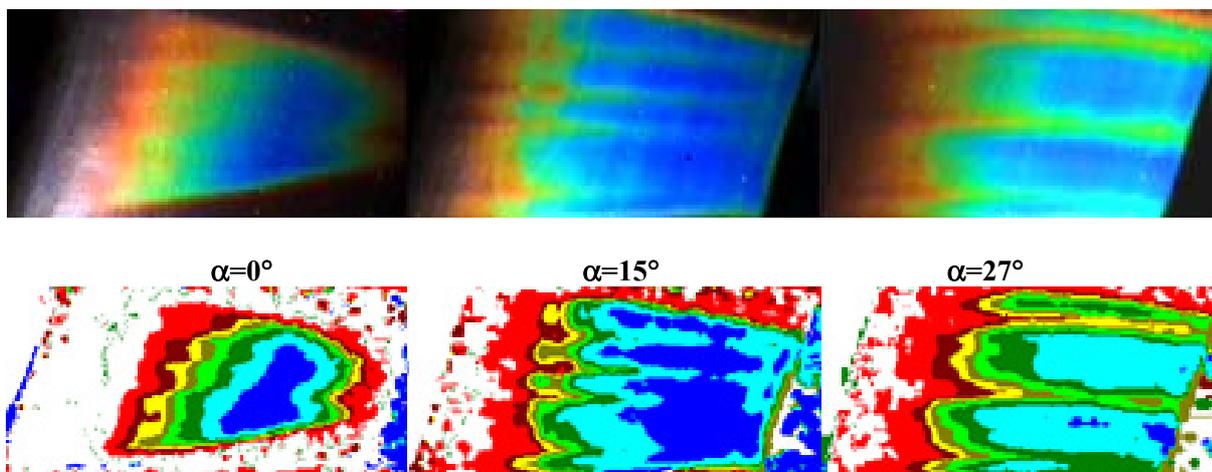


Рис. 9. Визуализация продольных структур в пограничном слое на стреловидном крыле до и после цифровой обработки изображения

При взаимодействии неоднородностей набегающего потока с пограничным слоем с благоприятным градиентом давления в нем возникают стационарные продольные структуры. Эти структуры проявляются в виде чередующихся в трансверсальном направлении областей повышенной и пониженной температуры на поверхности, что соответствует изменению средней скорости в пограничном слое, вызываемом возмущениями потока. Вблизи передней кромки пространственные масштабы возмущений определяются масштабами неоднородностей, присутствующих в набегающем потоке. Возмущения с поперечным масштабом 3 – 6 толщин пограничного слоя нарастают наиболее быстро, т. е. масштаб наблюдаемых продольных структур определяется избирательными свойствами данного пограничного слоя (рис. 9).

Примеры использования панорамных ЖК-сенсоров для диагностики гиперзвуковых течений в установках длительного и кратковременного действия

Уровень температур, которые могут измеряться в установках со стационарным режимом с помощью ЖК-сенсоров ограничивается температурой 250 °С в случае чистых кристаллов, а в случае термоиндикаторных пленок 150 – 200 °С. Однако применение ЖК-сенсоров в высокотемпературных установках возможно в режиме нестационарного нагрева. Такие измерения выполнялись нами в условиях гиперзвуковых аэродинамических установок длительного (АТ-326) и кратковременного действия (АТ-303) [4]. При гиперзвуковых скоростях течения из-за аэродинамического нагрева измерения теплоотдачи проводятся на нестационарном переходном режиме нагрева при кратковременном вводе модели в поток как на установившихся режимах течения в трубе, так и на переходных (запуск, подогрев). Временная зависимость температуры $T(x,y,t)$ используется для получения локальной плотности тепловых потоков $q(x,y,t)$, которая в простейшем случае при допущении предположения постоянства \dot{q} (ГУ 2 рода) может

быть вычислена по формуле $\dot{q} = \frac{\varepsilon \sqrt{\pi} \Delta T(\tau)}{2\sqrt{\tau}}$ (здесь $\varepsilon = \sqrt{\rho c \lambda}$ – коэффициент тепловой

активности, $\tau = t - t_0$ разность между текущим временем и временем начала режима).

В АТ-303 испытания проводились на эталонных моделях острого и затупленного конусов при числе Маха $M_\infty \approx 11$, числе Рейнольдса $Re_1 \approx 2,7 \cdot 10^6 m^{-1}$ и параметрах торможения $T_0 = 1400 \div 1420$ К и $P_0 = (93 \div 98) \cdot 10^5$ Па, длительность испытания до 250 мс. Проведенные испытания показали, что в условиях данных испытаний тонкопленочные ЖК-покрытия позволяют детектировать теплонапряженные участки поверхности и структуру пристенного течения на моделях из теплоизолятора. На рис. 10 представлен пример ЖК-визуализации обтекания затупленного конуса и соответствующая ей карта температур в условиях кратковременного эксперимента при $M_\infty = 10,8$ и угле атаки 6° [12]. Сравнение величин тепловых потоков, вычисленных по температурам, зафиксированным с помощью ЖК-покрытия, с полуэмпирическими оценками и априорными данными показало качественное совпадение картин обтекания модели и характера изменения плотности теплового потока. При этом плотности тепловых потоков, полученные методом жидкокристаллической термографии, занижены по сравнению с полуэмпирическими оценками. Этот метод позволяет получить количественную информацию об усредненных уровнях тепловых потоков при длительности эксперимента не менее

60 мс. При меньших временах установившегося режима полимерно-жидкокристаллических материал не успевает реагировать на изменение температуры из-за своей инерционности.

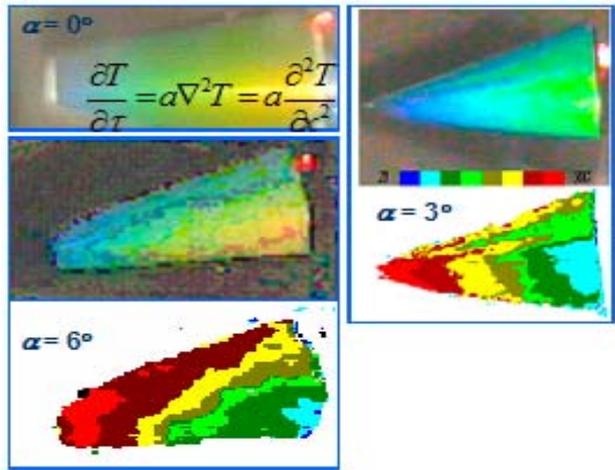


Рис. 10. Распределение плотности теплового потока на моделях острого и усеченного конусов при различных углах атаки

Аналогичные измерения тепловых потоков были выполнены также на модели спускаемого аппарата «Эксперт». Было показано как меняется режим обтекания модели при наличии ступеньки, которая может возникнуть при сборке сферической и цилиндрической частей аппарата (рис. 11).

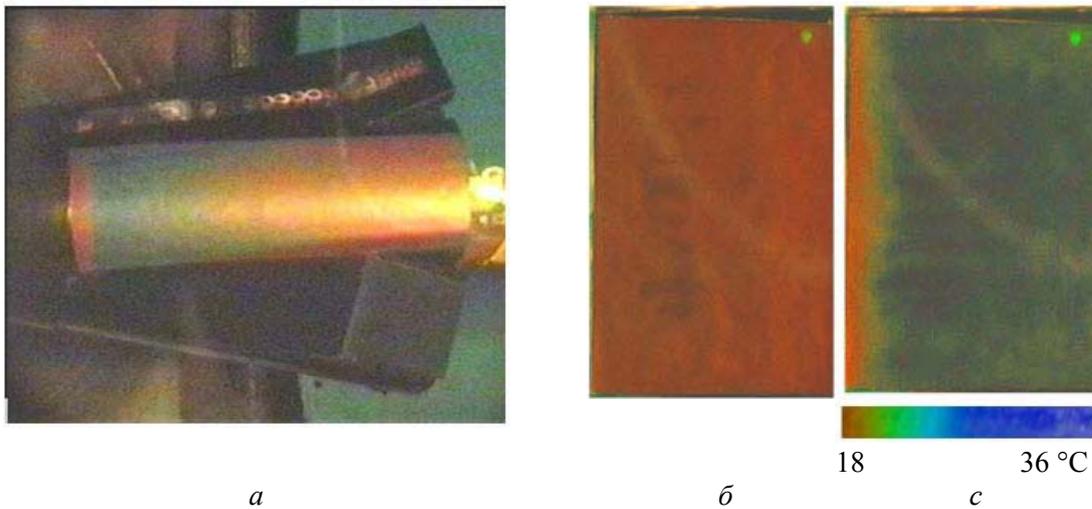


Рис. 11. Визуализация распределения температуры на поверхности возвращаемого баллистического аппарата: (а) за ступенькой высотой 2 мм; (б) и (с) визуализация присоединения потока на щитке в два момента времени

Трение

Помимо визуализации и измерения полей температур и тепловых потоков, актуальной является разработка панорамных методов диагностики величины и направления вектора касательного напряжения вязкого трения τ , индуцированного потоком на поверхности модели [13].

В основе изучаемых и тестируемых аэродинамиками методов диагностики τ с помощью ЖК, лежат два оптических эффекта. Они обусловлены свойствами двух разных текстур ХЖК – конфокальной и планарной. Первый эффект – зависимость времени оптического отклика конфокальной текстуры на воздействие касательного напряжения τ от уровня τ . Второй – зависимость максимума селективного отражения $\lambda(I_{\max})$ планарной текстуры ХЖК от уровня и направления вектора τ . Рассмотрим более подробно последний эффект, т.к. он представляет интерес для измерения распределения вектора касательного напряжения. Заметная угловая зависимость цвета ХЖК позволяет определить направление вектора касательного напряжения [14].

Этот подход к измерению распределения вектора касательного напряжения построен на том, что при исходной планарной ориентации ХЖК и слабой зависимости шага спирали от температуры, для фиксированных углов освещения и наблюдения максимальная длина волны селективного отражения ЖК-покрытия будет определяться величиной механического сдвига.

Экспериментальная струйная установка включала в себя систему подачи воздуха под давлением до 10^5 Па для организации потока с контролируемыми параметрами на выходе медной трубки с внутренним диаметром 10 мм. Изменение скорости потока на срезе сопла регистрировалось при помощи насадка Пито – Прантля и доходило до 150 м/с.

Коллиматор дает квазипараллельный пучок белого света, ось которого нормальна поверхности исследуемого покрытия, находящегося в плоскости ХУ, и совпадает с осью Z измерительной системы координат. Ось X совпадает с направлением потока и параллельна оси установки. Конструкция позволяет точно выставлять полярный θ и азимутальный ϕ углы, что повышает точность измерений. Для измерения спектрального отклика использовался портативный спектрофотометр «Колибри-2» с волоконным приемником, который позволил осуществить точечные измерения.

Регистрация оптического отклика проводилась также с помощью цифровой видеокамеры с высоким пространственным разрешением и скоростью 25 кадров в секунду. При цифровой обработке использовалась система колориметрических координат HSI (цветовой тон H, насыщенность S и интенсивность I).

Как показали эксперименты, данная установка позволила охватить диапазон касательных напряжений достаточный для переориентации ЖК вплоть до разрушения структуры ЖК и начала течения. На рис. 12 приведена оптическая схема калибровки чувствительности ЖК к сдвигу и угловому положению.

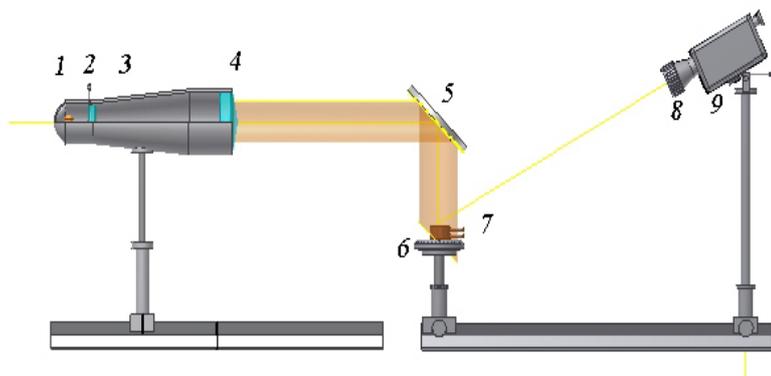


Рис. 12. Схема установки:

1 – зеркало, 2 – лампа, 3 – поляризатор, 4 – линза, 5 – зеркало, 6 – поворотный столик с ЖК-покрытием, 7, 8 – анализаторы, 9 – камера или волоконно-оптический приемник

Термостатируемый медный диск с ЖК-покрытием устанавливался на поворотном столике. Угол освещения составлял 0° относительно нормали. Регистрация оптического отклика ЖК на сдвиговое напряжение осуществлялась с помощью фотоаппарата и оптоволоконного приемника излучения, отраженного от осевой точки потока (ВОК тип ОКV/ 1000/1100/1600/NA=0,22/SMA). Считываемая точка всегда находилась на оси в центре поворотного столика. В экспериментах варьировался угол между направлением вектора касательного напряжения и приемником в горизонтальной плоскости $\varphi \in (-180, +180)^\circ$. Значение $\varphi=0^\circ$ соответствовало случаю, когда поток направлен против наблюдателя. Углы наблюдения в вертикальной плоскости изменялись от 17 до 45° . Блок освещения включал галогенную лампу и линзы для получения параллельного пучка. ЖК-покрытие наносилось поверх слоя черной краски на термостатированный медный цилиндр или на подложку из оргстекла с помощью распыления.

Регистрация оптического отклика ЖК в зависимости от времени показала, что, под воздействием потока на планарную текстуру происходит сдвиг максимума длины волны селективного отражения (λ_{\max}) в синюю область спектра с последующей релаксацией к исходной величине ($\lambda_{\max(0)}$) после выключения потока (рис. 13).

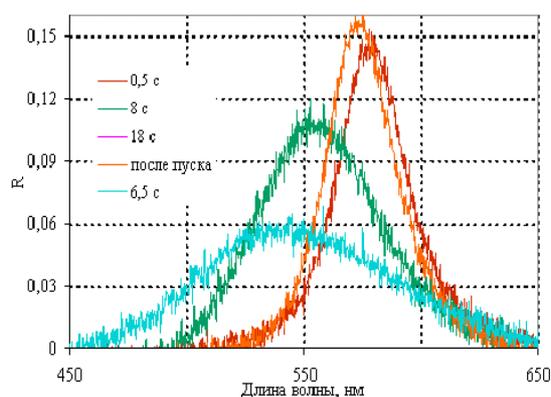


Рис. 13. Синий сдвиг спектра под влиянием потока

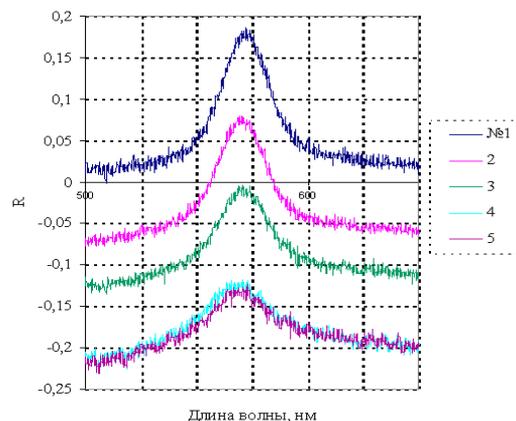


Рис. 14. Воспроизведение оптического отклика в многократных пусках

Время релаксации в наших экспериментах составляло от нескольких секунд до десятков секунд в зависимости от уровня сдвига. При этом воспроизводимость спектра отражения исходной планарной текстуры оказалась хорошей даже в условиях релаксации ЖК после 4 – 5 повторных пусков на одном образце (рис. 14).

Полученная экспериментально зависимость максимума длины волны селективного отражения от уровня касательного напряжения (рис. 15) хорошо аппроксимируется выражением: $\lambda = -11,85\tau + 652,0$.

Чем сильнее угловая зависимость в горизонтальной плоскости, тем выше чувствительность ЖК к изменению направления вектора касательного напряжения. Для исследуемой ЖК смеси наблюдается заметное влияние углов: освещения, наблюдения в вертикальной плоскости относительно нормали и азимутального угла наблюдения (φ) в горизонтальной плоскости. Уменьшение угла между освещением и наблюдением привело к сдвигу в синюю область. Анализ зависимости спектра отражения от азимута показал, что наиболее сильно изменяется интенсивность отраженного сигнала. На рис. 16 приведена зависимость сдвига максимума длины волны селективного отражения от угла азимута для одного из уровней сдвига.

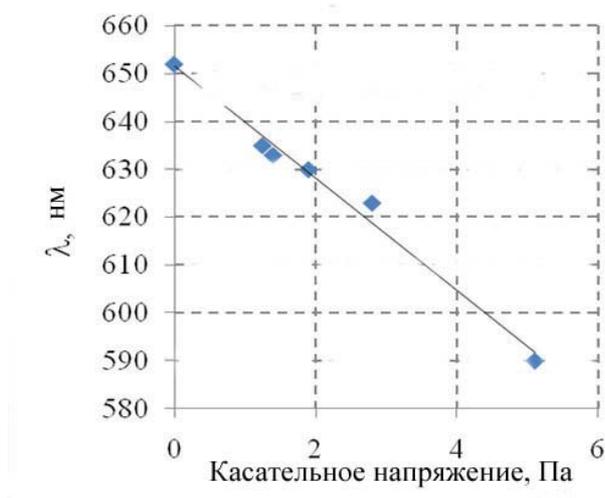


Рис. 15. Зависимость максимума длины волны селективного отражения от уровня касательного напряжения

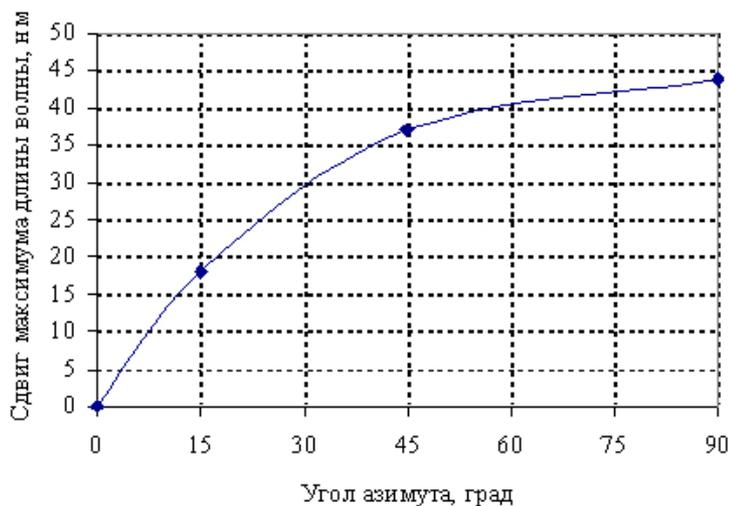


Рис. 16. Влияние угла относительно нормали к поверхности θ (синий сдвиг)

Совместно с ЦАГИ разработанные ЖК-смеси (три разных состава) и эффект селективного отражения света планарной текстурой ХЖК были использованы для тестовых испытаний и визуализации распределения касательных напряжений на вертикальном оперении модели (с турбулизаторами), обтекаемой дозвуковым потоком в трансзвуковой АТ-128 ЦАГИ [15] при числах Маха от 0,2 до 0,9 (рис. 17).

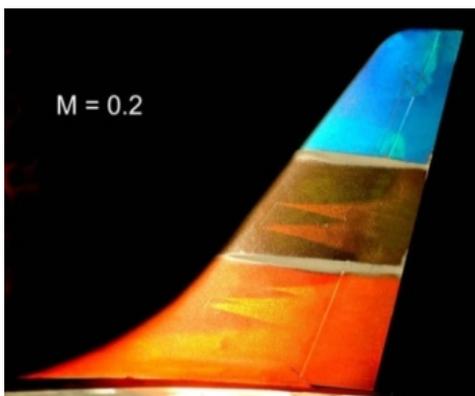


Рис. 17. ЖК-визуализация распределения касательных напряжений при $M=0,2$

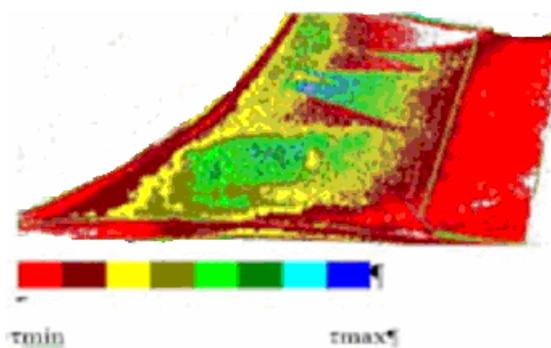


Рис. 18. Карта касательных напряжений при $M=0,2$

На рис. 18 показана карта касательных напряжений, полученная после цифровой обработки картины визуализации с помощью ЖК-индикаторов нечувствительных к температуре, но чувствительных к касательным напряжениям при $M=0,2$. Четко видны области турбулентного течения с повышенными уровнями касательных напряжений (зеленый цвет) в следе за турбулизаторами и в прикорневой области.

Заключение

Уникальные оптические свойства жидких кристаллов, а именно их высокая чувствительность к внешним воздействиям нашли свое применение при создании новых оптических диагностических методов в аэродинамическом эксперименте. В настоящее время благодаря применению вычислительной техники использование термочувствительных материалов возможно не только для визуализации температурных полей, но и для их измерения. Полученные с помощью полимерно-жидкокристаллических материалов карты распределения температур позволяют экспериментаторам детально исследовать структуру течения вблизи поверхности и разрабатывать методы управления этой структурой.

Рассмотрены результаты тестирования цветового подхода к панорамному измерению величины и направления вектора касательного напряжения на поверхности модели обтекаемой потоком с помощью жидких кристаллов нечувствительных к температуре и чувствительных к касательным напряжениям. Представленные данные методических и калибровочных измерений механо-оптических характеристик ЖК-составов, разработанных в ИТПМ, демонстрируют принципиальную возможность получения количественных данных с помощью цветового подхода и исследованных ЖК-материалов. Установлено, что разработанные ЖК-смеси слабо чувствительные к температуре в интервале (293 – 323 К) могут быть использованы повторно (\approx до 5 раз) пока позволит толщина слоя ЖК. В то же время для практического применения метода в аэродинамических испытаниях требуется его дальнейшее тестирование, а также метрологическое обеспечение и аттестация.

Список использованной литературы

1. Klein E. J. //Astronautics and Aeronautics 1968. № 6. P. 70 – 73.
2. Zharkova G. M. // Laser Technology. 2000. Vol. 32. № 6. P. 55 – 62.

3. Жаркова Г.М., Коврижина В. Н. // ИФЖ. 2010. Т. 83. № 6. С. 1072 – 1083.
4. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. et al. // Proc. of XIIIth Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2007). Novosibirsk, 2007. Part I. P. 221 – 228.
5. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Khachatryan V. M. // Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow / ed. by C. Greated, J. Cosgrove, J. M. Buick. Trowbridge, UK, 2002. P. 143 – 150.
6. Жаркова Г. М., Коврижина В. Т., Петров А. П. // Проблемы и достижения прикладной математики и механики : к 70-летию акад. В. М. Фомина : сб. науч. тр. Новосибирск : Параллель, 2010. С. 471 – 481.
7. Pochan J. M., Marsh D. G. // J. Chem. Phys. 1972. Vol. 57. Iss. 3. P. 1193 – 1220.
8. Bonnett P., Jones T. V., McDonnell D. G. // Liquid Crystals. 1989. Vol. 6. № 3. P. 271 – 280.
9. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск : Наука, 1994. 214 с.
10. Simonich J. C. Moffat R. J. // Rev. Sci. Instrum. 1982. Vol. 53. № 5. P. 678 – 683.
11. Жаркова Г. М., Занин Б. Ю., Коврижина В. Н. и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2002. Т. 9. № 2. С. 213 – 215.
12. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. // Proc. of the XIV Intern. Conf. on the methods of aerophysical research (ICMAR-2008). Novosibirsk, 2008. P. 113 – 114.
13. Корнилов В. И. Пространственные пристенные турбулентные течения в угловых конфигурациях. Новосибирск : Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 399 с.
14. Reda D. C., Muratore J. J. Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings // AIAA J. 1994. Vol. 32. P. 1576 – 1582.
15. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Mosharov V. E. et al. // XXII Scientific and Engineering Conference on Aerodynamics. TzAGI, 2011. P. 67.

Поступила в редакцию 20.09.2012 г.