

УДК 532.783

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗВУКОВЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Г. М. Жаркова, В. Н. Коврижина, В. М. Хачатурян

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

Изложены физические основы жидкокристаллической термографии, позволяющей визуализировать и измерять поля температур и тепловых потоков. Описаны техника эксперимента и способы получения количественных результатов. Рассмотрены два подхода к интерпретации данных визуализации: монохроматический и хроматический. Приведены результаты, иллюстрирующие возможности метода в аэрофизическом эксперименте.

Введение. В механике жидкости и газа панорамная визуализация течений является предварительным этапом любого исследования поля течения зондовыми методами и имеет первостепенное значение. Особенно сложны визуализация структуры и определение газодинамических параметров течения в пограничном слое из-за их высокой чувствительности к малым возмущениям потока. Известно, что 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. Для бесконтактной панорамной визуализации и измерения температуры на поверхности моделей традиционно используются методы инфракрасной (ИК) и жидкокристаллической (ЖК) термографии. Оба метода позволяют определить в одном эксперименте распределение температуры и тепловых потоков на поверхности сложной модели.

Оптические эффекты в жидких кристаллах в аэродинамическом эксперименте использованы впервые в 1968 г. для визуализации перехода пограничного слоя из ламинарного состояния в турбулентное [1]. В дальнейшем велись работы по созданию ЖК-индикаторов, разрабатывались методики их применения в экспериментальной аэромеханике [2–5]. В последние годы усовершенствованы известные и разработаны оригинальные методики ЖК-термографии (ЖКТ) [6–12] за счет модернизации измерительной аппаратуры и создания новых ЖК-материалов. В настоящее время метод ЖКТ характеризуется высоким пространственным и температурным разрешением, что позволяет использовать полученные экспериментальные данные для проверки численных моделей сложных течений.

В данной работе рассматриваются физические эффекты в жидких кристаллах и описана техника аэродинамического эксперимента с использованием жидких кристаллов. Рассматриваются два подхода к интерпретации данных визуализации: монохроматический и хроматический. Для иллюстрации возможностей метода ЖКТ приводятся результаты исследования структуры течения на крыле малого удлинения при дозвуковой скорости потока.

1. Оптические свойства термохромных жидких кристаллов. Для измерения температуры с помощью жидких кристаллов используется эффект селективного рассеяния света на периодической структуре холестерических жидких кристаллов. В этих кристаллах молекулы расположены слоями, причем в пределах каждого слоя они имеют тенден-

цию устанавливаться параллельно некоторой общей оси, описываемой единичным вектором, который называется директором. При переходе от одного слоя к другому директор поворачивается на небольшой угол. В результате получается слоистая спиральная текстура с определенным шагом спирали, называемая планарной текстурой. При освещении белым светом такая текстура селективно отражает свет подобно дифракционной решетке. При этом выполняется условие Вульфа — Брегга, т. е. в случае нормального падения света длина волны с максимальной интенсивностью отражения λ_0 приблизительно равна шагу спирали. Для многих холестериков шаг спирали $p = 400 \div 1000$ нм, поэтому λ_0 находится в области видимого света. Поскольку холестерические жидкие кристаллы являются лабильной средой, любое внешнее воздействие (изменение температуры, механический сдвиг) приводит к изменению шага спирали, что сопровождается изменением длины волны и интенсивности селективного отражения, т. е. цвета кристаллов. Зависимость цвета холестерических жидких кристаллов от температуры позволяет получить панорамное изображение поля температур на исследуемой поверхности.

2. Техника применения жидких кристаллов. Техника применения жидких кристаллов сравнительно проста. При этом наряду с определенными особенностями в каждом случае существует ряд общих условий. Во-первых, необходимо приблизительно знать температурную область, в которой должно работать ЖК-покрытие. Во-вторых, ЖК-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 холестерических жидких кристаллов.

В аэродинамических экспериментах ЖК-покрытие подвержено одновременному воздействию температуры и поверхностного трения. Для защиты жидких кристаллов от механического сдвига в них добавляется небольшое количество лака или клея. Более надежным способом защиты от механического воздействия является капсулирование жидких кристаллов в полимерную матрицу [4]. Выбор полимерной матрицы и метод капсулирования определяются условиями эксперимента. Материал, получаемый в результате капсулирования жидких кристаллов, может быть получен в виде пленки или отдельных капсул в изотропной среде. Основными характеристиками ЖК-индикаторов являются динамический диапазон температур (область рабочих температур) данного индикатора, зависимость длины волны селективного отражения света (цвета) от температуры $\lambda = f(T)$, называемая цветотемпературной характеристикой, а также отношение $\Delta\lambda/\Delta T$, характеризующее температурную чувствительность. Перечисленные характеристики определяются составом ЖК-смеси. Известны составы, имеющие динамический диапазон температур от 0,02 до 50 °С в области температур от -30 до 250 °С.

Выбор ЖК-покрытия (жидких кристаллов в свободном виде или закапсулированных в полимер) определяется скоростью потока в эксперименте. Исследования показали, что цвет жидких кристаллов в свободном виде не изменяется существенно под влиянием напряжения сдвига до скорости потока 10 ÷ 20 м/с. При более высоких скоростях ошибка измерения температуры может быть значительной. Поэтому в высокоскоростных установках целесообразно использовать жидкие кристаллы, закапсулированные в полимер. Однако в этом случае необходимо учитывать тепловую инерционность пленочных термоиндикаторов (в зависимости от толщины пленки тепловая инерционность может достигать значения 0,05 с).

При прохождении через холестерическую ЖК-пленку свет разлагается на две волны, одна из которых селективно отражается (именно она характеризует цвет покрытия), а другая проходит без изменения. Последнюю необходимо поглотить, для чего до нанесения холестерического ЖК-покрытия на поверхность напыляется тонкий слой черной

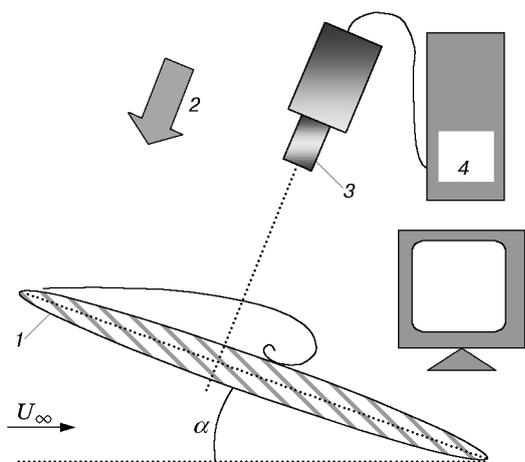


Рис. 1. Оптическая схема измерений и калибровки:

1 — модель (или термоклин для калибровки); 2 — источник света; 3 — камера; 4 — компьютер

краски. Важно, чтобы краска не растворялась в органическом растворителе, используемом для нанесения ЖК-покрытия. Затем на поверхность наносится ЖК-покрытие. Если используется пленка и форма поверхности близка к плоской, то пленку приклеивают клеем. На поверхность сложной формы покрытие наносится путем распыления смеси жидких кристаллов с полимером или клеем в растворителе. Выбор типа растворителя и соотношения жидких кристаллов и растворителя определяются параметрами растворимости компонентов и вязкостью жидких кристаллов. Оптимальная толщина покрытия составляет $20 \div 30$ мкм.

Калибровку жидких кристаллов необходимо проводить при выбранных геометрических параметрах и условиях освещения, которые должны соответствовать условиям эксперимента. Для ослабления угловой зависимости селективного отражения холестерических жидких кристаллов углы освещения и наблюдения выбираются близкими к нормальному или точно регистрируются для коррекции цифровым способом. Для калибровки, как правило, используется термоклин, на поверхности которого реализуется линейное распределение температуры, контролируемое термопарами. Схема регистрации и калибровки представлена на рис. 1.

3. Регистрация и обработка изображения. Для измерения распределения температуры в каждой точке поверхности необходимо измерить длину волны, соответствующую максимальной интенсивности селективно-отраженного света. Предназначенные для этой цели спектральные приборы неудобны в условиях аэродинамического эксперимента. Используя для регистрации панорамного изображения видеозапись или ввод изображения в компьютер, спектральный анализ с целью измерения температуры можно свести к анализу и цифровой обработке изображений. В зависимости от оптической схемы регистрации и калибровки все существующие методы измерения температуры с помощью жидких кристаллов можно разделить на две группы: методы с использованием регистрации сигнала интенсивности селективного отражения монохроматического света и методы с использованием регистрации и обработки полного цветового телевизионного сигнала. Рассмотрим оба метода подробнее.

3.1. Методы с использованием регистрации и цифровой обработки монохроматического изображения. К данным методам относятся спектрально-зональная фильтрация и метод полос [6]. Для измерения температуры по моно- и ахроматическим изображениям разработаны методы, основанные на разложении спектра с использованием оптических светофильтров, т. е. фильтрации, либо одного или нескольких источников монохроматического излучения. В первом случае для определения положения максимума селективного отражения света определенной длины волны регистрируется до 20 кадров, каждый из которых

снимается через определенный светофильтр. При высокой точности этот метод требует значительного объема памяти и быстродействия вычислительной техники. Длительность реализации данного метода делает невозможным исследование нестационарных процессов.

Для преодоления указанных недостатков разработан метод полос, который для некоторых задач может быть использован вместо фильтрации и который позволяет исследовать как стационарные, так и нестационарные процессы, не требуя больших затрат. В этом методе исследуемая поверхность освещается пучком света, пространственно модулированным прямолинейными регулярными полосами. Изображение полос с помощью призмы разлагается в спектр по координате, соответствующей направлению, перпендикулярному направлению этих полос. При неоднородности температуры на поверхности положение полос для разных длин волн будет различным. По сдвигу полос таким способом можно измерить температурное поле в одном эксперименте, однако для некоторых задач его пространственного разрешения может быть недостаточно.

3.2. Методы с использованием регистрации и цифровой обработки цветного изображения. Как правило, для регистрации оптического отклика жидких кристаллов применяются видеокамеры CCD (charge coupled device) с сенсором, работающим по принципу приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц). Захват отдельных кадров осуществляется интерфейсами, с помощью которых аналоговый телевизионный сигнал преобразуется в цифровую форму (красный R (red), зеленый G (green) и синий B (blue) компоненты) и записывается в видеобуфере. Таким образом, измерение температуры сводится к измерению цвета (колориметрии) [13]. Процесс измерения цвета состоит в определении координат точки на плоскости цветов в той или иной колориметрической системе координат. Поэтому все методы интерпретации цветных изображений ЖК-термограмм различаются в основном выбранной базисной колориметрической системой. Линейная система RGB, принятая в цветном телевидении, является декартовой системой координат, построенной в соответствии с трехкомпонентной теорией цветного зрения. Поскольку холестерические жидкие кристаллы отражают чистые спектральные цвета, эта модель не является идеальной для точной идентификации цвета. Поэтому для измерения цвета предложено использовать нелинейную систему HSI, в которой цвет определяется по цветовому тону H (hue), насыщенности S (saturation) и интенсивности I (intensity) [11, 12], а алгоритм преобразования $RGB \rightarrow HSI$ достаточно прост [13].

Типичные зависимости цветовых координат R, G, B, H, S, I от температуры представлены на рис. 2. Видно, что 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. Область чистых спектральных цветов находится в диапазоне $H \leq 240^\circ$. Смешанным пурпурным цветам соответствуют значения $H = 240 \div 360^\circ$ (область неопределенности цветового тона). Для более точного определения цвета необходимо учитывать величину насыщенности S.

На рис. 3 приведены типичные калибровочные зависимости $H(T)$ для ЖК-индикаторов с разной шириной области селективного отражения ΔT . Температурная чувствительность ЖК-покрытия на разных участках оптического диапазона длин волн различна и может составлять $0,01 \div 0,16^\circ\text{C}$ при изменении цветового тона на 1° .

Влияние таких факторов, как неравномерность освещенности по полю изображения, диаметр апертуры ирисовой диафрагмы, термический гистерезис и др., исследовано в серии экспериментов на ЖК-покрытиях с различными характеристиками [14]. Установлено, что калибровочная зависимость $H(T)$ малочувствительна к действию указанных выше факторов, что является одним из преимуществ базиса HSI при цифровой обработке в ЖКТ. Дальнейшее усовершенствование метода возможно при введении второй (угловой) переменной в калибровочную зависимость и/или использовании съемки с нескольких ра-

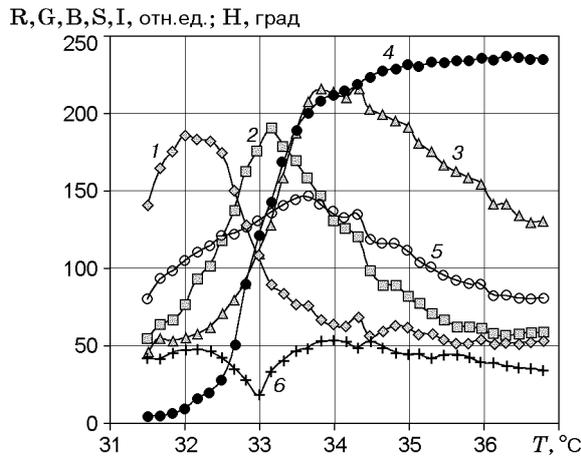


Рис. 2

Рис. 2. Типичные зависимости цветковых координат R, G, B, H, S, I от температуры: 1 — R; 2 — G; 3 — B; 4 — H; 5 — I; 6 — 100S

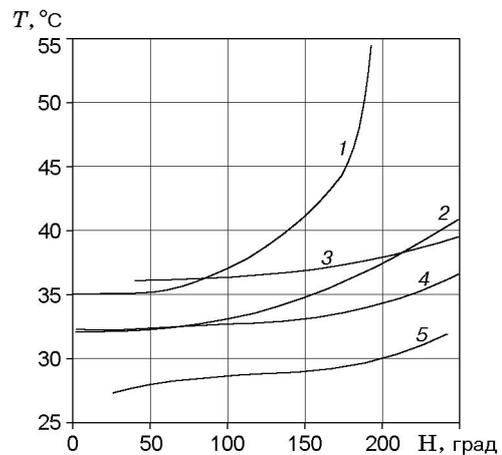


Рис. 3

Рис. 3. Цветотемпературные характеристики жидких кристаллов с разной шириной области селективного отражения ΔT :

1 — $\Delta T = 15^\circ\text{C}$; 2 — $\Delta T = 7,8^\circ\text{C}$; 3 — $\Delta T = 3^\circ\text{C}$; 4 — $\Delta T = 4^\circ\text{C}$; 5 — $\Delta T = 2,8^\circ\text{C}$

курсов. Учет этих факторов позволяет свести погрешность метода измерений к минимуму и максимально использовать высокое температурное разрешение жидких кристаллов.

4. Пример применения ЖКТ в аэрофизическом эксперименте. С помощью метода ЖКТ получены панорамное распределение температур и осредненная картина пристенного течения при обтекании крыльев с удлинением $b/c = 0,87$; 2 в широком диапазоне режимных параметров [10]. Имеющиеся в литературе данные по визуализации структуры течения при низких дозвуковых скоростях набегающего потока получены с помощью методов шелковинок либо сажемасляной пленки преимущественно для подветренной стороны крыла.

На рис. 4, 5 приведены результаты измерения на обеих сторонах крыла при $b/c = 0,87$, полученные с использованием ЖК-пленки с шириной области селективного отражения $\Delta T = 31 \div 37^\circ\text{C}$, на закритическом угле атаки $\alpha = 27^\circ$ при числе Рейнольдса $Re_c = 0,176 \cdot 10^6$, вычисленном по хорде. Исследуемая модель крыла имела симметричный профиль с максимальной относительной толщиной 16 %. Эксперименты выполнены при повышенном уровне турбулентности набегающего потока $\varepsilon = 1\%$. Как и ожидалось, на подветренной стороне крыла наблюдается отрывное течение (см. рис. 4). На наветренной стороне видна стационарная система продольных вихрей (см. рис. 5), которая отсутствует при $\varepsilon = 0,1\%$. Эти продольные вихри не удается визуализировать методом сажемасляной пленки. Наличие системы продольных вихрей подтверждено термоанемометрическими измерениями. Аналогичные структуры реализуются на крыле с удлинением $b/c = 2$, максимальной относительной толщиной 15 % и несимметричным профилем (наветренная сторона практически плоская). Изменение температуры на наветренной стороне в трансверсальном направлении в зависимости от времени показано на рис. 6 при $x = 0,5c$ и числе Рейнольдса $Re_c = 0,176 \cdot 10^6$. Видно, что в этом случае с помощью жидких кристаллов удалось визуализировать перепады температур, равные $0,5^\circ\text{C}$ и менее, обусловленные особенностями структуры течения.

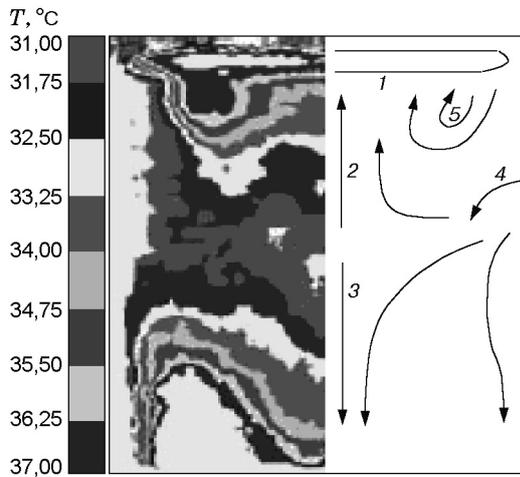


Рис. 4

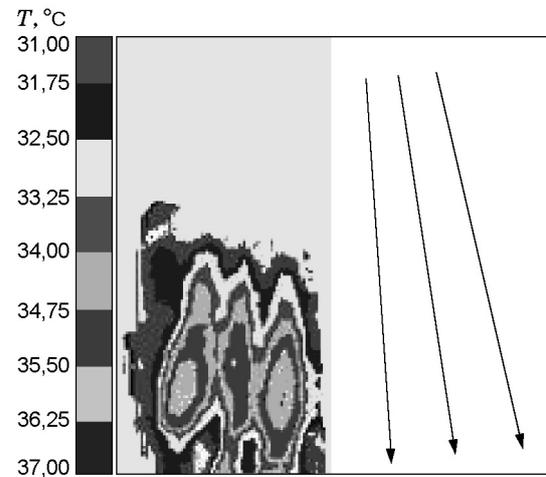


Рис. 5

Рис. 4. Карта распределения температур на подветренной стороне крыла (слева) и схема течения (справа) ($\alpha = 27^\circ$, $Re_c = 0,176 \cdot 10^6$, $\varepsilon = 1\%$; направление потока сверху вниз): 1 — застойная зона; 2 — область возвратного течения; 3 — турбулентный пограничный слой; 4 — концевые вихри; 5 — фокус вихря вблизи передней кромки

Рис. 5. Карта распределения температур на наветренной стороне крыла (слева) и схема течения (стрелками показаны продольные вихри) (справа) ($\alpha = 27^\circ$, $Re_c = 0,176 \cdot 10^6$, $\varepsilon = 1\%$; направление потока сверху вниз)

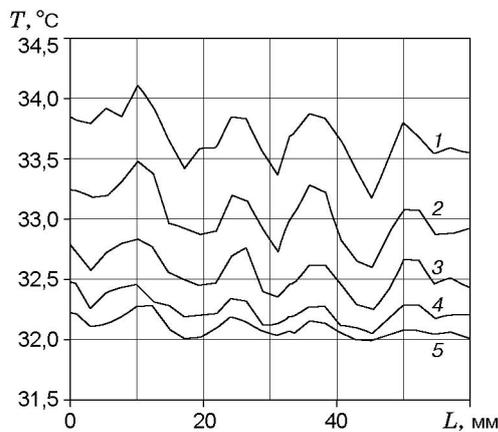


Рис. 6. Зависимость температуры в направлении размаха крыла L на наветренной стороне крыла от времени ($\alpha = 27^\circ$, $\varepsilon = 1\%$):
1 — $t = 0$; 2 — $t = 4$ с; 3 — $t = 8$ с; 4 — $t = 12$ с; 5 — $t = 16$ с

Заключение. Уникальные оптические свойства холестерических жидких кристаллов, усовершенствованные экспериментальные методы и цифровая обработка видеозображений позволяют осуществить панорамную визуализацию и измерить распределения температуры на поверхности.

Разработанные подходы применимы для широкого круга задач о тонкой структуре течений, а также задач теплообмена, теплового контроля или контроля положения модели в потоке, в том числе при исследовании некоторых нестационарных режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klein E. J. Application of liquid crystals to boundary layer flow visualization. N. Y., 1968. (Paper / AIAA; N 68-376).

2. **Zharkova G. M., Khachaturyan V. M.** The study of a liquid crystalline heat flow transducer // *Mol. Cryst. Liquid Cryst.* 1985. V. 127. P. 283–288.
3. **Zharkova G. M.** Temperature field visualization using liquid crystal method // *Experiment. Heat Transfer.* 1991. V. 4. P. 83–92.
4. **Пат. 1220329 РФ, МКИ С 09 к 19/36.** Термоиндикаторная композиция / Г. М. Жаркова, В. М. Хачатурян. Оpubл. 28.02.94. Бюл. № 4. С. 181.
5. **Жаркова Г. М., Соинин А. С.** Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1994.
6. **Жаркова Г. М., Коврижина В. Н., Корнилов В. И., Павлов А. А.** Регистрация полей температур с помощью ЖК-покрытий // *Теплофизика и аэромеханика.* 1996. Т. 3, № 4. С. 317–324.
7. **Zharkova G. M.** Optical phenomena in liquid crystals and their application in aerophysical studies // *Optics Laser Tech.* 2000. V. 32. P. 611–619.
8. **Dovgal A. V., Kornilov V. I., Kovrizhina V. N., et al.** Visualization of boundary layer structure under the conditions of low subsonic flow velocities using liquid crystal coatings // *Proc. of the Intern. conf. on the methods of aerophys. res., Novosibirsk, 2–6 Sept. 1996.* Novosibirsk: Inst. of theor. and appl. phys., 1996. Pt 2. P. 64–69.
9. **Zharkova G. M., Dovgal A. V., Kovrizhina V. N., Zanin B. Yu.** Investigation of flow separation on a finite span wing by liquid crystal coatings // *The Millenium 9th Intern. symp. on flow visualization, Edinburgh (Scotland), 22–25 Aug. 2000.* CD ROM Proc., Paper 331.
10. **Zanin B. Yu., Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Brylyakov A. P.** Boundary layer structure study on a 2-D airfoil at high level of free stream turbulence by liquid crystal technique // *Proc. of the 4th Pacific intern. conf. on aerospace sci. and tech. (PICAST4), Kaohsing (Taiwan), 21–23 May 2001.* Kaohsing: Nat. Cheng Kung Univ., 2001. P. 743–747.
11. **Simonich J. C., Moffat R. J.** New technique for mapping heat-transfer coefficient contours // *Rev. Sci. Instrum.* 1982. V. 53, N 5. P. 678–683.
12. **Akino N., Kunugi T., Ichimiya K., et al.** Improved liquid crystal thermometry excluding human color sensation // *Trans. ASME. J. Heat Transfer.* 1989. V. 111. P. 558–565.
13. **Прэртт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 1.
14. **Коврижина В. Н.** Колориметрический анализ жидкокристаллических композитов и его применение для исследования дозвуковых потоков: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук. Новосибирск, 1999.

Поступила в редакцию 29/VI 2001 г.
