

УДК 533.6.071.3: 532.783

Г.М. Жаркова, В.Н. Коврижина

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

МЕХАНООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ И МЕТОДЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ

В докладе приводится краткий обзор оптических свойств термотропных жидких кристаллов и их смесей, которые могут быть использованы для визуализации сдвиговых напряжений в пристенных течениях. Выполнен анализ подходов к измерению величины и направления вектора касательного напряжения. Приводятся примеры визуализации с помощью жидких кристаллов чувствительных к сдвигу, разработанных в ИТПМ СО РАН.

КАСАТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ, ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки моделей летательных аппаратов необходимо знать характеристики пристенных течений и, в частности, касательное напряжение по всей поверхности модели. Касательная составляющая вязких напряжений в точке на поверхности тела, обтекаемого потоком, определяет, в конечном счете, лобовое сопротивление летательного аппарата, а значит расход топлива и/или дальность полета на некоторых режимах. Помимо этого для широкого класса течений требуются достоверные экспериментальные данные для уточнения и построения моделей турбулентности. 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 методы, использующие аналогию Рейнольдса между поверхностным трением и теплопередачей, и различные модификации лазерной интерферометрии масляной пленки [1]. Для визуализации направления вектора касательного напряжения традиционно используются методы визуализации предельных линий тока (метод шелковинок, масляных точек, двуокись титана с керосином, метод сажа - масляной визуализации, метод многоцветного (или густого) масла [2]).

Еще одним инструментом для панорамной диагностики касательных напряжений являются тонкопленочные покрытия на основе жидких кристаллов (ЖК) [3,4]. ЖК вследствие присутствия в них ориентационного порядка являются оптически анизотропными средами. Благодаря этому, при внешней деформации, вызывающей структурные изменения в слое ЖК, возникает оптический отклик, который может быть использован в диагностических целях. Наиболее широко в аэродинамике применяются ЖК для панорамной визуализации и измерения полей температур и тепловых потоков [5, 6]. Различие индикаторов температуры и сдвига заключается в том, что для измерения температуры используются ЖК пленки на основе ЖК, закапсулированных в полимер, а для измерения касательных напряжений - ЖК в чистом виде. К настоящему времени накоплен достаточно обширный материал по изучению и использованию жидких кристаллов, чувствительных к касательным напряжениям в аэродинамике, но до полного понимания

физических основ и получения достоверных количественных данных еще далеко. Первыми предложившими использовать коммерчески доступные ЖК в аэродинамическом эксперименте были Клейн и Маргоцци [7-9]. Настоящая работа расширяет список работ с применением ЖК опубликованный в [2], как за счет работ выполненных в ИТПМ с ЖК материалами, синтезированными также в ИТПМ, так и некоторых более поздних работ других авторов.

Жидкие кристаллы в потоке подвергаются одновременному воздействию температуры, давления и касательных напряжений. Влияние температуры можно исключить или уменьшить путем подбора состава ЖК смеси. В изотропной жидкости сдвиговые напряжения зависят лишь от сдвиговых компонент тензора градиентов скоростей, а нормальные от них не зависят. В анизотропной жидкости возникают перекрестные эффекты [10]. С одной стороны, в основе теории упругости ЖК Озеена и Франка лежит тот факт, что, в отличие от деформации твердого тела, в жидких кристаллах деформации сжатия - растяжения очень малы, а деформации сдвига приводят к течениям. С другой стороны известно, что при сдвиге наклонно ориентированного слоя нематических ЖК (НЖК) возникают нормальные напряжения, а при его поперечном сжатии (растяжении) обнаруживается вторичное пристенное вихревое течение и соответствующие ему сдвиговые силы. Знак эффектов зависит от направления наклона директора по отношению к нормали. Вторичные эффекты исчезают при планарной и гомеотропной ориентации НЖК. В настоящее время именно эти две ориентации НЖК изучаются в аэродинамическом эксперименте для визуализации результирующих касательных напряжений обусловленных потоком. В то же время при углах наклона близких к 45° эти эффекты могут оказаться значительными. Такие углы наклона молекул НЖК могут реализоваться, например, при длительном воздействии больших скоростей потока. Здесь мы ограничимся рассмотрением дозвуковых скоростей течения, при которых минимальное время эксперимента может составлять от нескольких до 100 секунд.

Что касается холестерических ЖК (ХЖК), изменение их оптических свойств под влиянием статического давления обусловлено геометрическим и структурным факторами, которые оказывают противоположное влияние на сдвиг максимума селективного отражения. В [11] установлено, что изменение давления от 30 до 150 МПа приводит к сдвигу максимума длины волны селективного отражения исследованных смесей ХЖК в красную область. Клейн исследовал влияние давления от атмосферного до нескольких мм. рт. ст. на смесь низкомолекулярных ХЖК и установил, что длина волны максимума рассеяния для исследованных веществ практически не зависит от давления в этом диапазоне [8]. В [12] также получено, что в диапазоне статического давления от 760 до 0,005 мм. рт. ст. ($1,013 \cdot 10^5 - 0,67$ Па) уменьшение давления на планарную текстуру ХЖК практически не оказало влияния на максимум длины волны селективного отражения исследованных смесей ($\Delta\lambda=0-5$ нм). При этом при падении давления наблюдалось уширение пика селективного отражения.

Анализ литературы показал, что наиболее широко и теоретически и экспериментально изучено влияние периодического чистого сдвига. В данной работе мы остановимся на влиянии только стационарного сдвига.

В докладе приводится краткий обзор механико-оптических эффектов в низкомолекулярных термотропных органических ЖК и экспериментальных работ, посвященных их использованию для визуализации и измерения осредненных по времени величины и направления векторов касательных напряжений. Так как работа предназначена преимущественно для экспериментаторов - аэродинамиков, для большего понимания в первой части дано введение в физические свойства ЖК.

ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕРМОТРОПНЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ В ОТСУТСТВИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В прикладной аэродинамике сформировались и совершенствуются два подхода к визуализации и измерению касательных напряжений с помощью ЖК, которые базируются на свойствах молекулярной структуры двух разновидностей ЖК, которые и будут рассмотрены далее. Это в основном термотропные нематические и холестерические ЖК, надмолекулярная структура которых показана на Рис. 1 [5].

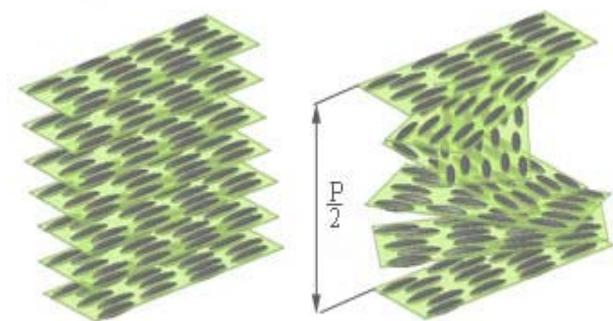


Рис.1. Структура нематических (а) и холестерических (б) жидких кристаллов

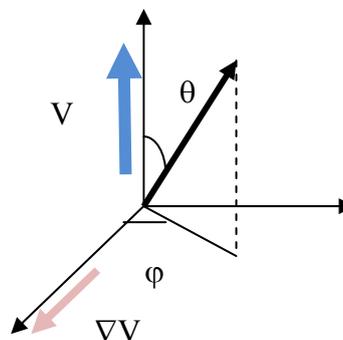


Рис. 2. Система координат для описания ориентации директора НЖК относительно векторов скорости и градиента скорости

У НЖК можно выделить преимущественное направление длинных осей молекул, называемое директором, поэтому они обладают свойствами одноосного кристалла с оптической осью параллельной директору и, в частности, двулучепреломлением и дихроизмом. Степень двулучепреломления НЖК $\Delta n = n_o - n_e = n_{||} - n_{\perp} > 0$ и составляет $\Delta n \cong 0,02 \div 0,5$. Здесь n_o и n_e - показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волны. Смешивая различные НЖК, можно варьировать Δn и этот параметр анизотропии определяет величину фазовой задержки в ориентационных эффектах.

Холестерические ЖК - это разновидность нематических ЖК, но при переходе от одного слоя к следующему директор поворачивается на небольшой угол. В результате образуется спиральная слоистая структура. Расстояние P вдоль холестерической оси, на котором директор поворачивается на 360° , носит название шага холестерической спирали. Для многих холестериков шаг спирали изменяется обратно пропорционально температуре и касательному напряжению. Если $P \rightarrow \infty$, ЖК будет обычным нематиком. Спиральная структура обладает свойством селективного отражения: если оптический путь nP совпадает с длиной волны падающего света $\lambda = nP$, то планарная текстура ХЖК выглядит окрашенной. Здесь $n = (n_o + n_e)/2$ - средний показатель преломления.

Селективное отражение имеет некоторое сходство с дифракцией Вульфа-Брегга: длина волны света λ_{max} , имеющего при интерференции максимальную интенсивность, будет подчиняться условию: $\lambda_{max} = 2nd \sin \alpha$, где $d = p/2$ - период решетки; α - угол между падающим лучом и холестерической плоскостью. При освещении белым светом перпендикулярно поверхности $\lambda_{max} \cong nP$, ширина пика селективного отражения $\Delta \lambda = P \Delta n = \lambda (\Delta n / n)$. Но в реальности в отличие от дифракции Вульфа-Брегга угловая зависимость селективного отражения из-за несовершенства образцов имеет более сложную угловую зависимость длины волны максимума селективного отражения [5] и наблюдается только один пик при нормальном падении.

ХЖК обладают свойством двулучепреломления, оптической активностью и круговым дихроизмом. ЖК фазу холестерического типа образуют не только чистые холестерики и их

смеси, но и смеси нематика с добавками, имеющими хиральные молекулы, - так называемые закрученные нематики (ХНЖК). Это дает возможность получать широкий интервал значений шага спирали в заданных температурном интервале и интервале касательных напряжений. Таким образом, в основе применений НЖК лежит параметр оптической анизотропии Δn , а для ХЖК - шаг спирали P и их зависимость от внешних факторов.

Оптические свойства ЖК проявляются только при определенной ориентации молекул в слое. Совокупность структурных деталей тонкого слоя жидкого кристалла между двумя стеклами, видимая с помощью оптического поляризационного микроскопа, называется текстурой. Каждый тип ЖК при заданной ориентации образует свои характерные текстуры, получение которых на исследуемой поверхности является важным технологическим условием применения метода визуализации [9].

Текстуры НЖК

К настоящему времени для практического использования в аэродинамике НЖК представляют интерес две текстуры: гомогенная (или планарная) и гомеотропная. Если длинные оси молекул (директор) расположены параллельно подложке, то такая текстура носит название гомогенной. Если перпендикулярно подложке, то такая текстура называется гомеотропной. Существует также промежуточный случай, когда под влиянием внешних полей ориентация длинных осей молекул НЖК будет иметь наклон относительно нормали к поверхности, разный на нижней и верхней границах слоя (так называемая твист- или супертвист структура ($\theta=\theta(z)$ и/или $\varphi=\varphi(z)$, Рис.2).

Текстуры ХЖК

Неориентированные холестерики чаще всего дают конфокальную текстуру (Рис. 3а), которая обладает сильным светорассеянием. Достаточно небольшого сдвига покровного стекла, чтобы конфокальная текстура мгновенно превратилась в планарную. В данном случае планарной также будет называться текстура, при которой директор каждого слоя лежит в плоскости препарата (как и в случае планарной текстуры НЖК). Но при этом оптическая ось ХЖК, совпадающая с осью спирали, перпендикулярна поверхности образца в отличие от планарной текстуры НЖК. Молекулы в слое ХЖК винтообразно закручены, вследствие чего он также вращает плоскость поляризации. Идеальная планарная текстура, будучи освещена белым светом, выглядит окрашенной в яркие цвета. Твист-структура (закрученный планар) дает мозаичную мраморную текстуру.

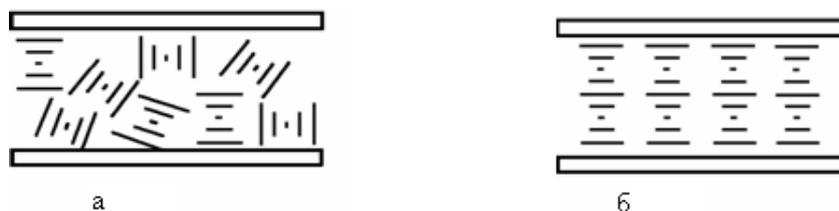


Рис. 3. Схематическое изображение текстуры ХЖК: а) конфокальная, б) планарная

В зависимости от начальной текстуры (граничных условий) в тонком ЖК слое наблюдаются эффекты, на которых построены экспериментальные процедуры измерения касательных напряжений.

Вязко-упругие свойства ЖК

Динамические характеристики и рабочий диапазон касательных напряжений для ЖК индикатора сдвига зависят от вязко-упругих свойств ЖК [13, 14].

Известно, что в изотропной фазе вязкость ЖК характеризуется одним коэффициентом вязкости, который не зависит от скорости сдвига и может быть измерен с помощью вискозиметрических методов. ЖК могут проявлять как ньютоновское поведение, так и неньютоновское [15]. При определенных условиях их вязкость зависит от скорости сдвига, как у неньютоновской жидкости, причем с увеличением скорости сдвига она уменьшается.

В мезофазе НЖК вводится несколько коэффициентов вязкости, зависящих от ориентации директора. В данном случае из-за необходимости контролировать направление ориентации молекул обычные вискозиметрические методы, основанные на использовании капилляров, падающих шаров, вращающихся цилиндров практически не пригодны. Эффективная (кажущаяся) вязкость НЖК при фиксированном направлении директора (произвольные азимутальный φ и полярный θ углы) равна

$$\eta_{\text{эфф}} = (\eta_1 + \eta_{12} \cos^2 \theta) \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \eta_2 \cos^2 \theta + \eta_3 \sin^2 \theta \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

здесь η_1, η_2 и η_3 – коэффициенты вязкости Месовича, которые вводятся при описании одномерного течения НЖК при постоянном градиенте скорости (постоянной скоростью сдвига) и при фиксированной ориентации директора, для трех следующих случаев, [13,14]:

- директор параллелен направлению градиента скорости течения $n \parallel \text{grad} V$ ($\varphi=0, \theta=90^\circ, \eta=\eta_1$);
- директор параллелен направлению скорости течения $n \parallel V$ ($\varphi=0, \theta=0^\circ, \eta=\eta_2$);
- директор перпендикулярен плоскости сдвига, в которой лежат векторы скорости и градиента скорости (направлению градиента скорости течения $n \perp \text{grad} V \perp V$ ($\varphi=90^\circ, \theta=90^\circ, \eta=\eta_3$)).

$\eta_1 > \eta_3 > \eta_2 > 0$, т.е. минимальная вязкость реализуется в течении с директором параллельным вектору скорости. η_2 и η_3 соответствуют трансляционному движению, η_{12} – коэффициент вязкости растяжения.

Если вязкость измеряется без контроля ориентации, то при температуре много меньше температуры просветления можно считать, что измеряется η_2 . При приближении к температуре просветления измеряемый коэффициент вязкости будет иметь промежуточное значение между коэффициентом динамической вязкости η_1 и η_2 [13]. При температуре выше точки просветления коэффициентом динамической вязкости $\eta_1 \approx \eta_{\text{эфф}}$, что указывает на ньютоновские свойства расплава.

Если ориентация директора не фиксирована, то его собственное движение учитывается введением коэффициентов вязкости γ_1 и γ_2 / γ_1 называется коэффициентом вращательной вязкости, он описывает вязкость, когда возможен только поворот и отсутствует трансляционное движение ЖК. А γ_2 – вращательно-сдвиговая вязкость описывает движение в более общем случае при наличии поворота директора и движения (переноса масс) ЖК.

Гидродинамика ХЖК значительно отличается от НЖК. Кажущаяся вязкость ХЖК возрастает почти в миллион раз, когда градиент скорости в капилляре падает до очень малых значений [16]. У ХЖК величина максимума вязкости зависит не только от скорости сдвига, но и от времени действия сдвиговых напряжений, причем с течением времени вязкость уменьшается.

Для диагностики потоков с помощью оптических эффектов НЖК нужна высокая чувствительностью локального поля директора НЖК к малым изменениям внешнего воздействия. В соответствии с континуальной теорией упругости НЖК в отсутствие течений любую деформацию в жидком кристалле можно представить как одну из трех допустимых в ЖК видов независимых изгибных деформаций либо как комбинацию этих трех видов деформации. Такими деформациями являются продольный изгиб (В-деформация), поперечный изгиб (S-деформация) и кручение (Т-деформация) [18]. При этом под деформацией в ЖК подразумевается отклонения направления директора от равновесного направления. Соответствующих модулей упругости в ЖК по числу главных деформаций тоже три – k_{11}, k_{22} и k_{33} . Известно, что равновесная структура распределения ориентации директора существенно зависит от отношения констант упругости k_{33}/k_{11} [19].

Оно фактически определяет оптические и электрические свойства слоев НЖК. Типичные значения $0,5 < k_{33}/k_{11} < 3,0$ и $0,5 < k_{22}/k_{11} < 0,8$. Типичное значение констант упругости k_{11} (мода поперечного изгиба) и k_{33} (мода продольного изгиба для деформации директора в слое ЖК с однородной ориентацией, перехода Фредерикса) имеет порядок $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ дин (10^{-11} Н) [19]. Уменьшение модулей упругости НЖК приводит к повышению их чувствительности к внешним воздействиям.

Для применения в аэродинамике помимо определенной исходной ориентации молекул ЖК необходимо также выполнение условия прилипания на исследуемой поверхности. В этом случае трансляционное движение молекул НЖК (обычно сопровождающееся вращением директора) исключается и остается только изменение угла ориентации директора относительно скорости потока и градиента скорости. Известно, что кинетика всех оптических эффектов, обусловленных только переориентацией директора, определяется одним и тем же коэффициентом вращательной вязкости $\gamma_1 = \alpha_3 \cdot \alpha_2$, представляющего собой комбинацию коэффициентов Лесли α_3 и α_2 , называемыми также коэффициентами кручения в градиенте скорости [17]. В прикладной аэродинамике влияние локальной температуры на γ_1 и оптический отклик необходимо или учитывать при калибровке ЖК или исключить при постановке эксперимента. Если условие прилипания не выполняется, то возникает задача ориентационной устойчивости НЖК под воздействием возмущений гидродинамической скорости. Поэтому далее будут рассматриваться только ориентационные эффекты при условии прилипания.

Влияние механического сдвига на оптические свойства НЖК. Ориентационные (сдвиговые) эффекты и методы диагностики пристенных течений на их основе

Переориентация молекул НЖК под влиянием механического сдвига вызывает изменение их оптических свойств (двулучепреломления, оптической активности, и др.).

Особенно хорошо изучены ориентационные эффекты НЖК, обусловленные влиянием магнитного и электрического полей, так называемые полевые эффекты [17]. В работе [20] обсуждается аналогия между ориентационными эффектами, индуцированными внешними магнитными полями и течением для случая статических деформаций и приводятся примеры, иллюстрирующие данную аналогию, которая помогает лучше понять физику влияния механического сдвига.

В зависимости от граничных условий и взаимной ориентации векторов скорости V и градиента скорости $\text{grad } V$ набегающего потока газа относительно оптической оси слоя НЖК могут быть реализованы различные геометрии аэродинамического эксперимента. В литературе по прикладной аэродинамике используются некоторые из них. На Рис 4. представлены схемы течения и определяющие вязко-упругие характеристики. Рассмотрим 2 из трех представленных на схеме случая для одномерного плоского течения в пограничном слое на поверхности модели и соответствующие им оптические эффекты:

-директор n перпендикулярен поверхности исследуемой модели, $n \perp V$, $n \parallel \text{grad } V$ (Рис. 4а)

-директор n параллелен поверхности модели, $n \perp V$, $n \perp \text{grad } V$ (Рис. 4с)

Геометрия 1. Эффект изменения двойного лучепреломления при переориентации НЖК:

Рассмотрим эффект, который возникает при сдвиговой деформации НЖК с гомеотропной текстурой (Рис. 4а). Гомеотропный образец НЖК, в котором оптические оси молекул ориентированы перпендикулярно поверхности, на которую они нанесены, 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 двулучепреломления. При деформации ЖК под влиянием потока (в данном случае деформация продольного изгиба, В-деформация), свет падает

наклонно к оптической оси, возникает двойное лучепреломление. Образец просветляется при освещении монохроматическим светом или окрашивается при освещении белым светом [21].

При S- и В- деформациях происходит изменение двулучепреломления ЖК слоя, так как оно зависит от изменения показателя преломления необыкновенного луча в направлении нормали к поверхности (по толщине слоя).

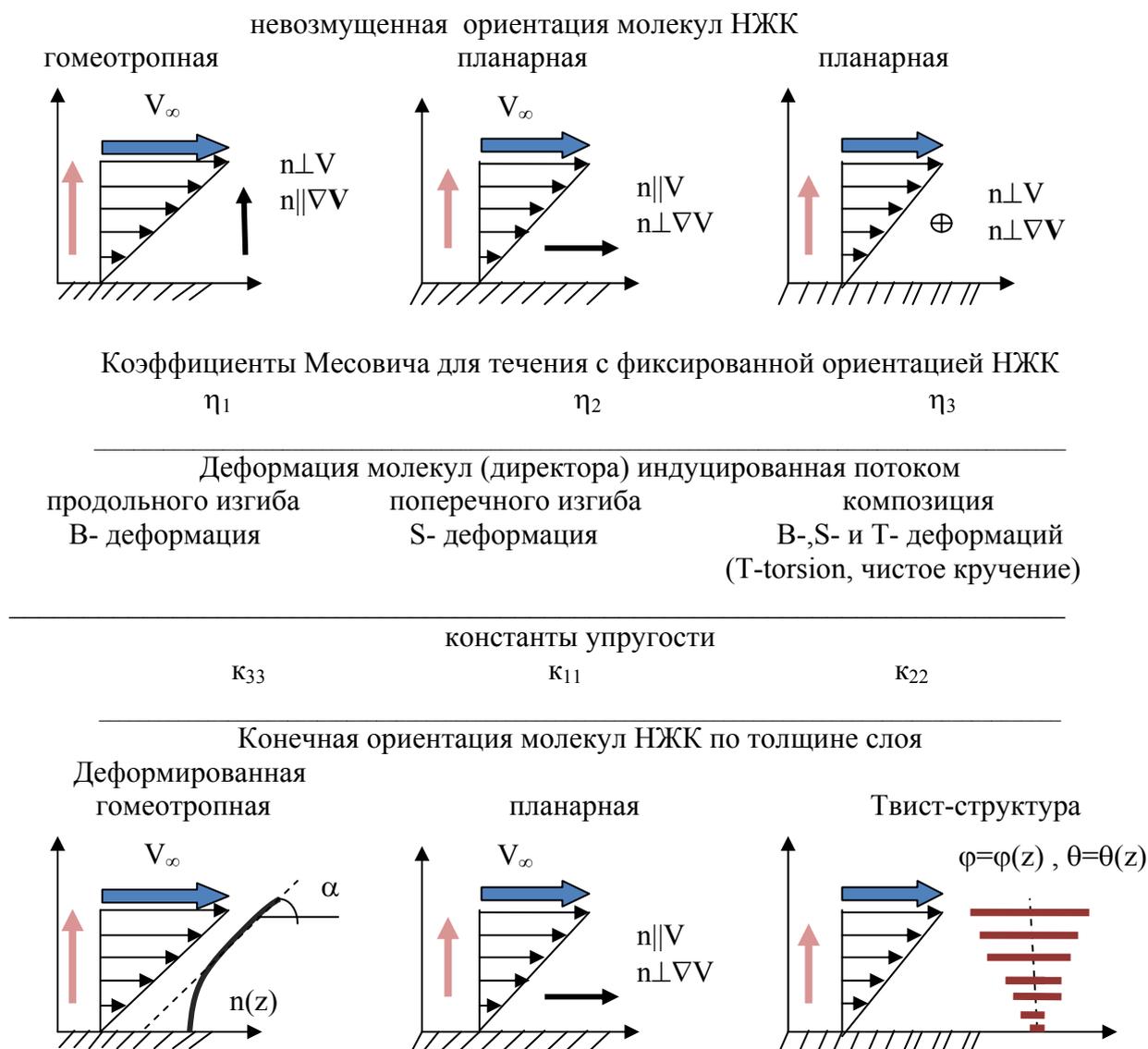


Рис. 4 Взаимная ориентации директора и возмущающего (стационарного) механического воздействия

Теоретические и численные исследования геометрии 1

В работе [22] приводится анализ изменения характеристик тонкой пленки НЖК и зондирующего пучка света под влиянием сдвига индуцированного стационарным ламинарным потоком (Рис.4а). Продемонстрировано влияние граничных условий для НЖК (угла ориентации директора θ относительно поверхности) на примере зависимости кажущейся вязкости η_a от параметра течения в слое (расхода) $Q = \int_0^L V(z) dz$ (L - толщина слоя ЖК) в диапазоне $Q = 10^{-4} \div 1 \text{ см}^2/\text{с}$. Максимальное изменение кажущейся вязкости η_a при увеличении расхода Q соответствует случаю переориентации из гомеотропной исходной ориентации НЖК. Показано влияние параметра течения Q на распределение угла переориентации директора θ и скорости по толщине слоя НЖК. Для исходной гомеотропной ориентации директора НЖК и типичных значений показателя преломления НЖК получена

зависимость фазового сдвига зондирующей прошедшей необыкновенной волны $\Delta\psi$ при переориентации потоком для случая нормального падения света от параметра $Q=10^{-4} \div 1$ см²/с. Из полученной зависимости $\Delta\psi(Q)$ видна высокая чувствительность сдвига фаз к минимальным изменениям расхода Q . Предложена принципиальная схема измерений с использованием данной зависимости $\Delta\psi(Q)$, требующая знания толщины слоя ЖК L , которая, в свою очередь, может быть определена по измерениям в двух точках, как в методе масляной пленки [23].

Известно [24], что для S - и B -эффектов фазовая задержка (разность хода между обыкновенным и необыкновенным лучами с длиной волны λ)

$$\Delta\psi = 2\pi d\Delta n/\lambda,$$

а интенсивность монохроматического линейно поляризованного света прошедшего через систему «поляризатор-НЖК-анализатор»

$I \sim I_0 \sin^2\beta \sin^2(\Delta\psi/2)$, где $\beta = \angle(P \wedge n)$ - угол между вектором поляризации падающего света и директором.

Согласно этой формуле интенсивность света, прошедшего через систему «поляризатор-НЖК-анализатор» осциллирует. Экспериментальная качественная проверка работоспособности этого физического эффекта (геометрия 1) проводилась в условиях ударной трубы ИТПМ. Получено, что в зависимости от амплитуды деформации и фазовой задержки, интенсивность света на выходе из слоя ЖК осциллирует, что согласуется с теорией. Это не очень удобно при практическом использовании данного эффекта. В то же время из электрооптики известно, что так называемый В-эффект является пороговым и для него характерен очень крутой рост сигнала интенсивности с ярко выраженной полкой I_{\max} [17]. Учитывая возможную аналогию с электрооптикой, можно предположить, что зависимость времени включения эффекта (времени воздействия потока до появления эффекта) или максимального уровня сигнала интенсивности от сдвига может быть использована для калибровки касательных напряжений. Необходимы экспериментальные исследования.

Одной из трудностей применения на практике в аэродинамике рассмотренного механо-оптического эффекта является необходимость формирования тонкого слоя НЖК с гомеотропной ориентацией директора на твердой подложке и со свободной верхней границей. Обычно такая ориентация ЖК формируется между двух опорных поверхностей. Кроме того, подложка должна быть прозрачной и изотропной, поскольку даже слабая искусственная анизотропия в материалах обычно изотропных внесет погрешность в измерения. Поэтому представляет интерес рассмотреть случай гомогенной (планарной) геометрии, при которой директор ортогонален как направлению потока, так и градиенту скорости. Такую ориентацию можно создать на твердой поверхности со свободной верхней поверхностью.

Геометрия 2. Эффект закручивания планарной текстуры НЖК (изменения удельного вращения плоскости поляризации света).

Если направление осей молекул НЖК, изначально ориентировано планарно, (перпендикулярно направлению сдвиговой деформации), то под влиянием потока планарная текстура переходит в закрученную твист-структуру (Рис. 4с) [25]. В результате такой переориентации изменяется оптическая активность, возникает эффект вращения плоскости поляризации света и интенсивность света, как отраженного от ЖК покрытия достаточной толщины, так и проходящего, изменяется. Оптический отклик зависит от приложенного напряжения сдвига, времени воздействия, вязкости ЖК, коэффициента двойного лучепреломления.

Перанский и Гийон [26] подробно исследовали простое сдвиговое течение НЖК в ламинарном режиме. Оптическая ось ЖК нормальна скорости течения и градиенту скорости (Рис. 4с). Обнаружено, что эффект наблюдается лишь при превышении некоторой пороговой

скорости сдвига, которая обратно - пропорциональна толщине образца. Если приложено стабилизирующее поле пороговая скорость увеличивается. Свыше некоторого поля меняется природа неустойчивости - появляется картина роллов, в среднем параллельных линиям тока. Эти эффекты объясняются в рамках уравнений Эриксона-Лесли – Пароди, описывающих связь между ориентацией и течением в НЖК.

Теоретическое рассмотрение возможности использования оптического отклика НЖК на стационарную сдвиговую деформацию в геометрии, показанной на Рис. 4с, выполнено в [27,28] в одноконстантном приближении. В отличие от случая 4а деформация директора уже не происходит в одной плоскости, для описания переориентации молекул НЖК необходимо рассматривать 2 угла, полярный и азимутальный. Воздействие потока приводит к возникновению так называемой твист-структуры с характерной толщиной переходного слоя, зависящей от величины градиента скорости. Получено 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. Показано, что при малом градиенте скорости (или скорости верхней границы слоя) переориентация будет проходить слабо $\varphi \approx 0$ и $\eta \approx \eta_3$ (случай 4в - конечная планарная ориентация), а при больших скоростях $\varphi = \pi/2$ и $\eta \approx \eta_2$ (случай 4б, конечная планарная ориентация, течение Пуазейля с установившимся полярным углом θ_0 ($\tan^2 \theta_0 = \alpha_3/\alpha_2$)). Рассматривается один из возможных подходов к технической реализации измерений с использованием интенсивностей пучков прошедшего слой света разной поляризации.

Аэродинамический эксперимент в геометрии 2 описан в работе [28]. В скрещенных поляризаторах фотоприемником регистрировался сигнал, отраженный от поверхности НЖК под углом 30° к нормали к поверхности (При освещении под углом 30°). Пластина была предварительно обработана ПВА для получения бороздок и планарной начальной ориентации НЖК. Измерения проводились при малых дозвуковых скоростях потока. Установлено, что при постоянной скорости потока в течение 3 мин отклик НЖК также оказался постоянным. При уменьшении скорости потока от 5,5 м/с до 1,4 м/с, сигнал интенсивности отклика НЖК также уменьшался. В данной работе экспериментально показано, что оптический отклик слоя НЖК (нормированный на оптический отклик невозмущенного НЖК) под действием потока воздуха в некотором интервале скоростей однозначно определяет тангенциальное напряжение в точке на обдуваемой поверхности.

Анализ зарубежных публикаций показал, что зависимость отклика НЖК с описанной геометрией от сдвига изучалась также в [29-31]. Изучению чувствительности НЖК к направлению приложенного вектора сдвига посвящены более поздние работы этих авторов, в которых также предложена и протестирована экспериментально упрощенная модель динамики переориентации директора НЖК. 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 ПВА, по которому с помощью вельвета наносились бороздки. Динамика и стационарный оптический отклик НЖК измерялись в проходящем поляризованном монохроматическом свете. Измерения осуществлялись как в режиме регистрации интенсивности проходящего света, так и отраженного при низких уровнях касательных напряжений от 0,05 до 0,31 Па. Использовалось освещение с помощью кварцевой лампы через матовую бумагу и фильтр 670 нм. Для использованных НЖК получены времена релаксации, которые изменялись от 0,73 с до 1,37 с при увеличении сдвига от 0,05 до 0,31 Па. Это позволяет использовать метод в экспериментах длительностью несколько секунд. Обсуждаются возможности и недостатки предложенной математической модели. Авторы пришли к выводу, что НЖК могут быть использованы для измерения как величины, так и направления вектора касательного напряжения. Предложены 2 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.

К настоящему времени наибольшее распространение и наиболее изученным экспериментально в прикладной аэродинамике оказался второй подход с использованием закрученных (хиральных) НЖК и ХЖК. В отличие от первого использующего монохроматическую информацию, данный подход называется еще цветовым.

Механо-оптические эффекты в ХЖК и методы диагностики касательных напряжений на их основе

В зависимости от исходной ориентации ХЖК на поверхности (планарная или конфокальная текстуры) при механической деформации под влиянием потока в ХЖК наблюдаются следующие оптические эффекты.

Эффект текстурного перехода из конфокальной текстуры в планарную

Первый эффект характерный для ХЖК - это, так называемый, текстурный переход. Исходную конфокальную текстуру можно сформировать методом напыления раствора ХЖК на исследуемую поверхность, или путем нанесения расплава ХЖК кистью с последующим охлаждением. При этом на поверхности образуется слой ХЖК с неоднородной ориентацией молекул, у которого селективное отражение света отсутствует. Под влиянием воздушного потока происходит упорядочение ориентации, и возникает планарная спиральная текстура, селективно рассеивающая свет. Время текстурного перехода зависит от величины касательного напряжения и регистрируется по изменению состояния поверхности из бесцветного на цветное.

В числе первых экспериментальных работ, посвященных применению эффекта текстурного перехода в ХЖК для измерения касательных напряжений, были работы [32,33]. В [33] метод использовался для визуализации и измерения распределения касательных напряжений на модели плоской пластины при скоростях потока 33,5 и 36,5 м/с в трубе периодического действия. Диапазон измеренных касательных напряжений $\tau \approx 2,5-4$ Па. Выполнено сравнение с расчетными данными. Отмечается, что вначале текстурный переход происходит в областях с самым высоким уровнем касательных напряжений. Затем постепенно окрашиваются участки с более низкими τ . Условие прилипания также нарушается раньше в областях с высокими касательными напряжениями, где ЖК начинает течь. Высказывается предположение, что из-за этого на участках с большими отрицательными градиентами касательных напряжений в направлении потока, текущие ЖК могут маскировать участки с низкими τ , где еще сохранилась конфокальная текстура.

Описанный эффект текстурного перехода обладает «памятью»: полученная картина распределения максимальных уровней τ сохраняется продолжительное время. Поэтому данный эффект может применяться для визуализации в каналах без оптического доступа. Ранее авторами метод текстурного перехода ХЖК успешно применялся для визуализации структуры пристенного течения в канале теплообменника с гофрированными стенками [34]. На Рис. 5 для сравнения показаны визуализация поля температур с помощью ЖК (Рис.5а), линий тока (Рис. 5б) и визуализация касательного напряжения (Рис.5с), полученная методом текстурного перехода в ЖК на поверхности гофрированной пластины. В [35] описан способ устранения «памяти» с помощью добавки в ХЖК аэросила.

Важно также, что угловая зависимость селективного отражения у планарной текстуры ХЖК, полученной таким способом отсутствует (Рис. 6).

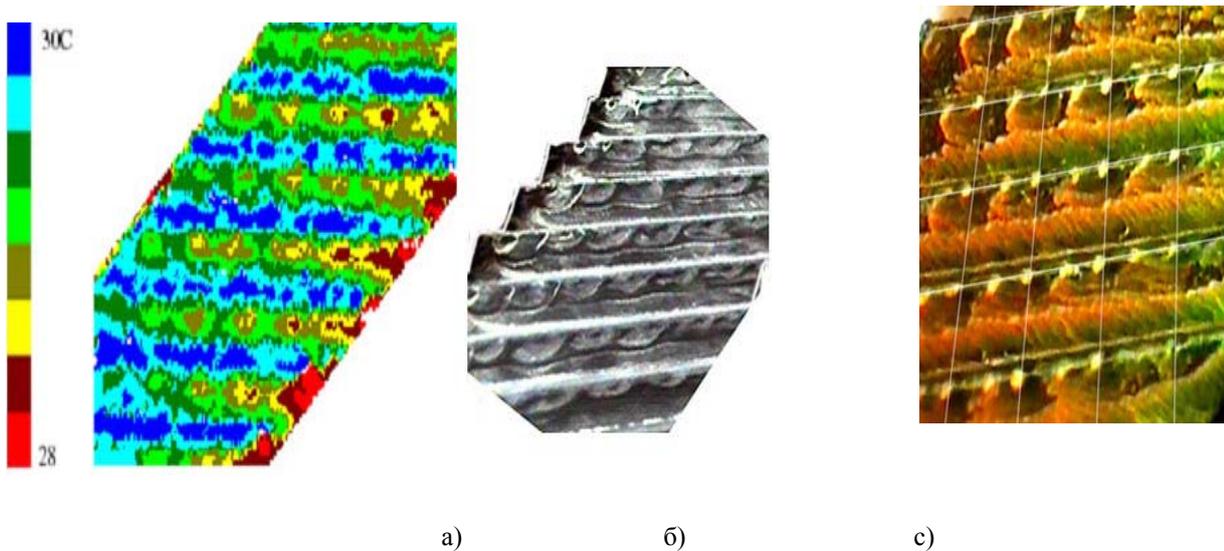


Рис. 5.



Рис.6. Отсутствие угловой зависимости у планарной текстуры, полученной с помощью текстурного перехода

Эффект смещения пика селективного отражения планарной текстуры под влиянием сдвига (голубой сдвиг)

Рассмотрим второй эффект, наблюдаемый в ХЖК под воздействием сдвига. Влияние механического сдвига на оптические свойства планарно ориентированных ХЖК было исследовано многими авторами, например [36-38], причем одни авторы исследовали влияние скорости сдвига ($\text{shear rate } \dot{\gamma}[\text{c}^{-1}]$), другие - влияние касательного напряжения ($\text{shear stress } \tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}^n[\text{Па}]$) или скорости набегающего потока в течении Куэтта.

В первом случае, например, в [36] для получения сдвиговой деформации использовался принцип ротационных вискозиметров. Деформируемый материал находился в зазоре между измерительными поверхностями. Использование прибора «диск-диск», характеризующегося наличием двух параллельных плоскостей, одна из которых вращается, позволяет иметь при постоянной скорости вращения различные скорости сдвига в радиальном направлении. Деформация ХЖК, вызываемая сдвигом, сопровождается текстурными изменениями. Было показано, что холестерическая спираль реагирует на сдвиг как жесткий стержень, наклоняющийся при сдвиге (сдвиг перпендикулярен оси спирали) со слабым разрушением (Рис.7). При сдвиге тонкого слоя ХЖК многих исследованных смесей длина волны отраженного света смещалась в синюю область спектра. Это объясняется изменением наклона оси спирали по отношению к направлению сдвига, что приводит к изменению угла между направлениями падающего и отраженного лучей и уменьшению длины волны отраженного света.

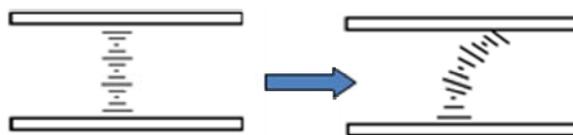


Рис.7. Влияние механического сдвига на планарную текстуру ЖК: совершенная планарная текстура (слева); деформированная планарная текстура (справа).

Однако существуют данные, показывающие, что при некоторых условиях под влиянием сдвига цвет ЖК может сдвигаться и в красную область [8]. Объяснение основывалось на предположении, что при сдвиге отдельные молекулярные слои ЖК могут быть подвержены силам вращательного момента, которые выстраивают их параллельно направлению сдвига. Это приводит к раскручиванию спирали, что сопровождается сдвигом длины волны отраженного света в красную область. Вероятно, что оба эффекта могут существовать и зависят они от состава используемых жидких кристаллов. Некоторыми авторами, начиная с Клейна [8], была получена неоднозначная зависимость максимума длины волны селективного отражения от скорости сдвига [8, 38]. Ранее в ИТПМ рассматриваемый эффект изучался на смеси жидких кристаллов, содержащих эфиры холестерина и ряда жирных кислот [38,39]. Исследовалась зависимость спектральных характеристик различных составов ЖК при углах наблюдения и освещения близких к нормали к исследуемой поверхности от скорости сдвиговой деформации γ . Показано, что с увеличением скорости сдвига спектр селективного отражения расширяется, интенсивность отраженного сигнала уменьшается, вначале с увеличением скорости сдвига наблюдался голубой сдвиг, но после некоторого критического уровня вновь происходило увеличение λ мах (красный сдвиг). Такое же явление наблюдал Пармар [40] и авторы данной статьи. Визуальные наблюдения показали, что, начиная с точки перегиба ЖК, теряет устойчивость и начинается течение. То же было установлено и Пармаром с помощью микрофотографий слоя при разных сдвиговых нагрузках. Поскольку изучение влияния граничных условий (прилипание/скольжение) вне рамок данной статьи, отметим только, что как и у ЖК индикаторов температуры, у ЖК индикаторов сдвига имеется рабочий диапазон, который определяется при калибровке.

Пожалуй, наибольший вклад в развитие метода количественного измерения трения методом ЖК в серии работ Reda D.C. с коллегами [41]. Представленный в [41] метод позволяет определить величину и направление вектора касательного напряжения в каждой точке поверхности. Информация о распределении вектора касательного напряжения получается по зарегистрированным колориметрическим данным. Приводится описание калибровочного устройства. Для калибровки цветового отклика ЖК в данном патенте используется касательное напряжение известной относительной величины и направления, создаваемое с помощью круглой струи ориентированной вдоль поверхности. Относительное изменение давления в струе определяет относительное изменение уровня касательного напряжения (τ/τ_r), где индекс r обозначает некоторый произвольный опорный минимальный уровень. Для определения направления вектора сдвига в точке и построения карты векторов данным методом необходима синхронная регистрация изображения при нескольких угловых положениях относительно вектора сдвига (минимум в двух – вдоль вектора сдвига и против). Верификация метода производится путем сравнительного анализа с результатами измерений альтернативными способами, а также с теоретическими и численными оценками. Панорамные методы сравниваются с дискретными измерениями в отдельных точках.

В [42] представлены данные методических и калибровочных измерений механо-оптических характеристик ЖК составов, разработанных в ИТПМ, которые демонстрируют принципиальную возможность получения количественных данных с помощью цветового подхода и исследованных ЖК материалов. На Рис.8 показан пример сдвига спектра

селективного отражения одной из смесей ХЖК в область меньших длин волн после воздействия потока. Влияние сдвига на угловую зависимость селективного отражения показано на Рис.9.

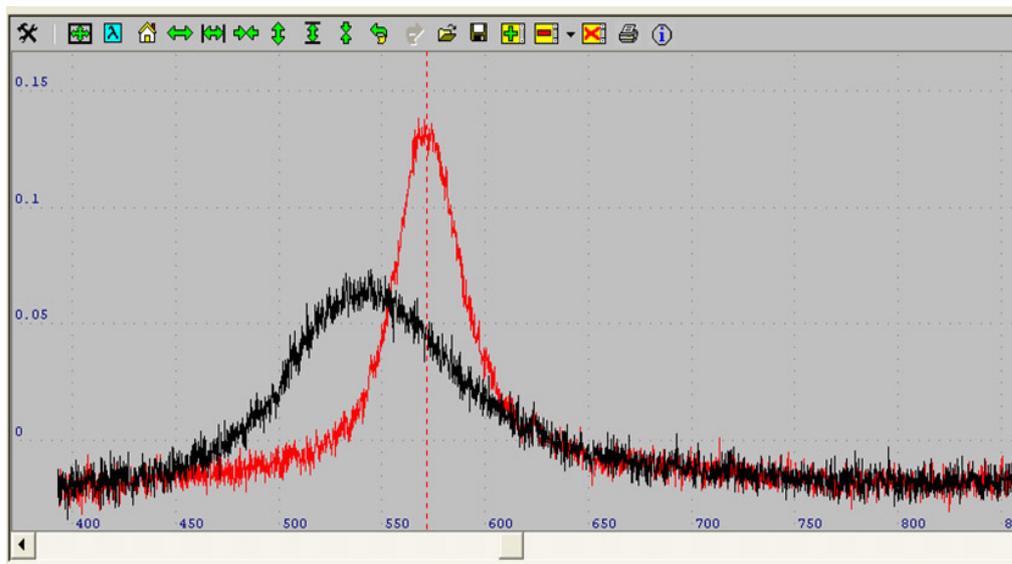


Рис. 8 Пример голубого сдвига спектра после воздействия потока.

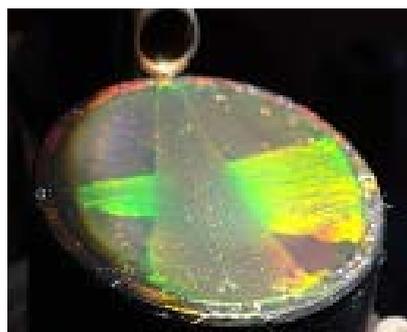
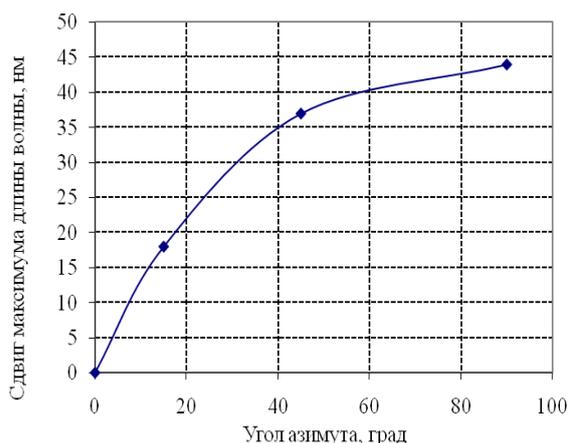


Рис. 9. Угловая зависимость спектра селективного отражения планарной текстуры ХЖК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных и теоретических данных, опубликованных в открытой печати, показал, что оптический отклик, связанный с перестройкой текстуры НЖК и ХЖК может служить диагностическим инструментом для визуализации поверхностного распределения осредненных касательных напряжений. В то же время для верификации методики и получения количественных данных требуются дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента. Ч.2. Методы и средства аэрофизических измерений. Новосибирск. Изд-во НГТУ. 2007.456 с.
2. Мошаров В.Е., Радченко В.Н. Новый метод визуализации течений на поверхности аэродинамических моделей/ Датчики и системы, 2010, №5, с.48-53
3. Zharkova G.M. Optical phenomena in liquid crystals and their application in aerophysical studies. LaserTechnology, V.32, N6, 2000.

4. **Naughton J.V., Sheplak M.** Modern developments in shear-stress measurement. Progress in aerospace sciences, 2002, 38, P. 515-570
5. **Жаркова Г.М., Сонин А.С.** Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука Сиб.отд-ние, 1994. 214 с
6. **G.M. Zharkova, B.Yu. Zanin, V.N. Kovrizhina and A.P. Brylyakov** Free Stream Turbulence Effect on the Flow Structure over the Finite Span Straight Wing. /*J. of visualization. Japan*, V. 5, No 2, p. 169-176, 2002
7. **Klein, E. J.**, "Liquid Crystals in Aerodynamic Testing," *Astronautics and Aeronautics*, Vol. 6, July 1968, pp. 70-73.
8. **Klein E.J., Margozzi A.P** Exploratory investigation of the measurement of skin friction by means of Liquid crystals // *Israel J. of Technology*. 1969, V. 7, No. 1-2, p. 173-180
9. **Klein E.J., Margozzi A.P.** Apparatus for the calibration of shear-sensitive liquid crystals. *Rev Sci Instrum* 1970, 41, P.:238–239.
10. **Аэро Э.Л.** Новые эффекты при сжатии и сдвиге нематических жидких кристаллов в слоях с наклонной граничной ориентацией. *Кристаллография*. 1996, т. 41, №1, с. 9-16.
- 11 **Pollmann P., Stegemeyer H.** Pressure dependence of the helical structure of cholesteric mesophases/ *Chem. Phys. Lett.*, V.20, N1,1973, p. 87-89.
- 12 **Жаркова Г.М.** Развитие жидкокристаллической термографии применительно к задачам теплообмена. Дисс. на соиск. уч.ст. д.т.н., Новосибирск, 1988
- 13 **В. Де Же.** Физические свойства жидко-кристаллических веществ. М. Мир. 1982
14. **Беляев В.В.** Физические методы измерения коэффициентов вязкости нематических жидких кристаллов./ *УФН*, март 2001, т. 171, №3, с 267-298
15. **Pochan J.M., Erhardt P.F.** Shear-induced texture changes in cholesteric liquid crystal mixtures. *Phys. Rev. Lett.* V.27, N.12, 1971.
16. **Чандрасекар С.** Жидкие кристаллы. М., Мир. 1980, 344 с.
17. **Блинов А.М.** Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М. Наука, 1978, 384 с.
18. **Томилин М.Г., Пестов С.М.** Свойства жидкокристаллических материалов. Спб. Политехника. 2005, 296 с.
19. **Гребенкин М.Ф., Иващенко А.В.** Жидкокристаллические материалы. М. : Химия. 1989, 288 с.
20. **Derfel G.** On the analogy between the field-induced and flow-induced deformations in nematic liquid crystals/ *Liquid crystals*, 1998, Vol.24.No.6, 829-834.
21. **Ландсберг Г.С.** Оптика. М. Гос.изд-во техн.-теор. литер., 1954
- 22 **Жаркова Г.М., Преображенский Н.Г., Трашкеев С.И.** Динамика поведения нематических пленок в гидродинамических потоках. // *ПМТФ*.-1992.-№6.с. 64-67
- 23 **L.H. Tanner, L.G. Blows** A study of the motion of oil film on surface in air flow with application to the measurement of skin friction. *J. Phys. E.* 9. 1976.
- 24 **Жидкие кристаллы.** Под ред. С.И. Жданова, М. Химия. 1979, 328 с.
- 25 **Derfel G.** Modelling of the simple shear flow of a flow-aligning nematic. *Liquid crystal*, 1997, Vol. 23, No.5, 741-748
26. **Pieransky P., Guyon E.** Instability of certain shear flows in nematic liquids. *Phys. Rev. A*,V.9, N1, 1974, p.404-417
27. **Жаркова Г.М., Трашкеев С.И.**Сдвиговое течение нематического жидкого кристалла в газодинамической потоке и его оптическая регистрация.// *ПМТФ*.- 1994; т.35.-N.5. С.60-68.
28. **Коротаев В.М.,Трашкеев С.И., Жаркова Г.М.** Оптический отклик слоя нематического жидкого кристалла на воздействие потока воздуха. *ПМТФ*.- 1998; т.39.-N.4.- С.569-575.
29. **Buttsworth D.R., Elston S.J., Jones T.V.** (1998) Direct full surface skin friction measurement using nematic liquid crystal techniques. *J Turbomach* 120:847–853
30. **Buttsworth D.R., Elston S.J., Jones T.V.** Directional sensitivity of skin friction measurements using nematic liquid crystals. *Meas Sci Tech* 9 :1856–65
31. **Buttsworth D.R., Elston S.J., Jones T.V.** Skin friction measurements on reflective surfaces using nematic liquid crystals. *Exp. In Fluids*, Vol.28, No.1, P.64-73, 2000.

32. **Bonnett P., Jones T. V., McDonnell D. G.** Shear-stress measurement in aerodynamic testing using cholesteric liquid crystals. *Liquid Crystals*, 1366-5855, Volume 6, Issue 3, 1989, P. 271 – 280
33. **Mee D.G., Walton T.W., Harrison S.B., Jones T.V.** Comparison of liquid crystal techniques for transition detection. 29th Aerospace sciences meeting, Jan.7-10, 1991, Reno, Nevada, AIAA91-0082.
34. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Khachaturyan V.M.** A Study of the Flow Structure in the Near-wall Region of a Complex-chaped Channel using Liquid Crystals. - in *Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow*, Ed by C. Greated, J. Cosgrove, J.M. Buick, Trowbridge, UK, p. 143-150, 2002.
35. UK Patent GB2218215
36. **Giliberty D.F. Dixon G.D.** Shear effects on cholesteric liquid crystals / *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 1973. V. 20. P. 27-36.
37. **Marsh D.G., Pochan J. M.** Mechanism of shear –induced structural changes in liquid –crystal-cholesteric –nematic mixtures// *J.Chem.Phys.* 1973 V.58. №7 p. 2835-2839.
38. **Жаркова Г.М., Востоков Л.А.** Влияние механического сдвига на холестерические жидкие кристаллы. 1978. Отчет ИТПМ №977.
39. **Zharkova G.M., Khachaturyan V.M., Vostokov L.A.** Study of liquid crystals thermoindicators. *Advances in liquid crystal, research and applications*. Ed. by Bata ,Butapest: Pergamon Press, Oxford, Acad.Kiado, 1980, 1221-1239.
40. **Parmar, D. S.,** "A Novel Technique for Response Function Determination of Shear Sensitive Cholesteric Liquid Crystals for Boundary Layer Investigations," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 62, No. 6, June 1991, pp. 1596-1608
41. **Reda D.C., Muratore J.J.** Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings *AIAA J.* 1994, 32, p.1576-82
42. **Zharkova G.M., Kovrizhina V.N., Petrov A.P.** Experimental study of thin-film liquid crystal coatings for panoramic diagnostics of shear stress distribution on the model surface/ XV ICMAR, International conference on the methods of aerophysical research, Novosibirsk, Russia, p.253-254.

G.M. Zharkova, V.N. Kovrizhina

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

MECHANICO-OPTICAL EFFECTS IN LIQUID CRYSTALS AND TECHNIQUES OF ITS APPLICATION FOR FLOWS STUDY

In the paper physical and optical properties of thermocromic liquid crystals for wall shear stress visualization are briefly described. The short review of experimental techniques for measurement of magnitude and direction of shear stress vector is presented. Some examples of application of shear stress sensitive liquid crystals developed at ITAM are shown.

SHEAR STRESSES, LIQUID CRYSTALS, ORIENTATIONAL EFFECTS, VISUALIZATION, MEASUREMENTS