

УДК 533.6.071.3+532.783

Г. М. Жаркова, В. Н. Коврижина, А. П. Петров

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СДВИГА
НА ОТРАЖЕНИЕ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА
ЗАКРУЧЕННЫМ НЕМАТИКОМ**

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

В работе рассматривается эффект вращения плоскости поляризации света слоем нематических жидких кристаллов, закрученных потоком. Приводятся результаты измерений оптического отклика ЖК при разных уровнях касательного напряжения. Показано, что нематик ЖК1289 обладает заметной чувствительностью к сдвигу, которая может быть использована для построения методов диагностики распределения касательных напряжений в аэродинамическом эксперименте.

Ключевые слова: нематические жидкие кристаллы, касательное напряжение, оптический отклик, аэродинамический эксперимент.

G. M. Zharkova, V. N. Kovrizhina, A. P. Petrov

**EFFECT OF MECHANICAL SHEAR ON REFLECTION
OF LINEARLY POLARIZED LIGHT BY TWISTED NEMATIC**

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Institutskaya st., 4/1, 630090 Novosibirsk, Russia. E-mail : zharkova@itam.nsc.ru

The effect of the light polarization plane rotation by nematic liquid crystals under the air flow is studied. The results of LC optical response at different levels of shear stress measurements are given. It was obtained that nematic LC1289 is characterized by the perceptible shear sensitivity, which may be applied for development of techniques for shear stress diagnostics in aero dynamical experiment.

Key words: nematic liquid crystals, shear stresses, optical response, aero-dynamical experiment.

Введение

Несмотря на прогресс современной измерительной техники в экспериментальной аэродинамике, разработка панорамных методов измерения поверхностного трения, основанных на оптических эффектах в жидких кристаллах, продолжает привлекать внимание. Известно, что спектр отражения тонкопленочных холестерических жидких кристаллов (ХЖК) может изменяться под влиянием механического сдвига. Два механо-оптических эффекта, а именно, изменение спектров селективного отражения света планарной текстурой ХЖК и переход конфокальной текстуры в планарную под влиянием набегающего потока, нашли применение в аэродинамических исследованиях для панорамной диагностики касательного напряжения вязкого трения [1–6].

В то же время работающие на этих эффектах ХЖК сенсоры (из-за их высокой вязкости) обладают ограниченной областью применения, поэтому актуальным остается исследование других эффектов и ЖК-материалов, обладающих улучшенными временными характеристиками, повышенной чувствительностью к сдвигу и практичных к использованию в аэродинамических приложениях.

Известно, что нематик, изначально ориентированный планарно и перпендикулярно направлению скорости и градиента скорости, переходит в закрученную по толщине слоя твист-структуру [7–11]. Оптическая активность твист-структуры, как и интенсивность отраженного (или прошедшего) линейно-поляризованного света, зависит от касательного напряжения. Поэтому зависимость интенсивности от сдвига при достаточной чувствительности может быть перспективной для визуализации распределения касательного напряжения трения на исследуемой поверхности.

Цель настоящей работы – исследование в поляризованном свете спектрального отклика НЖК на воздействие касательных напряжений, индуцированных дозвуковым потоком, набегающим перпендикулярно директору.

В качестве меры воздействия потока на слой ЖК рассматривается средний уровень касательного напряжения вязкого трения $\tau = F/S$, равный касательной силе F , действующей на единицу площади S .

Выбор ЖК и подготовка поверхности

Выбор НЖК для исследований определялся условиями аэродинамического эксперимента. В том числе шириной температурной области существования нематической мезофазы, величиной двулучепреломления, хорошей адгезией к материалу модели и доступностью. Широким температурным диапазоном существования мезофазы обладают смеси жидких кристаллов. В качестве исследуемой смеси использовался нематик отечественного производства: ЖК1289 (ГНЦ НИОПиК), область существования мезофазы которого $\Delta T = (-20 \div 62 \text{ } ^\circ\text{C})$.

Вначале на исследуемую поверхность наносился тонкий слой поливинилацетата (ПВА). После высыхания поверхность полимера натиралась мягкой тканью в одном направлении, перпендикулярно направлению потока, что позволяет сориентировать молекулы НЖК в направлении образовавшихся бороздок. НЖК наносились кистью в направлении бороздок. Верхняя граница слоя НЖК была свободной.

Условия эксперимента и оптическая схема измерений отклика НЖК

Для исследования использовалась лабораторная аэродинамическая установка, в которой было реализовано турбулентное течение со скоростями набегающего потока до 80 м/с и средним уровнем пульсаций скорости до 3 %. Задняя стенка рабочей части установки, на которую наносилось ЖК-покрытие, была сделана из меди и оснащена системой термостатирования.

Оптическая схема измерений спектра отражения линейно-поляризованного света нематическим ЖК приведена на рис. 1.

Освещение ЖК-покрытия (4) осуществлялось лазерным диодом с длиной волны излучения $\lambda \cong 645\text{нм}$, мощностью 30 мВт (12) через поляризатор (11), центральное прозрачное окно плоского зеркала и окно рабочей части (5) аэродинамической установки. Освещенная область имела диаметр приблизительно 4 мм. Поляризатор устанавливался параллельно направлению директора НЖК и перпендикулярно скорости набегающего потока.

Плоско-поляризованный квазимонохроматический свет падал на слой НЖК перпендикулярно поверхности.

При условии, что слой НЖК достаточно толстый, часть падающего света, совпадающая по направлению поляризации с направлением директора НЖК, проходит через слой с поворотом плоскости поляризации на некоторый угол $\varphi(Z)$, величина которого изменяется по z , толщине слоя НЖК. Компонента поляризованного света перпендикулярная директору на свободной поверхности

слоя ЖК также испытывает после прохождения слоя поворот плоскости поляризации на угол φ . Свет, который отразится от зеркала обратно, снова пройдет через слой НЖК в направлении к анализатору. Разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучом удвоится и составит $4\pi\Delta nd/\lambda$.

Свет, отраженный от покрытия и плоского зеркала (14), проходит через анализатор (10), скрещенный с поляризатором под 90 град, и объективом (7) собирается на торце световода (8).

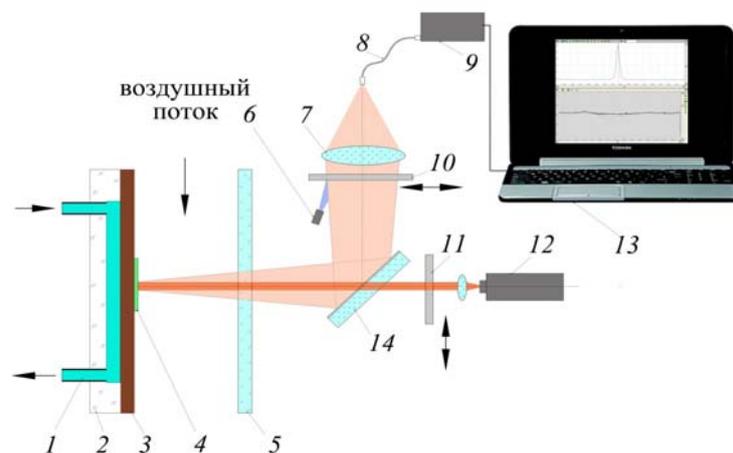


Рис. 1. Схема измерения отклика нематика на воздействие воздушного потока: 1 – теплоноситель из термостата, 2 – боковая стенка рабочей части воздушного канала, 3 – медная пластина, 4 – слой нематика, 5 – прозрачная стенка рабочей части, 6 – светодиод, 7 – объектив, 8 – световод, 9 – спектрофотометр «Колибри», 10 – анализатор, 11 – поляризатор, 12 – лазерный диод $\lambda = 645$ нм, 13 – ПК, 14 – плоское зеркало с центральным прозрачным окном

Другой конец световода находится перед входной щелью многоканального портативного спектрофотометра «Колибри» (9). Выходной сигнал, отражающий его спектральный состав, амплитудные и временные характеристики, выводится на экран ПК (13).

Программное обеспечение спектрофотометра позволяет получить результаты измерений в виде спектров отражения $I_R(\lambda, t)$ и временных зависимостей интенсивности отражения на фиксированной длине волны $I(t)_{\lambda=\lambda_i}$ с высоким временным разрешением.

Результаты измерений

ЖК1289 на подложке из ПВА

На рис. 2 показано изменение спектра отражения линейно-поляризованного света $I_R(\lambda)$ ЖК при увеличении скорости набегающего потока от $V_1 \approx 20$ м/с до $V_{13} \approx 80$ м/с. Видно, что интенсивность отражения на длине волны максимума 645,6 нм увеличивается примерно в 3 раза. Ниже на рис. 2 показана временная зависимость интенсивности отражения в одном длительном эксперименте с 13-тью кратковременными пусками.

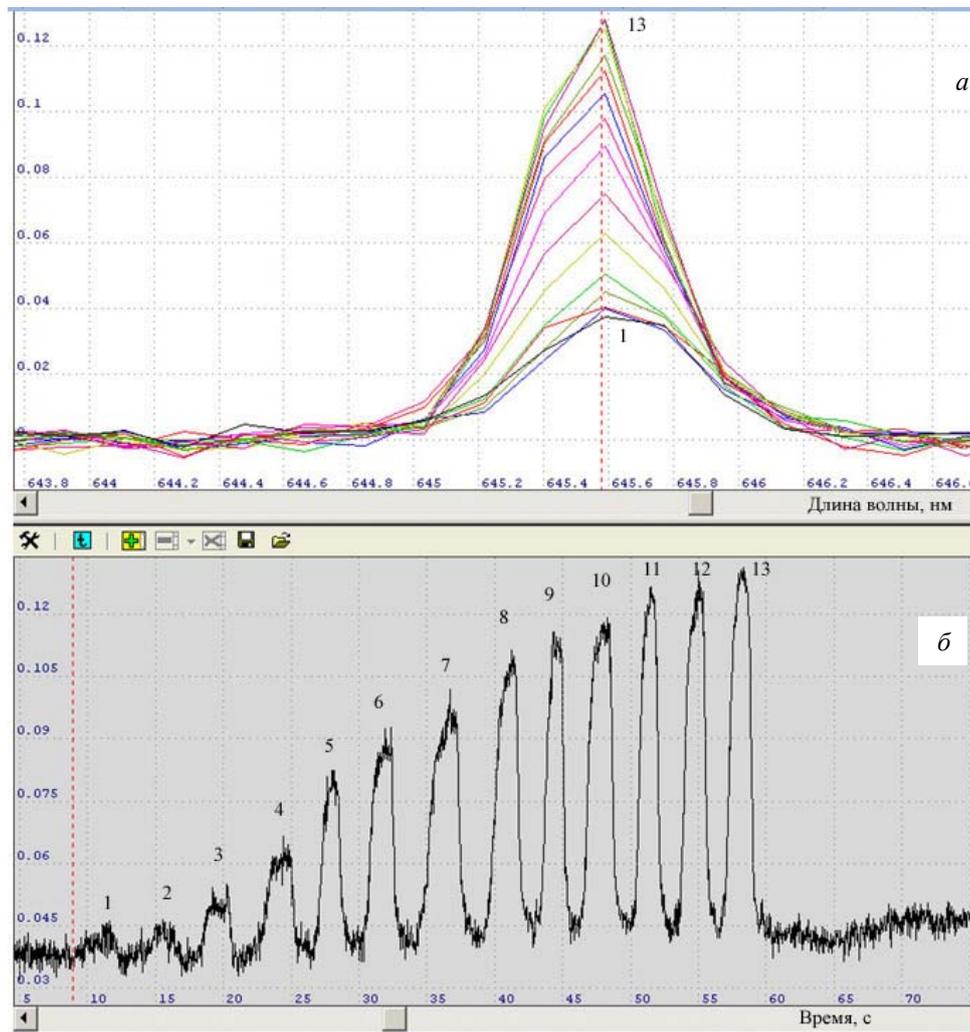


Рис. 2. Оптический отклик системы (ЖК1289 + ПВА) на кратковременные пуски с нарастающим уровнем касательного напряжения.
 $a - I_r(\lambda)$ при разных τ ; $b - I_r(t)$ для $\lambda = \lambda_{\max} \approx 645,6$

Эти данные позволяют построить калибровочные кривые в виде зависимости нормированной интенсивности отражения от касательного напряжения $I(\tau)/I_0(\tau=0)$, а также проанализировать влияние отдельных параметров эксперимента. Здесь I_0 – интенсивность отражения без потока.

На рис. 3 приведены калибровки, полученные для ЖК1289 по результатам трех циклов измерений на одном покрытии. Видно, что зависимость нормированной интенсивности поляризованного света от касательного напряжения является монотонной, и она хорошо аппроксимируется полиномом 2 сте-

пени. Это позволяет осуществлять визуализацию полей касательных напряжений. В то же время в первом цикле на новом ЖК-покрытии чувствительность максимальная, но от цикла к циклу после многократных включений происходит ее падение. Это означает, что измерения для калибровки необходимо осуществлять на новом ЖК-покрытии. Сравнение результатов измерений на новом покрытии при прямом и обратном ходе калибровки показано на рис. 4. Видно, что чувствительность ЖК1289 к сдвигу выше, если измерения производятся с уменьшением касательного напряжения.

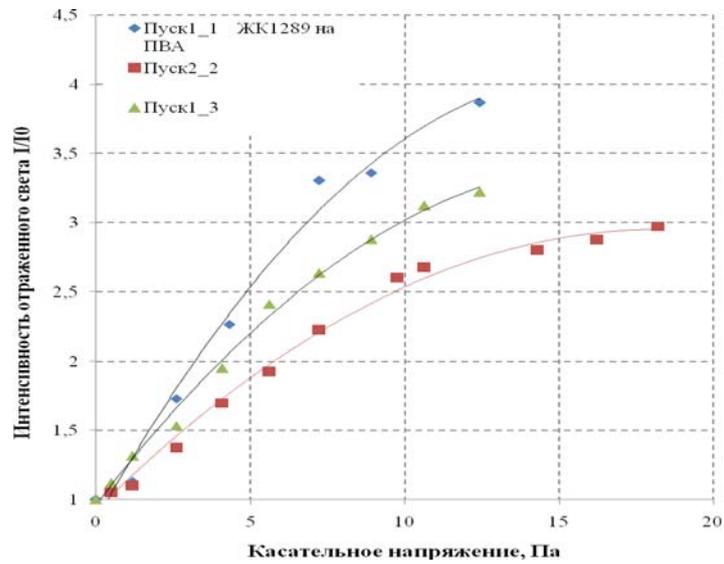


Рис. 3. Зависимость нормированной интенсивности отраженного света от касательного напряжения

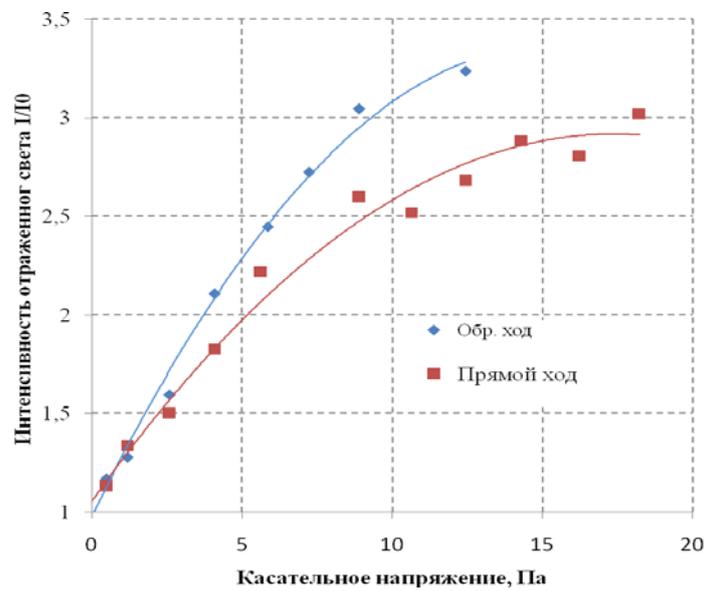


Рис. 4. Сравнение калибровок, полученных в экспериментах с нарастающим и убывающим уровнем касательного напряжения. ЖК1289 на ПАА

Заключение

Исследован спектральный отклик НЖК1289 на воздействие касательных напряжений, индуцированных дозвуковым потоком, набегающим перпендикулярно директору. Показано, что в диапазоне касательных напряжений до $\tau \approx 15$ Па (или скоростей набегающего потока до 80 м/с) нормированная интенсивность света, отраженного от слоя закрученного нематика, монотонно увеличивается более чем в 3 раза. Такая чувствительность НЖК к сдвиговой деформации может быть использована для диагностики касательных напряжений в аэродинамическом эксперименте.

Список литературы / References

1. Klein E. J., Margozzi A. P. Apparatus for the calibration of shear sensitive liquid crystals // *Rev. Sci. Instrum.* 1970. Vol. 41, Iss. 2. P. 238–239.
2. Reda D. C., Muratore J. J. Measurement of surface shear stress vectors using liquid crystal coatings // *AIAA J.* 1994. Vol. 32. P. 1576–1582.
3. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. // *Proc. of the XV International conference on the methods of aerophysical research.* Novosibirsk, Russia, November 1–6, 2010. Part 1. P. 253–254.
4. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P., et al. // *Proc. of the 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-8).* Moscow, Russia, August 21–25, 2011. № 113. P. 1–5.
5. Bonnett P., Jones T. V., McDonnell D. G. Shear-stress measurement in aerodynamic testing using cholesteric liquid crystals // *Liquid Crystals.* 1989. Vol. 6, Iss. 3. P. 271–280.
6. Parmar D. S. A novel technique for response function determination of shear sensitive cholesteric liquid crystals for boundary layer investigations // *Rev. Sci. Instrum.* 1991. Vol. 62, Iss. 6. P. 1596–1608.
7. Buttsworth D. R., Elston S. J., Jones T. V. Direct full surface skin friction measurement using nematic liquid crystal techniques // *J. Turbomach.* 1998. Vol. 120, Iss. 4. P. 847–853.
8. Buttsworth D. R., Elston S. J., Jones T. V. Directional sensitivity of skin friction measurements using nematic liquid crystal // *Meas. Sci. Tech.* 1998. Vol. 9, № 11. P. 1856–1865.
9. Buttsworth D. R., Elston S. J., Jones T. V. Skin friction measurements on reflective surfaces using nematic liquid crystal // *Exp. in Fluids.* 2000. Vol. 28. P. 64–73.
10. Zharkova G. M., Kovrizhina V. N. Mechanico-optical effects in liquid crystals and techniques of its application for flows study / CD-ROM Proc. of 11th Int. Conf. “Optical Methods of Flow Investigations” (OMFI-2011), Moscow, Russia, June, 27–30, 2011, Moscow Power Institute, Paper № 86, 15 p.
11. Blinov L. M. *Structure and Properties of Liquid Crystals*, Springer, Dordrecht–Heidelberg–London–New York, 2011.

Поступила в редакцию 28.02.2014 г.