

Научная статья

УДК 533:535.37

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИМЕРНО-ДИСПЕРСНЫХ
ХОЛЕСТЕРИКОВ, ДОПИРОВАННЫХ ЛЮМИНОФОРом,
ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕЧЕНИЙ**

Галина Михайловна Жаркова*, Валентина Николаевна Коврижина, Александр Павлович Петров

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

ИНФОРМАЦИЯ

История статьи:

Поступила 13.04.2023

Одобрена 11.05.2023

Принята 15.05.2023

Ключевые слова:

термочувствительные
жидкие кристаллы,
чувствительный к давлению
люминофор,
фосфоресценция

АННОТАЦИЯ

Предложен способ формирования пленки на основе полимерно-дисперсных жидких кристаллов, допированных органическим люминофором. Пленка сформирована на основе термочувствительных холестерических жидких кристаллов, закапсулированных в поливинилацетатном полимере, с добавкой порфиринового комплекса платины, эмиссия которого зависит от давления. Наличие в спектре пленки длины волны селективного отражения света жидких кристаллов и длины волны фосфоресценции люминофора позволяет измерять распределение температуры и давления на исследуемой поверхности в одном аэродинамическом эксперименте. Кратко обсуждаются основные аспекты применения метода и его возможности.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.63

Для цитирования:

Жаркова Г. М., Коврижина В. Н. Петров А. П. Анализ возможностей использования полимерно-дисперсных холестериков, допированных люминофором, для оптической диагностики течений // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2023. Т. 23, № 2. С. 63–70.

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

© Жаркова Г. М., Коврижина В. Н. Петров А. П., 2023

Research Article

CAPABILITY ANALYSIS OF USING POLYMER-DISPERSED CHOLESTERICSDOPED WITH LUMINOPHORE FOR OPTICAL DIAGNOSIS OF FLOWS

Galina M. Zharkova*, Valentina N. Kovrizhina, Alexandr P. Petrov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Novosibirsk, Russia

ARTICLE INFO:

Article history:

Received 13 April 2023

Approved 11 May 2023

Accepted 15 May 2023

Key words:

thermosensitive liquid crystals,
pressure sensitive
luminophore,
phosphorescence

ABSTRACT

A method of film formation based on polymer-dispersed liquid crystals doped with an organic luminophore is proposed. A film is obtained on the basis of thermosensitive cholesteric liquid crystals; encapsulated in a polyvinyl acetate polymer with the addition of a platinum porphyrin complex, whose emission depends on pressure. The presence in the film spectrum of the liquid crystals selective reflection wavelength and the luminophore phosphorescence wavelength makes it possible to measure temperature and pressure distributions on the studied surface simultaneously in one aerodynamic experiment. The main aspects of the method and its possibilities are discussed.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.2.63

For citation:

Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P. Capability analysis of using polymer-dispersed cholesterics doped with luminophore for optical diagnosis of flows. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (2), 63–70 (in Russ.).

*Corresponding author: zharkova@itam.nsc.ru

© Zharkova G. M., Kovrizhina V. N., Petrov A. P., 2023

Введение

По мере накопления знаний и технических возможностей для измерения экспериментальных параметров и их цифровой обработки все больший интерес вызывают композитные материалы. Применительно к аэродинамическим исследованиям актуальным остается поиск и совершенствование средств визуализации и измерения распределения температуры, давления и поверхностного трения на моделях летательных аппаратов.

Для панорамного измерения этих параметров используются тонкопленочные покрытия, оптические свойства которых чувствительны к тому или иному возмущению. Например, оптические эффекты, возникающие в тонких слоях жидких кристаллов (ЖК) под влиянием механического воздействия, применяются для измерения поверхностного трения [1]. А полимерно-дисперсные холестерические ЖК (ХЖК), селективно отражающие свет, используются для измерения температур от -20 до 200 °С с различной температурной чувствительностью [2]. Для измерения давления применяются покрытия, содержащие органические люминофоры [3–8]. Метод основан на деактивации фотовозбужденных молекул люминофора молекулами кислорода. Люминофоры, используемые в таких покрытиях, должны обладать высоким квантовым выходом люминесценции, длительным временем жизни, хорошей фотостабильностью и нечувствительностью к температуре. На протяжении многих лет велись поиски как самих люминофоров, отвечающих этим требованиям, так и матриц, в которые они внедрялись. Этот метод развивался и совершенствовался как в нашей стране, так и за рубежом, наиболее подробные сведения можно найти в [4, 5]. Анализ данных из доступных источников показал отсутствие люминофоров чувствительных только к давлению и нечувствительных к температуре. Результаты по распределению давления, полученные с большинством известных люминофоров, необходимо корректировать с учетом локальной температуры [9–11]. Поэтому естественно возникает необходимость измерять распределение температуры и давления на поверхности синхронно в одном эксперименте.

Известно, что один из традиционных панорамных способов коррекции температуры основан на использовании двух видов люминесцентных преобразователей для измерения температуры и давле-

ния (люминесцентные преобразователи температуры, ЛПТ, и давления, ЛПД). В англоязычной литературе эти преобразователи носят название *temperature-sensitive paints (TSP)*, и *pressure-sensitive paint (PSP)*. Один из преобразователей должен быть нечувствительным к давлению и чувствительным к температуре, а второй – наоборот [10–11]. При этом фосфоресценция возбуждается на одной длине волны, а эмиссия происходит на разных. Несмотря на высокую информативность таких покрытий, они обладают определенными недостатками. Во-первых, внесение второго люминофора может вызывать их взаимодействие, что приведет к изменению оптических характеристик. Во-вторых, покрытие наносится методом напыления, что приводит к увеличению шероховатости исследуемой поверхности и изменению структуры пристенного течения. В-третьих, этим методом трудно сформировать покрытие одинаковой толщины на всей поверхности, а от толщины покрытия зависит интенсивность эмиссии люминофора. Все эти моменты послужили мотивацией разработки тонкопленочных покрытий чувствительных как к давлению, так и к температуре.

В настоящей работе обсуждается возможность одновременного измерения температуры и давления, используя термочувствительные полимерно-дисперсные жидкие кристаллы (ПДЖК), допированные люминофором (гибридные ПДЖК). Установлено, что холестерические ПДЖК, чувствительные к температуре, обладают чувствительностью к давлению только при очень высоких уровнях давления, тогда как во многих аэродинамических испытаниях реализуются низкие уровни статических давлений, к которым исследованные ЖК оказались слабо чувствительными. Поэтому чувствительностью ПДЖК к давлению на многих режимах течения можно пренебречь. Введение люминофора в полимерно-дисперсные холестерические ЖК может позволить измерять одновременно как температуру, так и давление. Предлагаемый подход требует адаптации методики калибровки, экспериментальной процедуры и алгоритмов цифровой обработки.

Цель работы – изложение и анализ предлагаемого подхода и характеристик ряда гибридных покрытий на основе полимерно-дисперсных холестерических жидких кристаллов и одного из платиновых комплексов порфирина (октаэтил порфирин РтОЕР).

Материалы и калибровочное устройство

Для тестирования и анализа подхода к формированию гибридной пленки были выбраны: платиновый комплекс порфирина PtOEP, холестерические жидкие кристаллы на основе эфиров холестерина и ряда кислот и поливинилацетат (ПВА). Платиновый комплекс порфирина PtOEP имеет одну полосу поглощения ($\lambda \approx 529$ нм) и длину волны люминесценции – 641 нм (рис. 1).

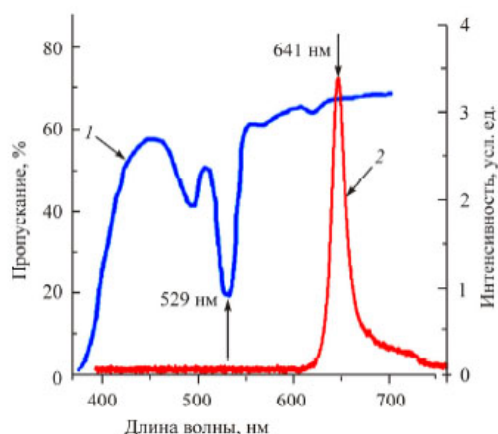


Рис. 1. Спектры поглощения и фосфоресценции PtOEP при $T = 25$ °C

Fig. 1. Absorption and phosphorescence spectra of PtOEP at $T = 25$ °C

На основе эфиров холестерина и ряда кислот можно создать термочувствительные смеси для измерения температур от -20 до 200 °C, с различной температурной чувствительностью от долей градуса до десятков [2]. Выбор составов определяется требуемыми температурными условиями эксперимента. При этом спектр селективного отражения ХЖК в исследуемом диапазоне температур не должен перекрывать спектр люминесценции PtOEP. Варьируя, концентрации 3-х эфиров холестерина (холестерилнонаноата, холестерилвалерата и холестерилхлорида) можно получать смеси с необходимыми спектральными характеристиками. Две смеси на основе холестерилнонаноата и холестерилвалерата, содержащие 20 % и 30 % холестерилхлорида удовлетворяют этим требованиям (рис. 2) [12].

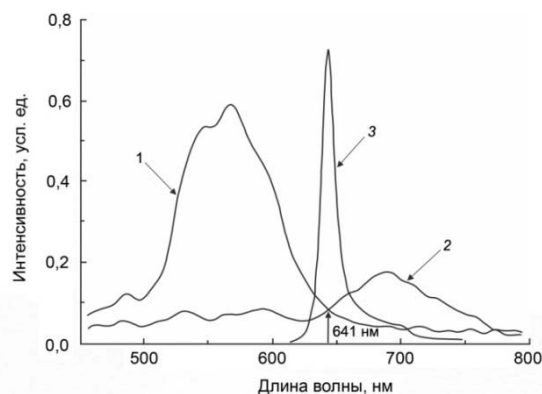


Рис. 2. Зависимости интенсивностей отражения белого света смесями LC20 (1), LC30 (2) и фосфоресценции (3) при комнатной температуре и атмосферном давлении

Fig. 2. Dependences of the white light reflection intensity for mixtures LC20 (1), LC30 (2) and phosphorescence (3) at room temperature and atmospheric pressure

Выбор поливинилацетата (ПВА) в качестве полимерной матрицы определялся тем, что в этой матрице ХЖК находятся в виде капель и образуют так называемую биполярную текстуру, оптические свойства которой близки к свойствам планарной текстуры чистых ХЖК [2]. Из-за невысокой газопроницаемости пленки ПВА чувствительность к давлению введенного в него люминофора, с одной стороны, уменьшается, а с другой – введение люминофора в полимерно-дисперсные жидкие кристаллы на его основе, увеличивает интенсивность люминесценции в 4–5 раз [13]. Смесь жидких кристаллов, люминофора и ПВА растворяется в смеси органических растворителей ацетон и хлорбензол (1:2). 10 %-й раствор перемешивается ультразвуковой мешалкой и поливается на тонкую лавсановую подложку. После испарения растворителей в течение 2–3-х часов на лавсане формируется тонкая гибкая гладкая пленка толщиной $15 \div 20$ мкм, содержащая капсулы жидких кристаллов и частицы PtOEP. Введенный в состав пленки люминофор в основном распределен между капсулами ХЖК. Наибольшая интенсивность фосфоресценции PtOEP в пленке наблюдается при соотношении люминофор/ПВА 1:120 весовых частей [14].

Для измерения оптических характеристик гибридной пленки использовалось калибровочное устройство. Исследуемый образец помещался в барокамеру, давление в которой понижалось форвакуумным насосом и контролировалось вакуумметром. Внутри барокамеры устанавливалась термостатированная медная вставка с контрольными термодарами, на которую наносилась исследуемая пленка. Возбуждение люминофора в образце осуществлялось галогенным источником света (Фотон 500 Вт), спектр и мощность которого должны были быть достаточными для возбуждения фосфоресценции люминофора. Недостатком этого источника является сильный радиационный нагрев исследуемого образца, для исключения которого приходится применять водяной фильтр. Разницу в уровнях сигналов интенсивности можно регулировать с помощью нейтрального фильтра.

Для регистрации полей температур и давления на моделях нужно с помощью одной или двух камер зарегистрировать оптический отклик гибридной пленки, нанесенной на модель, в области селективного отражения света ХЖК ($\Delta\lambda = 380\div 720$ нм, $\Delta T = T_{\text{Red}} - T_{\text{Blue}}$) при освещении белым (или зеленым) светом и в области фосфоресценции

РтОЕР на $\lambda = 641$ нм. На несимметричных моделях для этого в эксперименте и при калибровке используются полосовые фильтры перед объективом монохроматической камеры или адекватное монохроматическое освещение. Схема освещения и регистрации должна включать защиту от посторонних источников света.

В настоящей работе для измерения характеристик оптического отклика гибридной пленки и его калибровки относительно давления и температуры использовался портативный спектрофотометр «Колибри». Спектральный метод позволяет измерить характеристики пленки в зависимости от давления и температуры в точке. А с помощью 2-х видеокамер с соответствующими фильтрами можно зарегистрировать два изображения: изображение поля температур в зеленой области спектра и изображение поля давлений в красной области спектра.

Результаты измерений и их обсуждение

Спектральные характеристики гибридной пленки представлены на рис. 3 и 4.

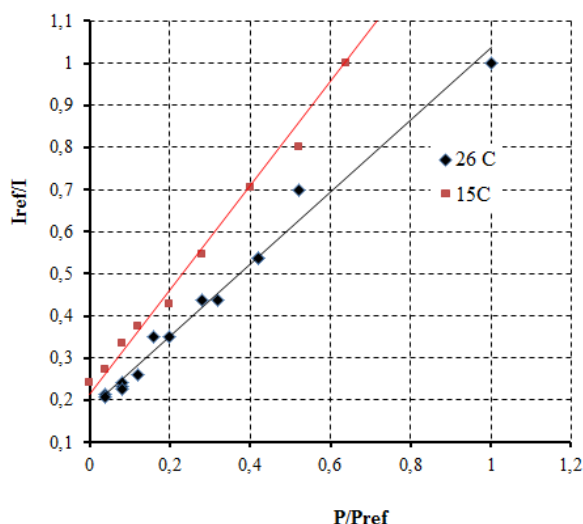


Рис. 3. Зависимость относительной интенсивности фосфоресценции гибридной пленки (на $\lambda = 641$ нм) от относительного давления P/P_{ref} при $T = 26$ и 15 °C, $P_{\text{ref}} = 10^5$ Па

Fig. 3. Dependence of the ratio of phosphorescence intensity I_{ref}/I ($\lambda = 641$ nm) vs pressure P/P_{ref} for $T = 26$ и 15 °C. $P_{\text{ref}} = 10^5$ Па

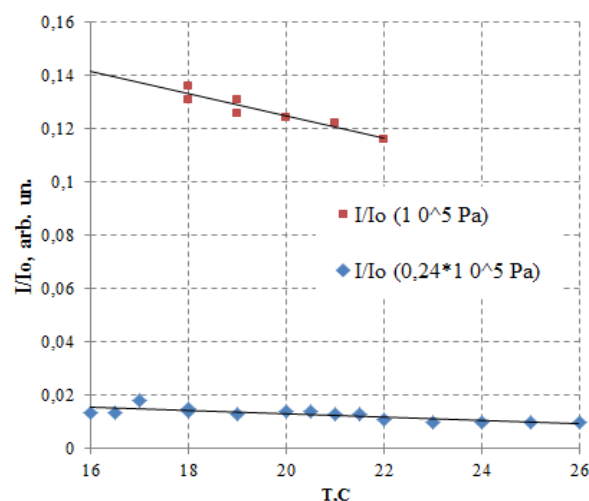


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности фосфоресценции гибридной пленки (на $\lambda = 641$ нм) от температуры при $P = 1$ и $0,24 \cdot 10^5$ Па

Fig. 4. Dependence of the ratio of phosphorescence intensity ($\lambda = 641$ nm) vs temperature for $P = 1$ и $0,24 \cdot 10^5$ Па

Обработка измерений осуществлялась по формуле:

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I} = \frac{\text{Эмиссия при } P_{\text{ref}}, \text{ нормированная на опорный с ФЭУ при } P_{\text{ref}}}{\text{Эмиссия при } P, \text{ нормированная на опорный с ФЭУ при } P} = \frac{I_{\text{ref}}(P = 10^5 \text{ Па}) / I_{\text{оп фэу}}(P = 10^5 \text{ Па})}{I(P) / I_{\text{оп фэу}}(P)} =$$

$$\left(\frac{I_{\text{ref}}(P = 10^5 \text{ Па})}{I(P)} \right) \left(\frac{I_{\text{оп фэу}}(P)}{I_{\text{оп фэу}}(P = 10^5 \text{ Па})} \right)$$

Из графиков зависимости Штерна-Фольмера $I_{\text{ref}}(P = 10^5 \text{ Па}, T = \text{const}) / I(P_i, T = \text{const}) = F(P_i / P_{\text{ref}} = 10^5 \text{ Па})$ видно, что с увеличением давления интенсивность фосфоресценции падает, как и при локальном увеличении температуры. А также, что при атмосферном давлении чувствительность данной гибридной пленки к температуре выше, чем в вакууме и составляет 0,2 % на градус. Однако эта характеристика может быть повышена подбором состава ЖК-композиций.

На рисунке 5 показаны зависимости относительной интенсивности $I_{532}(T)/I$ селективного отражения гибридной пленки от температуры в вакууме и при атмосфере, полученные в режиме охлаждения.

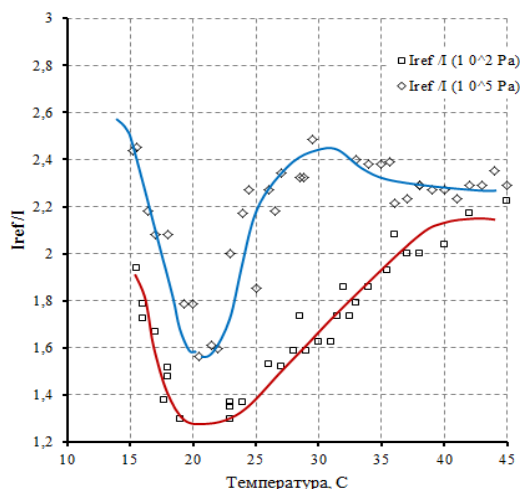


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности $I_{532}(T)/I$ селективного отражения гибридной пленки от температуры при $P = 10^5$ и 10^2 Па

Fig. 5. Dependences of ratio of selective reflection intensity $I_{532}(T)/I$ vs temperature at $P = 10^5$ и 10^2 Pa

Видно, что при уменьшении давления в исследованном диапазоне длина волны пика селективного отражения λ практически не зависит

от давления, но полуширина пика $\Delta\lambda$ заметно уменьшается. Кроме этого, видно, что характерная для идеальной планарной текстуры симметричная гауссовская кривая после введения люминофора стала несовершенной.

Для панорамной диагностики давления и температуры с помощью гибридного покрытия вместо точечных измерений необходимо использовать цифровую обработку зарегистрированных камерами в двух диапазонах длин волн (красном и зеленом) изображений всей исследуемой поверхности. Регистрация оптического отклика исследуемого образца позволяет получить распределение интенсивности в зеленой области видимого спектра $G(x, y)$, которая послужит для определения локальной температуры, и в красной области спектра, показывающей распределение давления. Калибровка гибридных покрытий в красной и зеленой областях видимого спектра может производиться до эксперимента на специальной калибровочной установке или в ходе самого эксперимента.

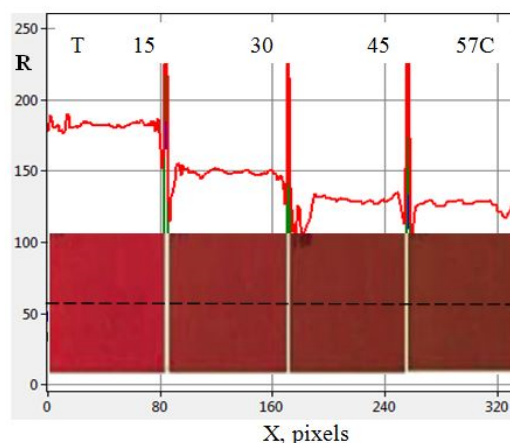


Рис. 6. Изменение красной компоненты сигнала видеокамеры $R(x)$ от температуры при 15, 30, 45 и 57 °C

Fig. 6. Variation of red component $R(x)$ vs temperature for $T = 15, 30, 45$ and 57 °C

На рисунке 6 показан пример распределений красной компоненты сигнала видеокамеры $R(x,y)$ (интенсивности флуоресценции) от температуры при четырех значениях T (нижняя часть рисунка). Выше приведены графики изменения уровня красной компоненты видеосигнала $R(x)$ вдоль пунктирной горизонтальной координаты при этих значениях температуры.

Наличие данных о распределении температуры позволяет корректировать температурную зависимость распределения давления. Способы температурной коррекции давления описаны в [15]. Коррекция давления на локальные значения температуры стенки $T_w(x,y)$ должна осуществляться с использованием двухфакторной калибровки (зависимости Штерна-Фольмера), например, в виде:

$$\frac{p(T)}{p_{\text{ref}}} = A(T) + B(T) \frac{I_{\text{ref}}}{I(T)} + C(T) \left(\frac{I_{\text{ref}}}{I(T)} \right)^2.$$

$$\begin{aligned} \text{Здесь } I_{\text{ref}} &= I(p_{\text{ref}}, T), \\ A(T) &= a_0 + a_1 T + a_2 T^2, \\ B(T) &= b_0 + b_1 T + b_2 T^2, \\ C(T) &= c_0 + c_1 T + c_2 T^2. \end{aligned}$$

Как видим, данная калибровка требует нахождения девяти коэффициентов или может быть сделана с использованием других статистических методов или нейросетей.

Заключение

Предложен способ формирования тонкой пленки на основе полимерно-дисперсных холестерических жидких кристаллов, допированных люминофором. Пленка, нанесенная на исследуемую поверхность, позволяет одновременно измерять распределение температуры и давления на поверхности и осуществлять температурную коррекцию давления.

Предварительный анализ данного подхода и измерения характеристик исследуемого гибридного покрытия выполнены на образце с порфириновым комплексом платины (PtOEP) и трехкомпонентным холестерическим ЖК с температурной шириной области селективного отражения $\Delta T_G = 15 \div 45$ °C. Однако интервал температур в различных аэродинамических экспериментах может значительно различаться. Поэтому при формировании пленки необходимо использовать ХЖК-составы, соответствующие конкретным условиям эксперимента, и провести исследование

температурной зависимости интенсивности люминофора при этих условиях. В работе не рассматривались вопросы, связанные с учетом угловой зависимости селективного отражения света. Эти вопросы необходимо исследовать дополнительно одновременно с доработкой программного обеспечения цифровой обработки экспериментальных данных, включая анализ погрешностей.

Следует отметить, что выбор люминофора PtOEP определялся среди прочего его доступностью, поэтому использование новых поколений этих материалов более перспективно. Поскольку время отклика ЖК ($\cong 20 \div 100$ мс) много больше, чем у люминофоров, область применения таких гибридных покрытий будет ограничиваться стационарными и квазистационарными режимами. Поэтому для получения пространственного распределения температуры и давления с последующей его температурной коррекцией использовался стационарный метод. Возможно, что применение гибридных покрытий на основе других термочувствительных ЖК с более высоким быстродействием, позволит расширить их область применения.

Благодарность: работа выполнена по теме государственного задания (№ госрег. 121030500158-0).

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

Список источников / References

1. Жаркова Г. М., Коврижина В. Н. Механо-оптические эффекты в жидких кристаллах и их использование для измерения касательных напряжений в аэродинамическом эксперименте // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2022. Т. 22, № 3. С. 6–25. [Zharkova G.M., Kovrizhina V.N. Mechano-optical effects in liquid crystals and their use for measuring shear stresses in an aerodynamic experiment. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2022, **22** (3), 6–25 (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2022.3.6].
2. Жаркова Г. М., Сонин А. С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск : Наука, 1994. 214 с. [Zharkova G.M., Sonin A.S. Liquid-crystal composites. Novosibirsk : Nauka, 1994, 214 p. (in Russ.).]
3. Liu T., Campbell B., Burns S., Sullivan J.P. Fluorescent paint for measurement of heat transfer in shock – turbulent boundary layer interaction. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, **10**, 101–112.

4. Mosharov V.E., Radchenko V.N., Fonov S. Luminescent pressure sensors in aerodynamic experiment. Central Aerohydrodynamic Institute – CWA International Corporation, 1997, 151 p.
5. Liu T., Campbell B., Burns S. & Sullivan J.P. Temperature- and pressure-sensitive paints in aerodynamics. *Appl. Mech. Rev.*, 1997, **50** (4), 227–246.
6. Bell J.H., Schairer E.T., Mehta R., Hand L. Surface pressure measurements using luminescent coating. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2001, **33** (1), 155–206. DOI: 10.1146/annurev.fluid.33.1.155.
7. Gregory J., Asai A., Kamada M., Liu T., Sullivan J. A review of pressure sensitive paints in hypersonic and unsteady flows. *Aerospace Eng.*, 2008, **222**, part G, 249–290. DOI: 10.1243/09544100JAERO243.
8. Жаркова Г.М., Петров А.П., Бессонов А.Г., Семейкин А.С., Быкова В.В., Усольцева Н.В. Исследование тушения люминесценции порфириновых комплексов платины в полимерной матрице // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2012. № 1. С. 31–41. [Zharkova G.M., Petrov A.P., Bessonov A.G., Semeikin A.S., Bykova V.V., Usoltseva N.V. Study of luminescence quenching of porphyrin complexes of platinum in a polymer matrix. *Zhidk. krist. ikh prakt. ispol'z = Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, 1, 31–41. (in Russ.)].
9. Woodmansee M.A., Dutton J.C. Treating temperature-sensitivity effects of pressure sensitive paint measurements. *Experiments in Fluids*, 1998, **24**, 163–174. DOI: 10.1007/s003480050163.
10. Hradil J., Davis C., Mongey K., McDonagh C., Mac-Craith B.D. Temperature-corrected pressure-sensitive paint measurements using a single camera and a dual-lifetime approach. *Meas. Sci. Technol.*, 2002, **13** (10), 1552–1557. DOI: 10.1088/0957-0233/13/10/307.
11. Mitsuo K., Asai K., Hayasaka M., Kameda M. Temperature correction of PSP measurement using dual-luminophor coating. *J. Vis.*, 2003, **6** (3), 213–223. DOI: 10.1007/BF03181462.
12. Жаркова Г. М., Коврижина В. М., Петров А. П. Исследование влияния одномерных фотонных кристаллов на свойства чувствительного к давлению люминофора // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2016. № 47. С.123–134. [Zharkova G.M., Kovrizhina V.M., Petrov A.P. Investigation of the influence of one-dimensional photonic crystals on the properties of a pressure-sensitive phosphor. *Bull. PNRPU. Aerospace engineering*, 2016, 47, 123–134 (in Russ.). DOI: 10.15593/2224-9982/2016.47.07].
13. Zharkova G.M., Petrov A.P., Kovrizhina V.N. Effect of the spiral liquid crystals on the amplitude and temporal characteristics of the pressure-sensitive luminophore. *AIP Conf. Proc.*, 2016, **1770** (1), 030004 (7 p.). DOI: 10.1063/1.4963946.
14. Zharkova G.M., Petrov A.P., Kovrizhina V.N. Polymer dispersed liquid-crystalline films doped by organic luminophore. *AIP Conf. Proc.*, 2018, **2027**, 040032 (9 p.). DOI: 10.1063/1.5065306.
15. Kose M.E. Multi-luminophore coating for pressure sensitive paint application. PhD thesis. University of Florida, 2005.

Вклад авторов:

¹Жаркова Г. М. – разработка концепции научной работы, планирование, методология, реализация исследования, написание и редактирование текста статьи.

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

³Петров А. П. – проведение измерений, подготовка иллюстраций.

Contribution of the authors:

¹Zharkova G. M. – development of the concept of scientific work, consultation on planning and methodology, writing and editing the text of the article.

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

³Petrov A. P. – conducting research, preparing illustrations.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

¹Orcid – 0000-0002-0173-2962

²Orcid – 0000-0002-0948-4481

³Orcid – 0000-0002-2683-8114

Поступила 13.04.2023, одобрена 11.05.2023, принята 15.05.2023
 Received 13.04.2023, approved 11.05.2023, accepted 15.05.2023