

Научная статья**УДК 620.171.5; 535.012.2****DOI: 10.18384/2949-5067-2026-1-62-77****АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ АЗИМУТАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА В МЕТОДЕ ФОТОУПРУГОСТИ****Сизов М. Н.*, Константинов М. С., Васильчикова Е. Н.***Государственный университет просвещения, г. Москва, Российская Федерация***Корреспондирующий автор, e-mail: misha-siz@mail.ru**Поступила в редакцию 24.12.2025**Принята к публикации 16.01.2026***Аннотация**

Цель. Установить связь интенсивности света, проходящего через нагруженный образец с состоянием поляризации и величиной действующей силы с учётом наведённого поляризационного дихроизма.

Процедура и методы. Проведено экспериментальное исследование азимутальной зависимости интенсивности монохроматического света, проходящего через прозрачный образец, подвергнутый одноосному сжатию. Построены и проанализированы теоретические модели, учитывающие возможное отклонение оптической оси образца от вертикали и наведённый поляризационный дихроизм.

Результаты. На основе изучения азимутальных зависимостей интенсивности света при различных нагрузках определено значение коэффициента фотоупругости исследуемого образца и коэффициента поглощения, обусловленного наведённой анизотропией.

Теоретическая и практическая значимость. Проведённый анализ показал необходимость учёта, помимо двулучепреломления, обусловленного приложенной к образцу нагрузки как наведённого поляризационного дихроизма, так и возможного отклонения оптической оси, для полного анализа азимутальных зависимостей интенсивности света.

Ключевые слова: интенсивность света, матрицы Джонса, оптическая анизотропия, оптическая ось, состояние поляризации света, фотоупругость

Для цитирования:

Сизов М. Н., Константинов М. С., Васильчикова Е. Н. Анализ особенностей азимутальных зависимостей интенсивности света в методе фотоупругости // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2026. № 1. С. 62–77. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2026-1-62-77>

Original research article**ANALYSIS OF THE FEATURES OF AZIMUTH LIGHT INTENSITY
DEPENDENCIES IN THE PHOTOELASTICITY METHOD**

M. Sizov*, M. Konstantinov, E. Vasilchikova

Federal State University of Education, Moscow, Russian Federation

** Corresponding author, e-mail: misha-siz@mail.ru*

Received by the editorial office 24.12.2025

Accepted for publication 16.01.2026

Abstract

Aim. To establish the relationship between the intensity of light passing through a loaded sample and the state of polarization and the magnitude of the acting force, taking into account induced polarization dichroism.

Methodology. An experimental study of the azimuthal dependence of the intensity of monochromatic light passing through a transparent sample subjected to uniaxial compression was conducted. Theoretical models were constructed and analyzed, accounting for possible deviation of the sample's optical axis from the vertical and induced polarization dichroism.

Results. Based on the study of the azimuthal dependences of light intensity under various loads, the value of the photoelasticity coefficient of the studied sample and the absorption coefficient due to induced anisotropy were determined.

Research implications. The analysis carried out showed the need to take into account, in addition to the birefringence caused by the load applied to the sample, both induced polarization dichroism and the possible deviation of the optical axis, for a complete analysis of the azimuthal dependences of the light intensity.

Keywords: light intensity, Jones matrices, optical anisotropy, optical axis, photoelasticity

For citation:

Sizov, M. N., Konstantinov, M. S. & Vasilchikova, E. N. (2026). Analysis of the features of azimuth light intensity dependencies in the photoelasticity method. In: *Bulletin of the State University of Education*, 1, 62–77. <https://doi.org/10.18384/2949-5067-2026-1-62-77>

Введение

Явление фотоупругости представляет собой пьезооптический эффект, являющийся следствием зависимости диэлектрической проницаемости вещества от деформации [1]. Суть его состоит в том, что изначально изотропные прозрачные материалы под действием внешних механических воздействий приобретают свойства, присущие двулучепреломляющим оптически анизотропным кристаллам. Классический поляризационно-оптический метод исследования напряжённого состояния материалов находит широкое применение как в механике [2–4] и проектировании [5; 6], так и в горном деле, металлургии, медицине [7; 8]. Реализуются два различных метода исследования напряжённого состояния: это анализ состояния эллиптически поляризованного света, полученного на выходе из исследуемого образца; и анализ интерференционной картины в белом или монохроматическом свете [9]. На протяжении долгого времени оба они были и остаются важным инструментом в инженерной практике и научных исследованиях благодаря своей наглядности, точности и превосходству над другими методами по надёжности, охвату и практичности. Их актуальность сохраняется в связи с развитием новых материалов, цифровизацией технологий и методов анализа и

обработки результатов [5; 10; 11]. Авторами было показано, как по изменению состояния поляризации света, проходящего через нагруженный образец, можно оценить постоянную фотоупругости [9]. Однако после проведения последующих исследований на разных образцах было обнаружено систематическое расхождение между предсказаниями базовой теоретической модели и экспериментальными данными. С целью устранения этих противоречий нами предлагается модифицированная модель, включающая введение эмпирических коэффициентов $\Delta\theta$ и μ_0 , физический смысл которых заключается в отклонении оптической оси поляризационной системы и учёте поглощения света при поляризационном дихроизме образца, соответственно. Научная новизна работы заключается в предложенном уточнении, позволяющем адекватно описать наблюдаемые явления, сохраняя простоту и наглядность исходной теоретической концепции.

Измерение интенсивности света на выходе из плоского полярископа

Известно, что пластина из органического стекла (рис. 1), подвергнутая одноосному сжатию, ведёт себя как фазовая пластинка с оптическими осями, параллельными поверхности образца. В соответствии с законами фотоупругости направление оптической оси в любой точке пластины совпадает с направлением напряжения в данной точке.

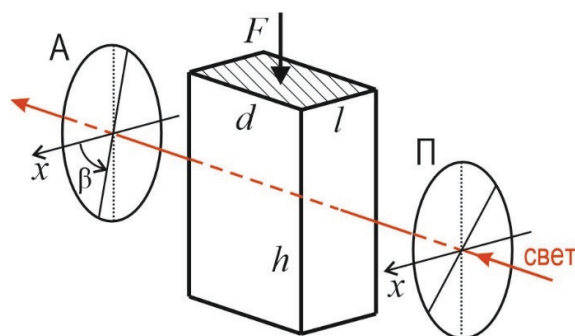


Рис. 1. / Fig. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки (плоский полярископ) / Schematic diagram of the experimental setup (flat polariscope)

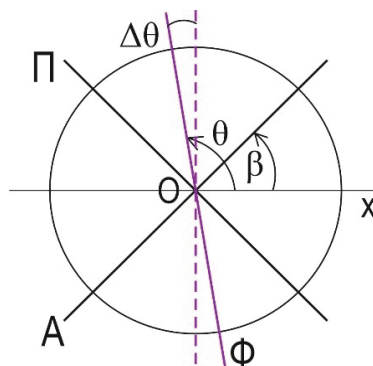


Рис. 2. / Fig. 2. Взаимное расположение главных направлений поляризаторов и оптической оси фазовой пластины со стороны приёмника (навстречу лучу) / The relative position of the main directions of the polarizers and the optical axis of the phase plate from the receiver side (towards the beam)

Источник: данные авторов

Наведённая анизотропия приводит к возникновению разности фаз для волн, поляризованных параллельно и перпендикулярно оптической оси:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d, \quad (1)$$

где d – толщина образца, λ – длина волны излучения, n_o и n_e – показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн. Установлено, что наведённая анизотропия Δn прямо пропорциональна напряжению [1]:

$$\Delta n = n_o - n_e = C \cdot \frac{F}{d \cdot l}, \quad (2)$$

где F – приложенная к образцу сила, $d \cdot l$ – площадь поперечного сечения образца, C – коэффициент фотоупругости. Разность фаз принимает вид:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} C \cdot \frac{F}{l}. \quad (3)$$

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источник света – лазер полупроводниковый (с длиной волны $\lambda = 650$ нм). Падающая волна поляризована в вертикальной плоскости. Свет проходит последовательно через поляризатор, ориентированный под постоянным углом $-\pi/4$ к оси Ox (рис. 2), нагруженный образец и анализатор, азимут которого β (относительно горизонтальной оси Ox) изменяется в пределах $-\pi/2 \leq \beta \leq \pi/2$. Интенсивность света, выходящего из анализатора, измеряется люксметром. Объектом исследования являлись образцы из полиметилметакрилата (органическое стекло).

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости относительной интенсивности света от азимута β на выходе из анализатора при различных значениях нагрузки F .

Анализ данных зависимостей позволяет оценить коэффициент фотоупругости C . Это можно сделать различными способами. Например, можно оценить экспериментально значение силы, при которой интенсивность света не будет зависеть от угла β . Как следует из теории, выходящий из образца свет при этом будет циркулярно поляризован, следовательно разность, приобретённая за счёт наведённой анизотропии, будет $\delta = \pi/2$. Тогда из формулы (3) получим значение коэффициента фотоупругости C . Этот способ даёт приблизительное значение C , так как требует достаточно точного определения значения силы, с одной стороны, с другой стороны – изменения интенсивности в этой области слабо зависят от азимута β в достаточно широком диапазоне нагрузок, что затрудняет идентификацию нагрузки. Другой способ основан на зависимости от разности фаз (то есть силы F) максимальных и минимальных значений интенсивности.

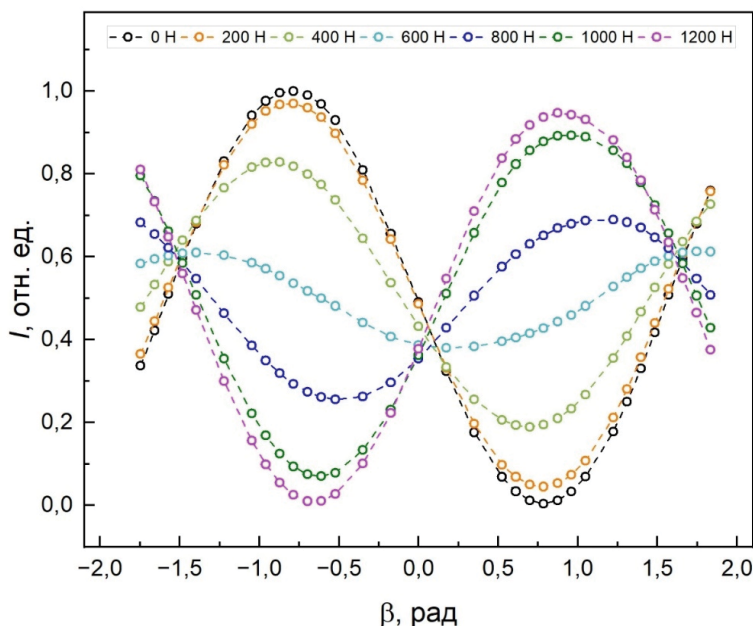


Рис. 3. / Fig. 3. Азимутальные зависимости относительной интенсивности света на выходе из анализатора при различных значениях нагрузки F / Azimuthal dependencies of the relative light intensity at the analyzer output for different load values F

Источник: данные авторов

На рис. 4 представлен график зависимости $\arctg(\sqrt{I_{\min}/I_{\max}})$ от величины нагрузки F .

Линейная аппроксимация даёт значение коэффициента фотоупругости [9] $C = (2,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-12} \frac{\text{М}^2}{\text{Н}}$.

Обсуждение результатов эксперимента

Теоретический анализ интенсивности света на выходе из анализатора проводится в рамках формализма матриц Джонса. Этот метод позволяет найти вектор Максвелла на выходе $[E_{\text{вых}}]$ через вектор Максвелла на входе в систему $[E_{\text{пад}}]$ по правилу [12]:

$$[E_{\text{вых}}] = [J_A] \times [J_{\text{пл}}] \times [J_{\text{п}}] \times [E_{\text{пад}}]. \quad (4)$$

Здесь использованы следующие обозначения. Вектор Максвелла вертикально поляризованного света от лазера:

$$[E_{\text{пад}}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

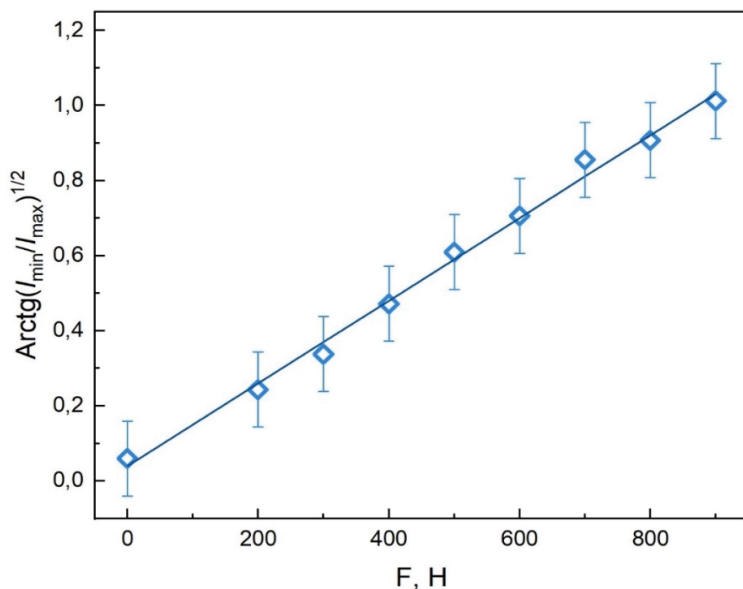


Рис. 4. / Fig. 4. График зависимости экстремальных значений интенсивности от величины нагрузки на образец / Graph of the dependence of extreme intensity values on the load on the sample

Источник: данные авторов

$[U_{\Pi}]$ – матрица Джонса поляризатора, ориентированного под углом $-\pi/4$ к оси Ox (рис. 3):

$$[U_{\Pi}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$[U_{\text{ПЛ}}]$ – матрица Джонса фазовой пластины с поглощением и разностью фаз δ , оптическая ось которой составляет угол θ с осью Ox (рис. 3):

$$[U_{\text{ПЛ}}] = \begin{bmatrix} C_1^2 + \rho S_1^2 e^{-i\delta} & C_1 S_1 (1 - \rho e^{-i\delta}) \\ C_1 S_1 (1 - \rho e^{-i\delta}) & \rho C_1^2 e^{-i\delta} + S_1^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $C_1 = \cos \theta$; $S_1 = \sin \theta$.

Считаем напряжённый образец линейно-дихроичной средой с коэффициентом ρ [13]:

$$\rho = e^{-\mu} = e^{\mathbb{D}\mathbb{P}} \left\{ -\frac{2\pi}{\lambda} d(\kappa_e - \kappa_o) \right\}, \quad (8)$$

где λ – длина волны, d – толщина пластины в направлении распространения света (рис. 1), κ_e, κ_o – коэффициенты поглощения для волн, поляризованных

параллельно оптической оси (вертикально) и перпендикулярно ей (горизонтально). Оптические оси двулучепреломления и дихроизма совпадают.

$[J_A]$ – матрица Джонса анализатора с азимутом β :

$$[J_A] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Из (4)–(9) определяется $[E_{\text{вых}}]$.

Вектор Максвелла на выходе из поляризатора:

$$[E_{\text{выхП}}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ +1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Вектор Максвелла на выходе из фазовой пластины с поглощением имеет вид:

$$[E_{\text{пл}}] = [J_{\text{пл}}] \times \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1 \\ +1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где

$$J_1 = -C_1^2 - \rho S_1^2 e^{-i\delta} + C_1 S_1 (1 - \rho e^{-i\delta}) \quad (11a)$$

$$J_2 = -C_1 S_1 (1 - \rho e^{-i\delta}) + \rho C_1^2 e^{-i\delta} + S_1^2 \quad (11б)$$

Вектор Максвелла на выходе из анализатора с азимутом β :

$$[E_A] = [J_A] \times [E_{\text{пл}}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{bmatrix} \times \frac{1}{2} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_{A1} \\ E_{A2} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где

$$E_{A1} = J_1 \cos^2 \beta + J_2 \sin \beta \cos \beta, \quad (12a)$$

$$E_{A2} = J_1 \sin \beta \cos \beta + J_2 \sin^2 \beta. \quad (12б)$$

Интенсивность на выходе из анализатора:

$$I_A = \frac{1}{2} [E_{A1}^* \ E_{A2}^*] \times \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_{A1} \\ E_{A2} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

$E_{A1}^* \ E_{A2}^*$ – комплексно-сопряжённые компоненты вектора.

После вычислений величин E_{A1} и E_{A2} и их комплексно-сопряжённых значений в соответствии с (11a, б), (12a, б) получим значение интенсивности света I_A на выходе из анализатора:

$$\frac{I_A}{I_\Pi} = \frac{1}{2} (K_1 \cos^2 \beta + K_2 \sin^2 \beta + K_{12} \sin \beta \cos \beta), \quad (14)$$

где

$$K_1 = C_1^4 + \rho^2 S_1^4 + C_1^2 S_1^2 (1 + \rho^2) - \\ - 2C_1 S_1 [C_1^2 (1 - \rho \cos \delta) + S_1^2 (\cos \delta - \rho)], \quad (14a)$$

$$K_2 = S_1^4 + \rho^2 C_1^4 + C_1^2 S_1^2 (1 + \rho^2) - \\ - 2\rho C_1^3 S_1 (\cos \delta - \rho) - 2C_1 S_1^3 (1 - \rho \cos \delta), \quad (14б)$$

$$K_{12} = -2\rho \cos \delta (C_1^2 - S_1^2)^2 - \\ - 4C_1^2 S_1^2 (1 + \rho^2) + 2C_1 S_1 (1 - \rho^2), \quad (14в)$$

$$C_1 = \cos \theta; \quad S_1 = \sin \theta.$$

I_Π – интенсивность света после поляризатора.

Если оптическая ось образца ориентирована строго вертикально, $\theta = \pi/2$. В случае отклонения оптической оси от вертикали (рис. 2) $\theta = \frac{\pi}{2} \pm \frac{\Delta\theta}{2}$.

Так, оптическая анизотропия является наведённой, и её величина зависит от приложенной нагрузки (закон фотоупругости (2)), при этом можно считать и поляризационный дихроизм также наведённым и зависящим линейно от напряжения σ . Тогда показатель экспоненты в формуле (8) можно записать в виде:

$$\mu = \frac{2\pi}{\lambda} d(\kappa_e - \kappa_o) = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot \mu_0 \cdot \sigma = \frac{2\pi}{\lambda l} \cdot \mu_0 \cdot F, \quad (15)$$

где μ_0 – коэффициент наведённого дихроизма, обусловленного нагрузкой (по аналогии с коэффициентом фотоупругости).

Рассмотрим частные случаи формулы (14).

Модель 1. Фазовая пластина ориентирована строго вертикально и поглощение отсутствует ($\Delta\theta = 0$; $\mu = 0$).

$$C_1 = \cos \frac{\pi}{2} = 0; \quad S_1 = \sin \frac{\pi}{2} = 1.$$

Коэффициенты в уравнении (14) принимают значения:

$$K_1 = 1; \quad K_2 = 1; \quad K_{12} = -2 \cos \delta.$$

Уравнение (14) имеет вид:

$$\frac{I_A}{I_\Pi} = \frac{1}{2} (1 - \cos \delta \sin 2\beta). \quad (16)$$

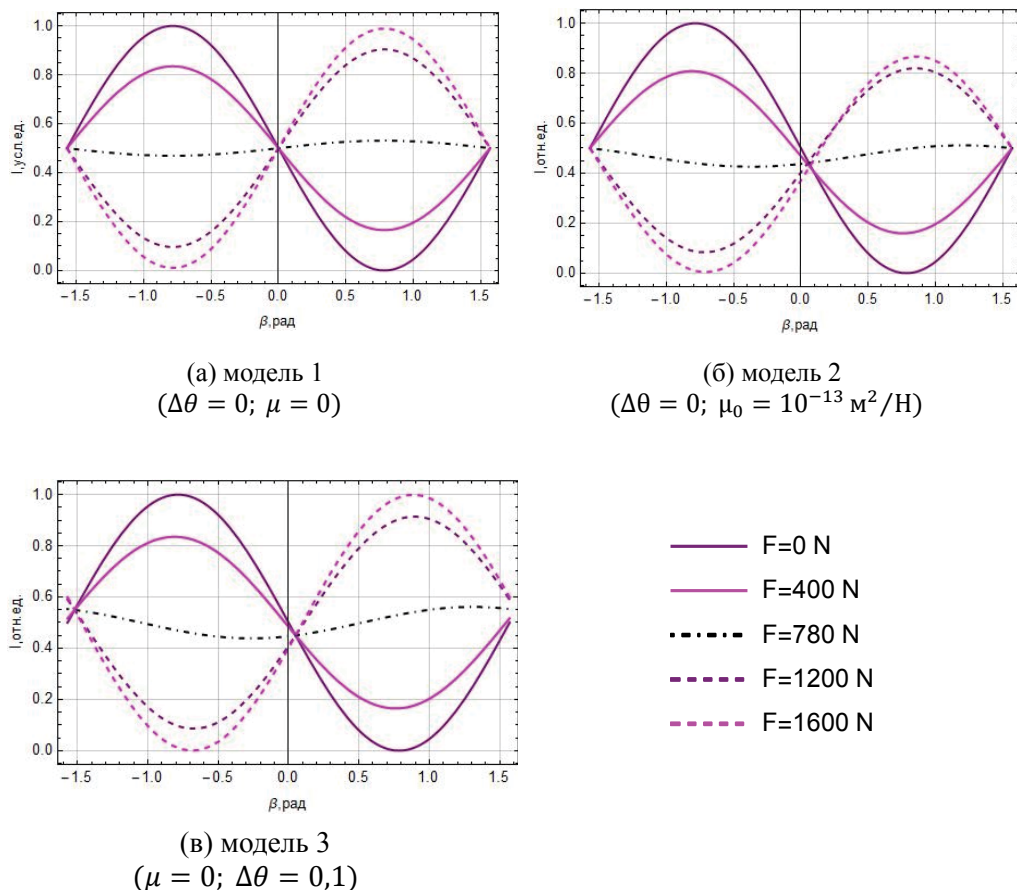


Рис. 5. /Fig. 5 Теоретические азимутальные зависимости относительной интенсивности света, проходящего через нагруженный образец при различных значениях нагрузки / Theoretical azimuthal dependencies of the relative intensity of light passing through a loaded sample at different load values

Источник: данные авторов

Зависимость относительной интенсивности от азимута анализатора, построенная в соответствии с (16) при $C = 2,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ показана на рис. 5(а).

Модель 2. Фазовая пластина по-прежнему ориентирована вертикально, но имеется поглощение ($\Delta\theta = 0$; $\mu \neq 0$). Коэффициенты в уравнении (14) имеют значения:

$$K_1 = \rho^2 = e^{-2\mu}; \quad K_2 = 1; \quad K_{12} = -2\rho \cos \delta = -2e^{-\mu} \cos \delta. \\ \frac{I_A}{I_{\Pi}} = \frac{1}{2}(e^{-2\mu} \cos^2 \beta + \sin^2 \beta - e^{-\mu} \cos \delta \sin 2\beta). \quad (17)$$

Порядок величины коэффициента μ_0 (15) можно оценить из сравнения экспериментальных значений интенсивностей волн, поляризованных в

вертикальном ($\beta = \pm \pi/2$) и горизонтальном направлениях ($\beta = 0$) при различных нагрузках. Это даёт $\mu_0 \sim 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Н}$. Поэтому при $\lambda = 650 \text{ нм}$ и $l = 12 \text{ мм}$, как следует из (15), $\mu \ll 1$. При этом условии формула (17) принимает вид:

$$\frac{I_A}{I_{\Pi}} = \frac{1}{2}(1 - 2\mu \cos^2 \beta - (1 - \mu) \cos \delta \sin 2\beta). \quad (17a)$$

Азимутальная зависимость относительной интенсивности в соответствии с (17a) при $\mu_0 = 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Н}$ представлена на рис. 5б.

Модель 3. Оптическая ось фазовой пластины отклонена от вертикали на малый угол (рис. 2) $\Delta\theta/2$; $\mu = 0$; $\Delta\theta \ll 1$

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \frac{\Delta\theta}{2}.$$

$$K_1 \cong 1 - \Delta\theta(1 - \cos \delta), \quad (18a)$$

$$K_2 \cong 1 + \Delta\theta(1 - \cos \delta), \quad (18б)$$

$$K_{12} \cong -2 \cos \delta. \quad (18в)$$

Азимутальная зависимость относительной интенсивности в этой модели:

$$\frac{I_A}{I_{\Pi}} = \frac{1}{2}(1 - \Delta\theta(1 - \cos \delta) \cos 2\beta - \cos \delta \sin 2\beta). \quad (19)$$

График азимутальной зависимости в соответствии с (19) показан на рис. 5(в) при $\Delta\theta = 0,1$.

Анализ рассмотренных теоретических моделей приводит к выводу о необходимости учёта как наведённого поляризационного дихроизма, так и отклонения оптической оси, помимо двулучепреломления, обусловленного приложенной к образцу нагрузки, для полного анализа азимутальных зависимостей интенсивности.

Коэффициенты общего уравнения (14) при $\mu \ll 1$ и $\Delta\theta \ll 1$ можно представить в виде:

$$K_1 \cong (1 - 2\mu) - \Delta\theta(1 - \cos \delta), \quad (20a)$$

$$K_2 \cong 1 + \Delta\theta(1 - \cos \delta), \quad (20б)$$

$$K_{12} \cong -2(1 - \mu) \cos \delta \quad (20в)$$

Относительная интенсивность (14):

$$I_{\text{отн}} = \frac{I_A}{I_{\Pi}} = \frac{1}{2}(1 - 2\mu \cos^2 \beta - \Delta\theta(1 - \cos \delta) \cos 2\beta - (1 - \mu) \cos \delta \sin 2\beta) \quad (21)$$

Из условия экстремумов функции можно найти значения азимутальных углов β анализатора, при которых интенсивности принимают максимальные и минимальные значения:

$$\beta_{min} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{(1 - \mu) \cos \delta}{\mu + \Delta\theta(1 - \cos \delta)} \right) \quad (22)$$

$$\beta_{max} = \frac{1}{2} \left(\tan^{-1} \left(\frac{(1 - \mu) \cos \delta}{\mu + \Delta\theta(1 - \cos \delta)} \right) - \pi \right) \quad (23)$$

Из анализа формул следует, что значения углов зависят от нагрузки (входит в разность фаз δ), от параметра $\mu(F)$, характеризующего поляризационный дихроизм, и от $\Delta\theta$ (отклонение оптической оси образца от вертикали).

Заметим, что при $\Delta\theta = 0$; $\mu = 0$ выражения (22) и (23) дают значения:

$$\beta_{min} = \frac{\pi}{4}; \quad \beta_{max} = -\frac{\pi}{4}$$

Это видно и на графике (рис. 6), причём значения углов, при которых наблюдаются экстремумы интенсивности, не зависят от нагрузки. Однако и теория, и эксперимент (рис. 3) показывают, что углы β_{min} ; β_{max} зависят от нагрузки.

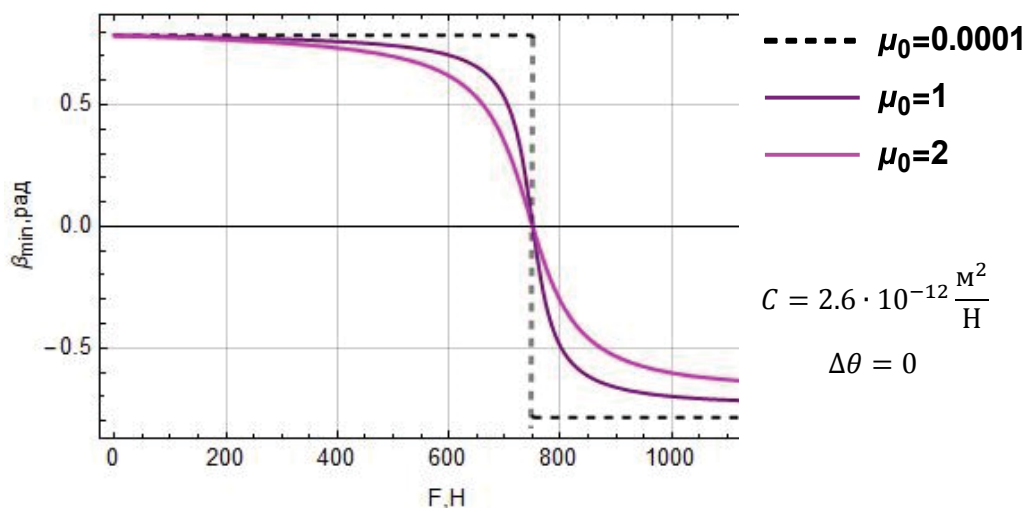


Рис. 6 / Fig. 6. Теоретические зависимости β_{min} от нагрузки / Theoretical dependence of β_{min} on load

Источник: данные автора

Общая формула (21) использовалась для аппроксимации экспериментальных азимутальных зависимостей интенсивности света, проходящего через образец, подвергнутый нагрузке (рис. 7).

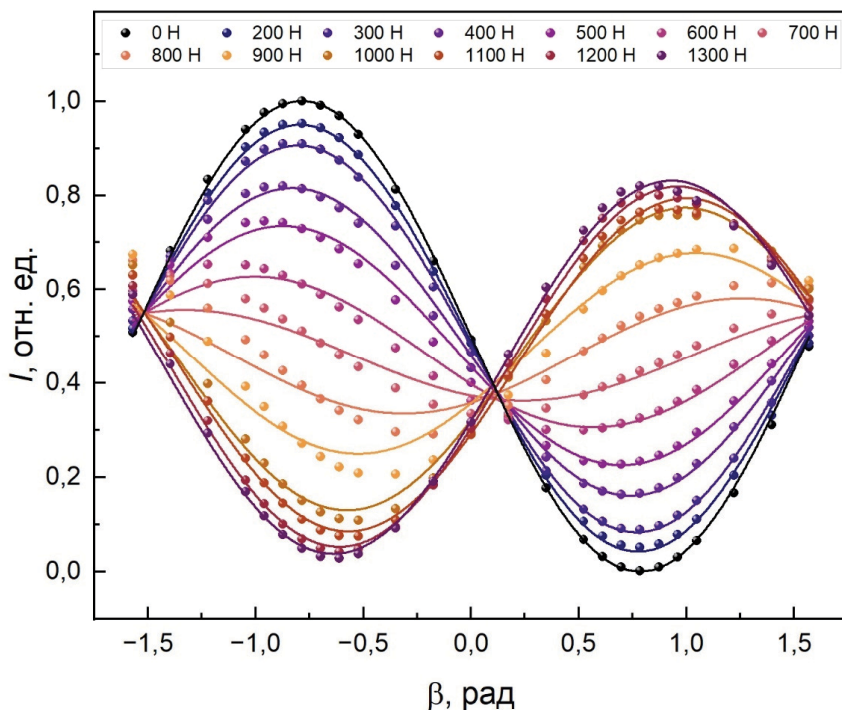


Рис. 7 / Fig. 7. Аппроксимация экспериментальных азимутальных зависимостей интенсивности света в соответствии с (21) / Approximation of experimental azimuthal dependencies of light intensity according to (21)

Источник: данные автора

На рис. 8 показана экспериментальная зависимость азимутального угла β_{min} , при котором наблюдается минимум интенсивности света, выходящего из системы, от величины нагрузки.

Экспериментальные значения находятся в удовлетворительном согласии с теорией. Аппроксимация проводилась в соответствии с формулой (22).

Таким образом, в результате аппроксимации экспериментальных азимутальных зависимостей интенсивности при фиксированном значении фотоупругого коэффициента $C = 2.6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ получены значения коэффициента поляризационного дихроизма $\mu_0 = (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{Н}$ и угла отклонения оптической оси образца $\Delta\theta = 0,1$.

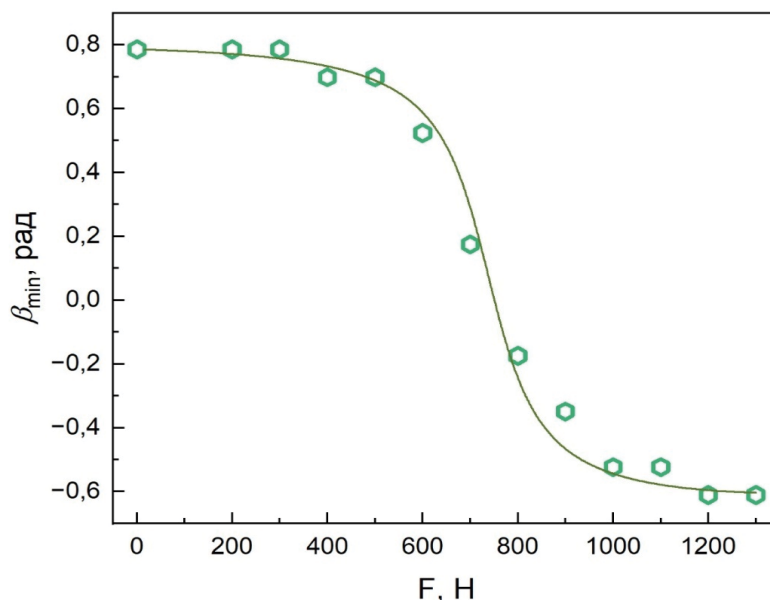


Рис. 8 / Fig. 8. Зависимость азимутального угла, соответствующего минимальной интенсивности света, от величины нагрузки / Dependence of the azimuthal angle corresponding to the minimum light intensity on the load value

Источник: данные автора

Заключение

В ходе выполнения экспериментального исследования установлено влияние ряда факторов на величину интенсивности поляризованного света, проходящего через нагруженный образец. К их числу относится, прежде всего, возможное отклонение оптической оси образца от направления приложенной силы. Это обусловлено целым рядом причин: непараллельность граней образца может быть причиной сдвиговых напряжений, которые, в свою очередь, приводят к отклонению оптической оси; конструкция и способы крепления пресса также могут приводить к разориентации оптической оси. Установлен эмпирический коэффициент μ_0 , отвечающий за поляризационный дихроизм, обусловленный внешней нагрузкой на образец. Экспериментально полученные результаты находятся в удовлетворительном согласии с предсказанными соответствующими теоретическими моделями.

Разработанные методики имеют практическую ценность, поскольку позволяют перейти на качественно новый уровень измерений интенсивности света в поляризационно-оптическом методе исследования напряжённого состояния.

Простота и надёжность используемой экспериментальной установки позволяет использовать её не только в научных целях, но и для выполнения лабораторных работ в рамках освоения дисциплин «Оптика», «Общая и экспериментальная физика» студентами различных направлений подготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрохт М. М. Фотоупругость: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений: в 2 т. Т. 1. М., Л.: Гостехиздат, 1948-1950. 432 с.
2. Партон В. З. Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.
3. Residual stresses in glass after molding and its influence on optical properties / A. Yi, B. Tao, F. Klocke, O. Dambon, F. Wang // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 19. No. 2. P. 402–406. DOI:10.1016/j.proeng.2011.11.132.
4. Research on stress through photoelastic experiment and finite element method considering sliding wear / T. Yang, Y. Wei, J. Han, Z. Chen // *Journal of Measurements in Engineering*. 2024. Vol. 12. No. 2. P. 324–332. DOI: 10.21595/jme.2024.23791.
5. Степанова Л. В. Цифровая фотоупругость и её применение для задач механики разрушения: учебное пособие обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 01.04.03 Механика и математическое моделирование и по специальности 01.05.01 Фундаментальная математика и механика. Самара: Издательство Самарского университета. 2021. 66 с.
6. Vargas-Isaza C. A., Posada J., Briñez-de León J. C. Analysis of the Stress Field in Photoelasticity Used to Evaluate the Residual Stresses of a Plastic Injection-Molded Part // *Polymers*. 2023. No. 15 (16). Article ID 3377. DOI: 10.3390/polym15163377.
7. Biomechanical behavior of tilted abutment after fixed partial denture restoration of CAD /CAM materials / T. Zhu, J. Chen, Y. Xu, Z. Zhu, J. Wang et al. // *BMC Oral Health*. 2024. Vol. 24. Article no. 1128. DOI: 10.1186/s12903-024-04890-7.
8. Sobczak M., Asejczyk M., Wilczyński M. The effect of pupil size on the measurement of corneal birefringence properties: preliminary study // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article no. 17439 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-44706-2.
9. Сизов М. Н., Васильчикова Е. Н., Константинов М. С. Исследование искусственной оптической анизотропии, обусловленной механическим воздействием, поляризационно-оптическим методом // Молодёжная петербургская школа-конференция инженеров-педагогов: сборник материалов научной конференции (Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2025 года). СПб.: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2025. С. 73–75.
10. Кесаев В. В. Метод изоплах в неполяризованном свете // *Письма в Журнал технической физики*. 2022. Т. 48. № 22. С. 43–46. DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53807. 19360.
11. Лихачев А. В., Табанюхова М. В. Новый алгоритм обработки данных метода фотоупругости // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 79. С. 100–110. DOI: 10.17223/19988621/79/9.
12. Джерард А., Бёрч Дж. М. Введение в матричную оптику / пер. с англ. А. И. Божкова и Д. В. Власова; под ред. В. В. Коробкина. М.: Мир, 1978. 342 с.
13. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет / пер. с англ. под ред. А. В. Ржанова и К. К. Свиташева. М.: Мир, 1981. 583 с.

REFERENCES

1. Frokht, M. M. (1948–1950). Photoelasticity: The polarization-optical method of stress research: in 2 volumes. Vol. 1. Moscow, Leningrad: Gostekhizdat publ. (in Russ.).
2. Parton, V. Z. (1990). Fracture mechanics: from theory to practice. Moscow: Nauka publ. (in Russ.).
3. Yi, A., Tao, B., Klocke, F., Dambon, O. & Wang, F. (2011). Residual stresses in glass after molding and its influence on optical properties. In: Procedia Engineering, 19 (2), 402–406. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.132.
4. Yang, T., Wei, Y., Han, J. & Chen, Z. (2024). Research on stress through photoelastic experiment and finite element method considering sliding wear. In: Journal of Measurements in Engineering, 12 (2), 324–332. DOI:10.21595/jme.2024.23791.
5. Stepanova, L. V. (2021). Digital photoelasticity and its application to fracture mechanics: a textbook for students of the main educational programs of higher education in the field of 01.04.03 mechanics and mathematical modeling and in the speciality 01.05.01 fundamental mathematics and mechanics. Samara: Samara University publ. (in Russ.).
6. Vargas-Isaza, C. A., Posada, J. & Briñez-de León, J. C. (2023). Analysis of the Stress Field in Photoelasticity Used to Evaluate the Residual Stresses of a Plastic Injection-Molded Part. In: Polymers, 15 (16), 3377. DOI: 10.3390/polym15163377.
7. Zhu, T., Chen, J., Xu, Y., Zhu, Z., Wang, J. et al. (2024). Biomechanical behavior of tilted abutment after fixed partial denture restoration of CAD /CAM materials. In: BMC Oral Health, 24, 1128. DOI:10.1186/s12903-024-04890-7.
8. Sobczak, M., Asejczyk, M. & Wilczyński, M. (2023). The effect of pupil size on the measurement of corneal birefringence properties: preliminary study. In: Scientific Reports, 13, 17439 (2023). DOI:10.1038/s41598-023-44706-2.
9. Sizov, M. N., Vasilchikova, E. N. & Konstantinov, M. S. (2025). Study of artificial optical anisotropy caused by mechanical action using the polarization-optical method. In: Youth St. Petersburg school-conference of engineers and teachers: collection of materials of the scientific conference (St. Petersburg, April 22–23, 2025). St. Petersburg.: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University publ., pp. 73–75 (in Russ.).
10. Kesaev, V. V. (2022). Isopachic method with unpolarized light. In: Technical Physics Letters, 48 (22), 43–46. DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53807.19360 (in Russ.).
11. Likhachev, A. V. & Tabanyukhova, M. V. (2022). A new processing algorithm for photoelasticity method data. In: Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 79, 100–110 DOI: 10.17223/19988621/79/9 (in Russ.).
12. Gerard, A. & Birch, J. M. (1978). Introduction to Matrix Optics. Moscow: Mir publ. (in Russ.).
13. Azzam, R. & Bashara, N. (1981). Ellipsometry and Polarized Light. Moscow: Mir publ. (in Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сизов Михаил Николаевич (г. Руза, Московская область) – инженер кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
e-mail: misha-siz@mail.ru

Константинов Михаил Сергеевич (г. Дедовск, Московская область) – заведующий учебной лабораторией кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения
e-mail: jawa-m.k.s.@mail.ru

Васильчикова Елена Николаевна (г. Люберцы, Московская область) – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры фундаментальной физики и нанотехнологии Государственного университета просвещения;
<https://orcid.org/0000-0003-3311-1228>; e-mail: en.vasilchikova@guppros.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail N. Sizov (Ruza, Moscow Region) – engineer, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;
e-mail: misha-siz@mail.ru

Mikhail S. Konstantinov (Dedovsk, Moscow Region) – Laboratory Head, Educational Laboratory, Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;
e-mail: jawa-m.k.s.@mail.ru

Elena N. Vasilchikova (Lyubertsy, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Fundamental Physics and Nanotechnology, Federal State University of Education;
<https://orcid.org/0000-0003-3311-1228>; e-mail: en.vasilchikova@guppros.ru