

Научная статья

УДК 620.171.5; 004.932

doi: 10.17223/19988621/79/9

Новый алгоритм обработки данных метода фотоупругости

Алексей Валерьевич Лихачев¹, М. В. Табанюхова²

¹ *Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия*

² *Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), Новосибирск, Россия*

¹ *ipm1@iae.nsk.su*

² *m.tabanyukhova@sibstrin.ru*

Аннотация. Метод фотоупругости является надежным способом исследования плоского напряженного состояния материалов. Регистрируемые данные представляют собой интерферограммы. Ставится цель автоматизировать процесс их расшифровки. Настоящая работа в основном посвящена формированию набора задач, которые предстоит решить для ее достижения. Некоторые из них авторами уже решены, и здесь представлены полученные результаты. Наибольшее внимание уделено описанию алгоритма трассировки интерференционных полос, основанного на анализе градиента изображения яркости.

Ключевые слова: метод фотоупругости, обработка изображений, трассировка интерференционных полос

Для цитирования: 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

Original article

A new processing algorithm for photoelasticity method data

Aleksey V. Likhachev¹, Marina V. Tabanyukhova²

¹ *Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering,
Novosibirsk, Russian Federation*

¹ *ipm1@iae.nsk.su*

² *m.tabanyukhova@sibstrin.ru*

Abstract. The photoelasticity method is a reliable tool for studying the stress state of flat elements in building structures using the models made of optically sensitive materials. In this paper, the classical photoelasticity is considered. The experimental data obtained with the use of the method are presented as interferograms. A decoding procedure implies the obtaining of some normal and tangential stress values in the plane of the model.

The polarization-projection installations that are used in optical methods are rather simple. However, the digital processing of the images obtained during the loaded model transmission requires high-intelligent software. Nowadays, national and international laboratories, working with polarization-optical methods, strive to develop digital photoelasticity. For some reasons, the authors of the presented work needed to develop their own algorithms for decoding experimental data of the photoelasticity method. This work is mainly devoted to a formulation of the problems to be solved. Some of them have already been solved, and the results obtained are presented here. The authors place special emphasis on the description of the algorithm for tracing of interference fringes based on the analysis of the image gradient.

Keywords: photoelasticity method, image processing, tracing of interference fringes

For citation: Likhachev, A.V., Tabanyukhova, M.V. (2022) A new processing algorithm for photoelasticity method data. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 100–110. doi: 10.17223/19988621/79/9

Введение

Метод фотоупругости – один из экспериментальных методов исследования напряжений, отличающийся высокой наглядностью результатов. В настоящее время он используется как нашими соотечественниками, так и зарубежными учеными в различных областях науки, а также в медицине. В частности, в стоматологии фотоупругий анализ позволяет выполнять качественную и количественную оценку распределения напряжений в моделях зубных протезов [1, 2], в офтальмологии его применяют для исследования роговицы глаза [3], в сосудистой хирургии с его помощью определяют напряжения в моделях кровеносной сети сосудов [4, 5]. Этим же методом изучают напряжения в массивах горных пород [6]. Его используют в машиностроении, для измерения деформаций в схемах пьезооптических датчиков [7], а также для исследования напряженного состояния деталей [8]; в авиационной промышленности – при расчете и проектировании элементов летательных аппаратов [9]. Особенно широко представлены исследования с применением метода фотоупругости в строительстве: при изучении напряженно-деформированного состояния строительных сооружений и их элементов как с помощью моделей из пьезооптических материалов [10–13], так и путем нанесения на участки натуральных конструкций фотоупругих покрытий [14, 15].

Основой метода фотоупругости является эффект двойного лучепреломления, возникающий в прозрачных материалах, приобретающих под действием деформаций оптическую анизотропию [16]. Методика решения плоских линейно-упругих задач хорошо развита и детально проработана [16–18]. Поляризационно-оптические методы в двумерной постановке разработаны еще более века назад, а в наши дни обработка экспериментальных данных метода фотоупругости развита настолько хорошо, что этот метод можно применять не только при проведении научных исследований, но и в строительной практике. Высока эффективность численных методов разделения напряжений за счет использования компьютеров [18]. В последнее время ученые предпринимают шаги по автоматизации обработки и расшифровки данных метода фотоупругости [19]. Было бы удобно, располагая цифровым изображением изохром и изоклин, автоматически получать поля нормальных и касательных напряжений. Авторы настоящей работы занимаются исследованием в этом направлении.

Плоская задача

Теория. Значения пьезооптических величин, связанных с тензором диэлектрической проницаемости, можно определить посредством использования поляризационно-проекционной установки (рис. 1). При просвечивании нагруженной прозрачной модели поляризованным светом на экране отображается интерферограмма, имеющая связь с напряженно-деформированным состоянием образца. Просвечивание вдоль нормали к плоскости модели позволяет узнать оптическую разность хода, а также определить направления главных осей тензора диэлектрической проницаемости.

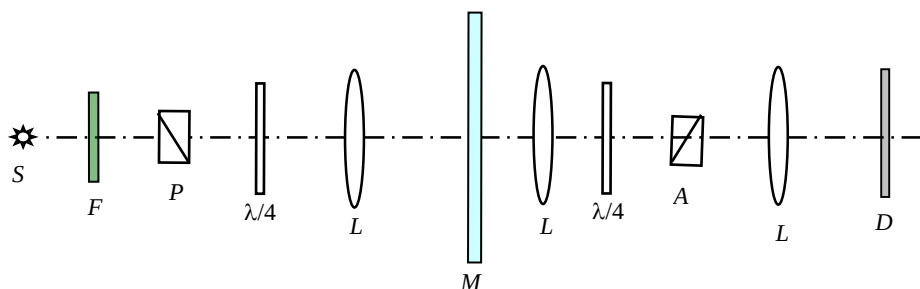


Рис. 1. Схема установки ППУ-7: S – источник света, F – светофильтр, P – поляризатор, A – анализатор, M – исследуемая модель, $\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка, L – линзы, D – экран

Fig. 1. Scheme of the PPU-7 installation: S is the light source, F is the light filter, P is the polarizer, A is the analyzer, M is the model under study, $\lambda/4$ is the quarter-wave plate, L is the lens, and D is the screen

Зондирование образца под нагрузкой белым плоско поляризованным светом приводит к появлению темных полос, хорошо видных на цветной интерферограмме (они соответствуют тем областям, где направление одной из главных осей диэлектрического тензора совпадает с направлением плоскости поляризации). Их принято называть оптическими изоклинами. Поскольку в случае упругого деформирования изначально изотропного материала углы наклона главных осей диэлектрического тензора совпадают с углами наклона главных напряжений, то и оптические и механические изоклины совпадают. Механическая изоклина – это линия, соединяющая точки с одинаковым направлением главных напряжений.

Интерферограмма, занимающая все поле образца, как правило, снимается в монохроматическом свете, обычно зеленом, имеющем длину волны $\lambda = 541$ нм [18]. Полоса интерференции – это геометрическое место точек, в которых оптическая разность хода одинакова и может быть записана как $\delta = m\lambda$, здесь m – порядок полосы. В классической теории фотоупругости оптическая разность хода имеет линейную связь с разностью главных в плоскости напряжений σ_1 и σ_2 . Эту зависимость называют законом Вертгейма: $\delta = C_\sigma d(\sigma_1 - \sigma_2)$. Здесь C_σ – оптическая постоянная по напряжениям, d – толщина модели [18]. При расшифровке интерференционной картины важным параметром является цена полосы материала по напряжениям $\sigma_0^{1,0}$, имеющая размерность МПа·см на одну полосу. Она равна разности главных напряжений, вызывающей в модели толщиной $d = 1$ см воз-

никновение одной полосы. Ее находят путем тарировочных испытаний [18] по формуле $\sigma_0^{1,0} = d(\sigma_1 - \sigma_2)/m$.

Для изготовления моделей при решении упругих задач используют прозрачные полимеры [17], характеристики нескольких представлены в таблице.

Характеристики оптически-чувствительных материалов

№ п/п	Название оптически чувствительного материала	Модуль Юнга E , МПа	Цена полосы материала по напряжениям $\sigma_0^{1,0}$, кПа·см	Коэффициент Пуассона ν
1	Оргстекло марки Э2	3 500	1 650	0.4
2	Эпоксидная смола	3 000–4 000	1 300–1 800	0.38
3	СКУ-6	4.0	22	0.5
4	Солитан-113	2.7	19	0.47
5	Хизол-4485	3.0–4.0	16	0.46
6	СКУ-ПФЛ	30.,0	600	0.46
7	СКУ-7Л	11.0	160	0.48

По результатам поляризации-оптических исследований в случае упругого линейного деформирования по картине полос интерференции можно оценить прочность конструкции или ее элементов. В том случае, когда есть необходимость выделения напряжений (нормальных и касательных), выполняют процедуру их разделения. Классическая теория фотоупругости располагает некоторым количеством методов раздельного получения напряжений, к ним относят экспериментальные и численные [18]. В случае выполнения условия Леви–Мичелла исследования упругих задач при плоской деформации производят на моделях, претерпевающих плоское напряженное состояние, этому сопутствует пересчет упругих постоянных [18].

Получение раздельных значений напряжений ведут посредством численного интегрирования одного из двух уравнений равновесия (для оси X или оси Y). В случае отсутствия объемных сил они имеют вид:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

По интерферограммам, представляющим собой поля изохром и изоклин, зная цену полосы материала по напряжениям $\sigma_0^{1,0}$, получают разность главных в плоскости модели напряжений ($\sigma_1 - \sigma_2$), далее разность нормальных напряжений ($\sigma_x - \sigma_y$) и касательные напряжения τ_{xy} . Интегрировать уравнения (1) начинают, как правило, с незагруженного контура, так как там реализуется линейное напряженное состояние. Для проверки правильности полученных результатов рассматривают равновесие отсеченной части образца, а также сопоставляют значения напряжений при выходе на противоположный свободный контур.

Техника эксперимента. Фотоупругий анализ моделей, выполненных из прозрачных оптически чувствительных материалов, реализуют посредством их просвечивания на оптических установках. На рис. 1 представлена схема поляризационно-проекционной установки ППУ-7 [18], которую используют авторы данной работы в своих экспериментах. Образцы были изготовлены из оргстекла марки Э2 отечественного производства. Выпиливали их вручную, чтобы избежать воз-

никновения остаточных деформаций. Пример получаемой картины полос интерференции приведен на рис. 2.

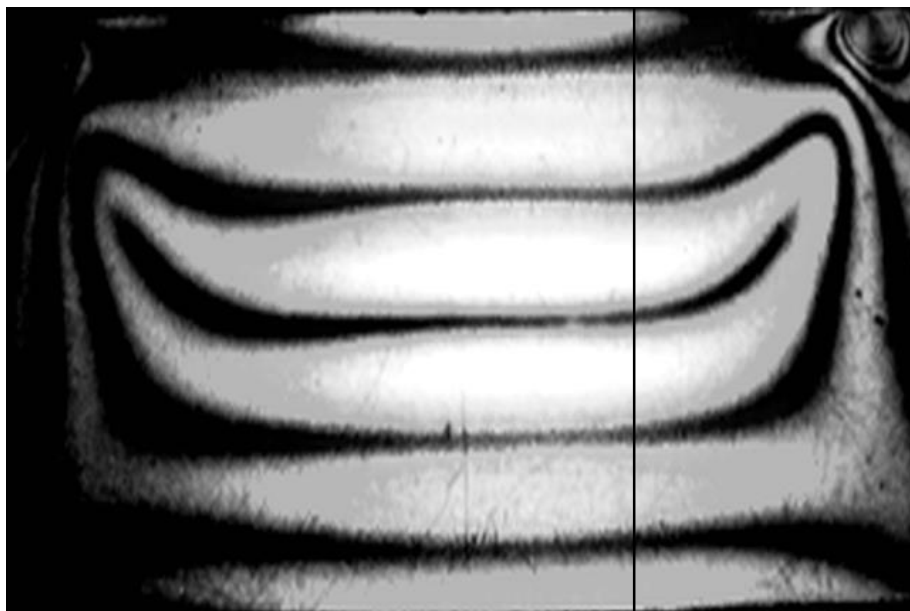


Рис. 2. Исходное изображение
Fig. 2. Original image

Предлагаемый алгоритм

Для решения проблемы автоматической расшифровки интерференционной картины в первую очередь требуется нумерация полос. Однако эта задача до сих пор не решена в полном объеме. В частности, применяемая для этой цели трассировка [20, 21] в общем случае позволяет лишь установить принадлежность точки рассматриваемой области. Другим подходом является исследование особенностей изображения [22], но их привязка к опорным пунктам интерферограммы, как правило, не производится. Это было проделано в недавней работе авторов [23], где разработан алгоритм оценки расстояния от произвольной точки до центра полосы. Предлагаемый здесь метод использует изменение яркости в направлении, перпендикулярном полосам.

Пусть имеющаяся интерференционная картина представляет собой оцифрованное полутоновое изображение размером $N \times M$ пикселей. Ставится следующая задача: автоматически найти интерференционные полосы и для каждой из них определить изменения ее направления. Сопоставим изображению неотрицательную функцию $f(i, j)$ ($0 \leq i \leq N - 1$; $0 \leq j \leq M - 1$), заданную на сетке, узлы которой находятся в центрах пикселей. Для определенности предположим, что изображение имеет однобайтовый формат, тогда естественно считать, что $f(i, j)$ принимает целочисленные значения от 0 до 255. При этом для наиболее темных пикселей $f(i, j) = f_{\min} = 0$, а для самых светлых $f(i, j) = f_{\max} = 255$.

Ситуация осложняется тем, что зарегистрированные данные всегда содержат случайные искажения, называемые шумом. В настоящее время наиболее распространённой является аддитивная модель [24]:

$$f(i, j) = f^0(i, j) + \xi(i, j), \quad (2)$$

где $f^0(i, j)$ – функция, соответствующая неискаженному изображению; $\xi(i, j)$ – двумерное случайное поле. Пусть D – дисперсия шума, а $D^{1/2}$ – его стандартное отклонение. Если $D^{1/2}$ сравнимо с разностью амплитуд деталей, которые нужно различить, требуются специальные процедуры для подавления шума. Чаще всего это низкочастотная фильтрация, в том числе адаптивная [24, 25]. Однако иногда она приводит к потере важной информации. Предложенный в [26] метод, основанный на разложении по вейвлетам, может обеспечить меньшие искажения распознаваемой структуры.

Сориентируем изображение так, чтобы интерференционные полосы были преимущественно направлены по горизонтали (см. рис. 2). Строки будем нумеровать индексом i . Рассмотрим функции

$$F_j(k) = \sum_{i=kn}^{(k+1)n-1} f(i, j), \quad k = 0, 1, \dots, [N/n]. \quad (3)$$

В (3) квадратные скобки означают целую часть числа; при $k = [n/N]$ верхним пределом суммирования является $N - 1$. Обозначим через Δ_k интервал целых чисел от kn до $(k + 1)n - 1$ (включительно), а через ΔF_j^k – разность $F_j(k + 1) - F_j(k)$; здесь $k = 1, 2, \dots, [n/N]$. Зафиксируем произвольный индекс $j = j_c$. Предположим, что при некотором $i_{\max}^{0k} \in \Delta_k$ функция $f^0(i, j_c)$ имеет локальный максимум, а на следующем интервале Δ_{k+1} его не имеет. Тогда если $f^0(i, j_c)$ достаточно гладкая, и имеет место $D^{1/2}/f_{av} \ll 1$, где f_{av} – среднее значение функции $f(i, j)$ по изображению, то с большой вероятностью $\Delta F_j^k > \Delta F_j^{k+1}$. В разработанном методе выполнение этого неравенства рассматривается как условие принадлежности окрестности пикселя $(i_{\max}^{0k}, j_c)$ внутренней области интерференционной полосы.

Пусть

$$f(i_{\max}^k, j) = \max_{i \in \Delta_k} f(i, j_c). \quad (4)$$

Таким образом, $i_{\max}^k$ – это аргумент, при котором функция $f(i, j_c)$ имеет максимальное значение на интервале Δ_k . Он и берется в качестве оценки для $i_{\max}^{0k}$. Поскольку j_c принимает любое значение от 0 до $M - 1$, пиксели $(i_{\max}^k, j)$, где $j \in [0; M - 1]$, могут служить маркерами для интерференционных полос на всем их протяжении. При этом возможны случаи, когда $i_{\max}^{0k} \neq i_{\max}^k$, т.е. метка не совпадает с локальным максимумом. Однако очевидно, что пиксель $(i_{\max}^k, j_c)$ тоже лежит на интерференционной полосе. Отметим, что описанным способом находятся также локальные минимумы функций $f^0(i, j_c)$, которые легко можно отличить от максимумов по яркости. Следовательно, разработанный подход может быть применен и для трассировки темных полос.

Тестирование метода показало, что его эффективность существенно зависит от величины параметра n . По результатам проведенных исследований оптимальное значение оказалось приблизительно равным средней полуширине полос. Исходя из этого n определялось следующим образом. Пусть K – число пересечений полос с вертикальной прямой, проходящей через центр изображения, причем считается,

что для каждой замкнутой полосы таких пересечений два, как, например, на рис. 2, для которого $K = 6$.

Обозначим через n_w и n_b количества пикселей, составляющих светлые полосы и разделяющие их темные области соответственно. Причем полагается, что каждый пиксель относится либо к первой, либо ко второй группе, поэтому сумма $n_w + n_b$ равняется NM . Оценим n_w аналогично тому, как это было сделано в работе [27]:

$$n_w = \left[\frac{f_{av} - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} NM \right] = \left[\frac{f_{av}}{255} NM \right]. \quad (5)$$

Предположим, что полосы представляют собой прямоугольники размером $2n \times M$; тогда $n_w = 2nMK$, откуда

$$n_w = \left[\frac{n_w}{2MK} \right] = \left[\frac{f_{av}}{510K} \right]. \quad (6)$$

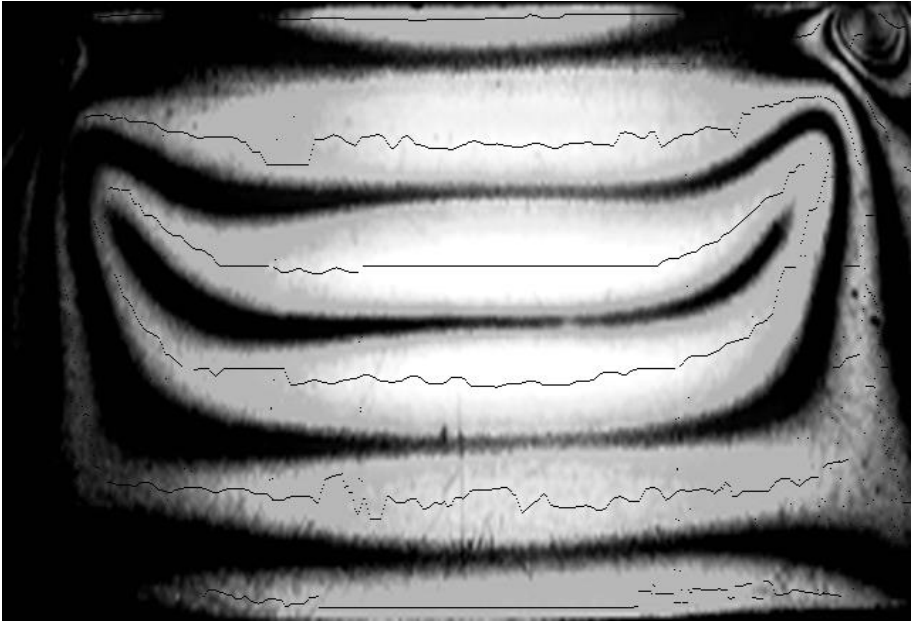


Рис. 3. Изображение с нанесенной трассировкой интерференционных полос
Fig. 3. Image with applied tracing of interference fringes

На рис. 3 представлено изображение, полученное в результате применения разработанного метода к интерференционной картине на рис. 2. Видно, что там, где функция $f(i, j)$, характеризующая изображение, обладает указанными выше свойствами, полосы почти полностью трассированы, включая те места, где они меняют направление. Артефакты наблюдаются лишь в областях существования разрывов $f(i, j)$ или ее производных. В связи с этим на следующем этапе исследования планируется разработка методов повышения гладкости функции $f(i, j)$, основанных на адаптивной фильтрации.

Заключение

В работе предложен простой, но тем не менее достаточно эффективный алгоритм трассировки интерференционных полос, основанный на анализе распределения градиента яркости полутонового изображения. Он не требует большого количества априорной информации и способен работать без участия оператора. Алгоритм был опробован на экспериментальных данных метода фотоупругости. Найденные трассы визуально хорошо повторяют изменения направлений полос.

Список источников

1. Демидова И.И. Фотоупругость и стоматология // Российский журнал биомеханики. 1999. № 2. С. 26–27.
2. Котенко М.В., Раздорский В.В., Лелявин А.Б. Поляризационно-оптический метод в исследовании напряженно-деформированного состояния моделей с дентальными имплантатами из нитинола // Сибирский медицинский журнал. 2018. № 8. С. 34–38.
3. Кочина М.Л., Демин Ю.А., Каплин И.В., Ковтун Н.М. Модель напряженно-деформированного состояния роговицы глаза // Восточно-европейский научный журнал. 2017. № 2-2. С. 62–67.
4. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Negoro M. Three-dimensional visualization of photoelastic stress analysis for catheter insertion robot // Proceedings of 23rd IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Taipei, 2010. P. 879–884. doi: 10.1109/IROS.2010.5650275
5. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Arai F., Negoro M., Takahashi I. Photoelastic stress analysis in blood vessel phantoms: three-dimensional visualization and saccular aneurysm with bleb // International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2011. V. 7 (1). P. 33–41. doi: 10.1002/rcs.365
6. Feng W., Laishou L., Junhua Z., Chun Y., Yue W. Research on the effect of bedrock upon the stress of a gravity dam bulk by the photoelastic method // Journal of Materials Processing Technology. 2002. V. 123 (2). P. 236–240. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01185-2
7. Паулиш А.Г., Сидоров В.И., Федоринин В.Н., Шатов В.А. Пьезооптический датчик деформации и метод контроля параметров движения подъемных механизмов // Известия высших учебных заведений // Приборостроение. 2018. № 6. С. 530–538.
8. Xi X., Wong G.K.L., Weiss T., Russell P.S.J. Measuring mechanical strain and twist using helical photonic crystal fiber // Optics Letters. 2013. V. 38 (24). P. 5401–5404. doi: 10.1364/OL.38.005401
9. Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. № 1. С. 82–89.
10. Морозова Д.В., Серова Е.А. Исследование влияния конструктивного решения узлов металлических конструкций при вариантном проектировании // Экология и строительство. 2015. № 2. С. 4–8.
11. Попова М.В., Шохин П.Б., Глебова Т.О., Шабардина Н.Д. Особенности инженерного расчета деревокомпозитных конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 8. С. 36–43.
12. Zerkal S.M., Kharinova N.V., Tabanyukhova M.V. Investigation of stress state in plane truss nodes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. Bristol : IOP Publishing Ltd., 2020. Art. 012008. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012008.
13. Албаут Г.Н., Матус Е.П., Табанюхова М.В. Исследование напряженного состояния дисперсно-армированных балок с привлечением метода фотоупругости // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 4. С. 46–48.

14. Ахметзянов Ф.Х. Влияние поверхности бетонных и железобетонных элементов на повреждаемость (часть 2) // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 1. С. 96–101.
15. Маковецкая-Абрамова О.В., Хлопова А.В., Маковецкий В.А. Исследование концентрации напряжений при сварке трубопроводов // Техника-технологические проблемы сервиса. 2014. № 2. С. 25–27.
16. Дюрелли А., Райли У. Введение в фотомеханику (поляризационно-оптический метод) : пер. с англ. М. : Мир, 1970. 576 с.
17. Метод фотоупругости : в 3 т. / ред. Г.Л. Хесин. М. : Стройиздат, 1975. Т. 1: Решение задач статики сооружений. Метод оптически чувствительных покрытий. Оптически чувствительные материалы. 460 с.
18. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М. : Наука, 1973. 576 с.
19. Степанова Л.В., Долгих В.С. Цифровая обработка результатов оптоэлектронных измерений. Метод фотоупругости и его применение для определения коэффициентов многопараметрического асимптотического разложения М. Уильямса поля напряжений // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. 2017. № 4. С. 717–735.
20. Baek T.H., Kim M.S., Hong D.P. Fringe analysis for photoelasticity using image processing techniques // International Journal of Software Engineering and its Applications. 2014. V. 8 (4). P. 91–102. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.4.11
21. Косыгин А.Н., Косыгина Л.Н. Цифровая обработка экспериментальных интерферограмм, полученных методом фотоупругости // Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2019. № 2. С. 75–91.
22. Surendra K.V.N., Simha K.R.Y. Digital image analysis around isotropic points for photoelastic pattern recognition // Optic Engineering. 2015. V. 54 (8). Art. 081209. doi: 10.1117/1.OE.54.8.081209
23. Лихачев А.В., Табанохова М.В. Оценка расстояния от заданной точки до максимума интерференционной полосы // Автометрия. 2021. № 3. С. 30–38. doi: 10.15372/AUT20210304
24. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. СПб. : Питер, 2007. 751 с.
25. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. 3-е изд. М. : Техносфера, 2012. 1072 с.
26. Лихачев А.В. Новый алгоритм повышения контраста мелкомасштабных деталей изображения на основе разложения по вейвлетам // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 44–48.
27. Лихачев А.В. Модифицированный метод обнаружения мелких структур на зашумленных изображениях // Автометрия. 2019. № 6. С. 55–63. doi: 10.15372/AUT20190607

References

1. Demidova I.I. (1999) Photoelasticity and dentistry. *Russian Journal of Biomechanics*. 3(2). pp. 9–10.
2. Kotenko M.V., Razdorskiy V.V., Lelyavin A.B. (2018) Polarizatsionno-opticheskiy metod v issledovanii napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya modeley s dental'nymi implantatami iz nitinola [Use of photoelasticity for stress-strain analysis of models with dental implants made of nitinol]. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal (Irkutsk) – Siberian Medical Journal (Irkutsk)*. 147(8). pp. 34–38.
3. Kochina M.L., Demin Yu.A., Kaplin I.V., Kovtun N.M. (2017) Model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rogovitsy glaza [Model of stress-deformed status of the eye cornea]. *Vostochno-evropeyskiy nauchnyy zhurnal –East European Scientific Journal*. 2(18). pp. 62–67.
4. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Negoro M. (2010) Three-dimensional visualization of photoelastic stress analysis for catheter insertion robot. *Proceedings of the*

- 23rd IEEE/RSJ 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei. pp. 879–884. doi: 10.1109/IROS.2010.5650275
5. Matsushima M., Tercero C., Ikeda S., Fukuda T., Arai F., Negoro M., Takahashi I. (2011) Photoelastic stress analysis in blood vessel phantoms: three-dimensional visualization and saccular aneurysm with bleb. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. 7(1). pp. 33–41. doi: 10.1002/rcs.365
 6. Feng W., Laishou L., Junhua Z., Chun Y., Yue W. (2002) Research on the effect of bedrock upon the stress of a gravity dam bulk by the photoelastic method. *Journal of Materials Processing Technology*. 123(2). pp. 236–240. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01185-2
 7. Paulish A.G., Sidorov V.I., Fedorinin V.N., Shatov V.A. (2018) P'ezoopticheskiy datchik deformatsii i metod kontrolya parametrov dvizheniya pod"iomnykh mekhanizmov [Piezo-optical deformation sensor and method for monitoring movement parameters of lifting mechanisms]. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 61(6). pp. 530–538. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-530-538
 8. Xi X., Wong G.K.L., Weiss T., Russell P.S.J. (2013) Measuring mechanical strain and twist using helical photonic crystal fiber. *Optics Letters*. 38(24). pp. 5401–5404. doi: 10.1364/OL.38.005401
 9. Volkov I.V. (2010) Vnestendovaya spekl-golografiya. Ispol'zovanie golograficheskoy i spekl-interferometrii pri izmerenii deformatsiy naturnykh konstruksiy [Using of holography and speckle interferometry for measuring full-scale construction]. *Komp'yuternaya optika – Computer Optics*. 34(1). pp. 82–89.
 10. Morozova D.V., Serova E.A. (2015) Issledovanie vliyaniya konstruktivnogo resheniya uzlov metallicheskikh konstruksiy pri variantnom proektirovanii [Research of influence of constructive solutions to the nodes of metal structures under random design]. *Ekologiya i stroitel'stvo*. 2. pp. 4–8.
 11. Popova M.V., Shokhin P.B., Glebova T.O., Shabardina N.D. (2018) Osobennosti inzhernogo raschiota derevokompozitnykh konstruksiy [Engineering calculation features of wood-composite designs]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 8. pp. 36–43. doi: 10.12737/article_5b6d5846d16d19.35588118
 12. Zerkal S.M., Kharinova N.V., Tabanyukhova M.V. (2020) Investigation of stress state in plane truss nodes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction. BRISTOL*. 953. Article 012008. doi: 10.1088/1757-899X/953/1/012008
 13. Albaut G.N., Matus E.P., Tabanyukhova M.V. (2009) Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya dispersno-armirovannykh balok s privlecheniem metoda fotouprugosti [Investigation of the stress state of dispersed-reinforced beams using the photoelasticity method]. *Deformatsiya i razrushenie materialov – Russian Metallurgy (Metally)*. 4. pp. 46–48.
 14. Akhmetzyanov F.Kh. (2010) Vliyanie poverkhnosti betonnykh i zhelezobetonnnykh elementov na povrezhdaemost' (chast' 2) [Influence of surface the concretes and reinforced concretes elements on the damage (Part 2)]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 1. pp. 96–101.
 15. Makovetskaya-Abramova O.V., Khlopova A.V., Makovetsky V.A. Issledovanie kontsentratsii napryazheniy pri svarke truboprovodov [Research of concentration of tensions at welding of pipelines]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2. pp. 25–27.
 16. Durelli A.J., Riley W.F. (1965) *Introduction to Photomechanics*. New York: Prentice-Hall.
 17. Khesin G.L. (ed.) (1975) *Metod fotouprugosti. T. 1: Reshenie zadach statiki sooruzheniy. Metod opticheski chuvstvitel'nykh pokrytiy. Opticheski chuvstvitel'nye materialy* [Photoelasticity method. Vol. 1: Solving problems of static structures. Method of optically sensitive coatings. Optically sensitive materials]. Moscow: Stroyizdat.
 18. Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. (1973) *Polyarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruемого tela* [Polarization-optical methods of deformable body mechanics]. Moscow: Nauka.

19. Stepanova L.V., Dolgich V.S. (2017) Tsifrovaya obrabotka rezul'tatov optoelektronnykh izmereniy. Metod fotoupругosti i ego primeneniye dlya opredeleniya koeffitsientov mnogo-parametricheskogo asimptoticheskogo razlozheniya M. Uil'yamsa polya napryazheniy [Digital processing of the results of optoelectronic measurement. The photoelasticity method and its application for determination of coefficients of the multiparameter asymptotic Williams expansion of the stress field]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki – Journal of Samara State Technical University. Physical and Mathematical Sciences*. 21(4). pp. 717–735. doi: 10.14498/vsgtu1544
20. Baek T.H., Kim M.S., Hong D.P. (2014) Fringe analysis for photoelasticity using image processing techniques. *International Journal of Software Engineering and its Applications*. 8(4). pp. 91–102. doi: 10.14257/ijseia.2014.8.4.11
21. Kosygin A.N., Kosygina L.N. (2019) Tsifrovaya obrabotka eksperimental'nykh interferogramm, poluchennykh metodom fotoupругosti. [Digital processing of interferograms obtained by the photoelasticity method]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya – Vestnik of Samara University. Natural Science Series*. 25(2). pp. 75–91. doi: 10.18287/2541-7525-2019-25-2-75-91
22. Surendra K.V.N., Simha K.R.Y. (2015) Digital image analysis around isotropic points for photoelastic pattern recognition. *Optic Engineering*. 54(8). Article 081209. doi: 10.1117/1.OE.54.8.081209
23. Likhachev A.V., Tabanyukhova M.V. (2021) Assessing the distance from a given point to the maximum of interference band. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 57(3). pp. 250–256. doi: 10.3103/S8756699021030109
24. Sergienko A.B. (2007) *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint-Petersburg: Piter.
25. Gonzalez R.C., Woods R.E. (2008) *Digital Image Processing*. New York: Prentice-Hall.
26. Likhachev A.V. (2018) Novyy algoritm povysheniya kontrasta melkomashtabnykh detaley izobrazheniya na osnove razlozheniya po veyvletam [A new algorithm for increasing contrast in small image details based on the decomposition on wavelets]. *Tsifrovaya obrabotka signalov – Digital Signal Processing*. 3. pp. 44–48.
27. Likhachev A.V. (2019) Modified method for detection small structures in noisy images. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 55(6). pp. 580–586. doi: 10.3103/S8756699019060074

Сведения об авторах:

Лихачев Алексей Валерьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия. E-mail: ipm1@iae.nsk.su

Табанюхова Марина Владимировна – кандидат технических наук, заведующая кафедрой строительной механики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), Новосибирск, Россия. E-mail: m.tabanyukhova@sibstrin.ru

Information about the authors:

Likhachev Aleksey V. (Doctor of Technical Sciences, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: ipm1@iae.nsk.su

Tabanyukhova Marina V. (Candidate of Technical Sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: m.tabanyukhova@sibstrin.ru

Статья поступила в редакцию 09.12.2021; принята к публикации 03.10.2022

The article was submitted 09.12.2021; accepted for publication 03.10.2022