

зонирования города, геоэкологического зонирования и использования в задачах территориального планирования и градостроительства.

Наибольшее внимание уделено построению и анализу распределения деревьев и зданий в границах МО город Краснодар. О масштабе проделанной работе свидетельствует количество анализируемых объектов – 4,24 млн деревьев и 160,5 тыс. зданий общим объемом 833,7 млн м<sup>3</sup>.

Таким образом, впервые создана трехмерная модель наземной части крупного города на площади более 800 км<sup>2</sup>. Полученная модель закладывает предпосылки для обоснованного анализа качества городской среды с позиции оценки распределения трехмерных объектов урбосистемы (здания, растительность, водные объекты), тем самым, выводит на новый технический уровень процедуры городского планирования и градостроительства.

#### Литература:

1. Бойко Е.С. Цифровое моделирование древесно-кустарниковой растительности аккумулятивных берегов по данным воздушного лазерного сканирования [Текст] / А.С. Карагян // Вестник СГУГиТ. 2021. № 2. С. 103–114.
2. Погорелов А.В., Моделирование объектов озеленения города по данным мобильного лазерного сканирования [Текст] / В.А. Брусило, Н.В. Граник // ИнтерКарто / ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. – Т. 24, ч. 2. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. С. 5–17. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-110-120
3. Погорелов А.В. Анализ роста города по данным спутниковых снимков: феномен Краснодара [Текст] / Е.Н. Киселев // В сборнике: Цифровая география. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. Пермь, 2020. С. 129-133.
4. Погорелов А.В. Лесные полосы в городе Краснодаре: оценка состояния и изменения [Текст] / Х.С. Прокопенко, Д.А. Липилин // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. №4 (36). С. 77-91. DOI: 10.15593/2409-5125/2019.04.08
5. Ризаев И.Г., Геоинформационное моделирование лесного покрова на основе воздушного лазерного сканирования [Текст] / А.В. Погорелов, М.В. Антоненко, М.В. Кузякина // ИнтерКарто-ИнтерГИС-21: материалы междунар. науч. конф., 2015 г., Краснодар / КубГУ. – Краснодар: 2015. С. 420–427.

---

УДК 681.586.53

Шипулин Юрий Геннадьевич, д.т.н., профессор,  
Акбарова Нигора Алимджановна, доцент, PhD,  
Ташкентский государственный технический  
университет  
Кадиров Омон Хамидович, к.т.н., доцент,  
Ташкентский институт текстильной и лёгкой  
промышленности,  
Мойдунов Тайрь Толонович, к.т.н., доцент,  
Саримсаков Адилкан Азимжанович к.т.н., доцент,  
Ошский технологический университет  
E-mail: om\_kad@mail.ru, tayr.moydunov@vail.rru

#### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛОВ

*В настоящее время значительное внимание уделяется повышению надежности всех категорий зданий и сооружений. Особенно для анализа поля деформаций и*

*перемещений остро необходимо использование различных методов, одним из которых является цифровая голографическая интерферометрия. Для практического применения этого метода авторами разработана методика обработки цифровых голографических интерферограмм. Цифровые голографические интерферометры (ДНИ), используемые для измерения движений диффузно отражающих объектов, обладают двумя уникальными метрологическими свойствами: сверхвысокой чувствительностью к движениям (доли нанометра) и способностью выполнять измерения одновременно по всей поверхности объекта. Поэтому основной проблемой оценки точности измерений является отсутствие образцовых средств измерений с более высокими или даже близкими характеристиками.*

*Для оценки точности измерительной информации в лаборатории голографических исследований в качестве базы сравнения использовались результаты аналитического расчета упругой линии (прогибов) балки постоянного прямоугольного сечения при ее нагружении чистым изгибом. Результаты испытаний методики показали сходимость экспериментальных и расчетных данных*

*Ключевые слова: цифровая голографическая интерферометрия, модуль упругости, голограмма, абсолютная величина, макетный луч*

Шипулин Юрий Геннадьевич, т. и. д., профессор,  
Акбарова Нигора Алимжановна, жумушчу, доцент,  
Ташкент мамлекеттик техникалык университети,  
Кадиров Омон Хамидович, т. и. к., доцент,  
Ташкент текстиль жана жеңил өнөр жай институту,  
Мойдунов Тайр Толонович, т. и. к., доцент,  
Саримсаков Адилкан Азимжанович т. и. к., доцент  
Ош технологиялык университети

## **МАТЕРИАЛДАРДЫН ИЙКЕМДҮҮЛҮГҮН ӨЛЧӨӨ МЕТОДУ**

*Азыркы учурда имараттардын жана курулмалардын бардык категорияларынын ишенимдүүлүгүн жогорулатууга олуттуу көңүл бурулууда. Айрыкча, деформация жана жер которуу талаасын анализдөө үчүн ар кандай ыкмаларды колдонуу өтө зарыл, алардын бири санариптик голографиялык интерферометрия. Бул ыкманы практикалык колдонуу үчүн авторлор санариптик голографиялык интерферограммаларды иштетүү ыкмасын иштеп чыгышкан. Диффузиялык чагылдыруучу объектилердин кыймылын өлчөө үчүн колдонулган санариптик голографиялык интерферометрлер (Ост) эки уникалдуу метрологиялык касиетке ээ: кыймылга өтө жогорку сезгичтик (нанометрдин бөлүктөрү) жана объекттин бүт бетинде бир эле учурда өлчөө жүргүзүү мүмкүнчүлүгү. Ошондуктан, өлчөө тактыгын баалоонун негизги көйгөйү-бул жогорку же ал тургай жакын мүнөздөмөлөргө ээ болгон үлгүлүү өлчөө каражаттарынын жоктугу.*

*Голографиялык изилдөө лабораториясында өлчөө маалыматынын тактыгын баалоо үчүн, таза ийилүү менен жүктөлгөндө туруктуу тик бурчтуу кесилиштин устундун ийкемдүү сызыгынын (ийилишинин) аналитикалык эсептөөсүнүн натыйжалары салыштыруу базасы катары колдонулган. Методиканын сыноолорунун натыйжалары эксперименталдык жана эсептик маалыматтардын жакындашуусун көрсөттү.*

*Негизги сөздөр: Санариптик голографиялык интерферометрия, ийкемдүүлүк модулу, голограмма, абсолюттук чоңдук, макет нуру.*

Shipulin Yuriy Genndyevich, doctor of technical sciences, professor,  
Akbarova Nigora Alimdjanovna, PhD, associate professor, Tashkent State Technical University,  
Kadirov Omon Khamidovich, candidate of technical sciences, associate professor, Tashkent Institute of Textile and Light Industry  
Moidunov Tair Tolonovich, candidate of technical sciences, associate professor, Osh Technological University  
Sarimsakov Adilkan Azimzhanovich, candidate of technical sciences, associate professor, Osh Technological University

## METHOD FOR MEASURING THE ELASTICITY OF MATERIALS

*Currently, considerable attention is paid to improving the reliability of all categories of buildings and structures. Especially for the analysis of deformation and displacement field, the use of various methods is urgently required, one of which is digital holographic interferometry. For the practical application of this method, the authors have developed a technique for processing digital holographic interferograms. Digital holographic interferometers (DHI) used to measure the movements of diffuse-reflecting objects have two unique metrological properties: ultra-high sensitivity to movements (fractions of a nanometer) and the ability to perform measurements simultaneously over the entire surface of the object. Therefore, the main problem in assessing the accuracy of measurements is the lack of exemplary measuring instruments with higher or even similar characteristics.*

*To assess the accuracy of the measurement information in the laboratory of holographic research, the results of the analytical calculation of the elastic line (deflections) of a beam of constant rectangular cross section were used as a comparison base when it was loaded with pure bending. The test results of the technique showed the convergence of experimental and calculated data*

*Key words: digital holographic interferometry, modulus of elasticity, hologram, absolute value, breadboard beam*

***Введение.*** На сегодняшний день в мире разработаны новые методы получения интерферометрических данных – голографическая интерферометрия. При этом большое внимание уделяется изучению прозрачных и отражающих объектов, в том числе рассеянных. В этой области одной из важных задач является проведение целевых научных исследований по следующим направлениям: разработка способов повышения чувствительности голографической интерферометрии, поиск способов компенсации искажений, возникающих на этапе записи голограмм, развитие цифровых методов голографической интерферометрии, разработка оптимальных схем записи цифровых голограмм, минимизирующих технико-экономические затраты; применение цифровой голографической интерферометрии для измерения и анализа полей сверхмалых перемещений, деформаций материалов и конструкций.

***Метод исследования.*** На основе этого метода была изготовлена модельная конструкция балки, схема которой представлена на рис. 1. Балка была изготовлена из дюралюминия марки Д-16, который крепился к массивной стальной пластине оптического стола с помощью стальной углы. Фотография изготовленной балки представлена на рис.2. На рис.3. схема измерений представлена на модели цифрового

голографического интерферометра и на рис.4. - схема загрузки балки компоновки. Показано, что голографическая интерферометрия является одним из наиболее перспективных бесконтактных методов экспериментального исследования деформационных свойств материалов и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС).

Варианты технологий, основанные на использовании фотоматериалов, нашли достаточно широкое применение в экспериментальной механике, их возможности и ограничения изучены и подробно описаны [1,2].

Упругая линия вертикальной части балки при чисто изгибающей нагрузке описывается известной формулой [3]:

$$Y = \frac{M}{2EJ} X^2, \quad (1)$$

где  $X$  — текущая координата точки поверхности балки относительно окончания,  $Y$  — прогиб (нормальное смещение) поверхности вертикальной части балки в точке с координатой  $X$  (рис. 1.),  $E$  — модуль упругости материала балки.

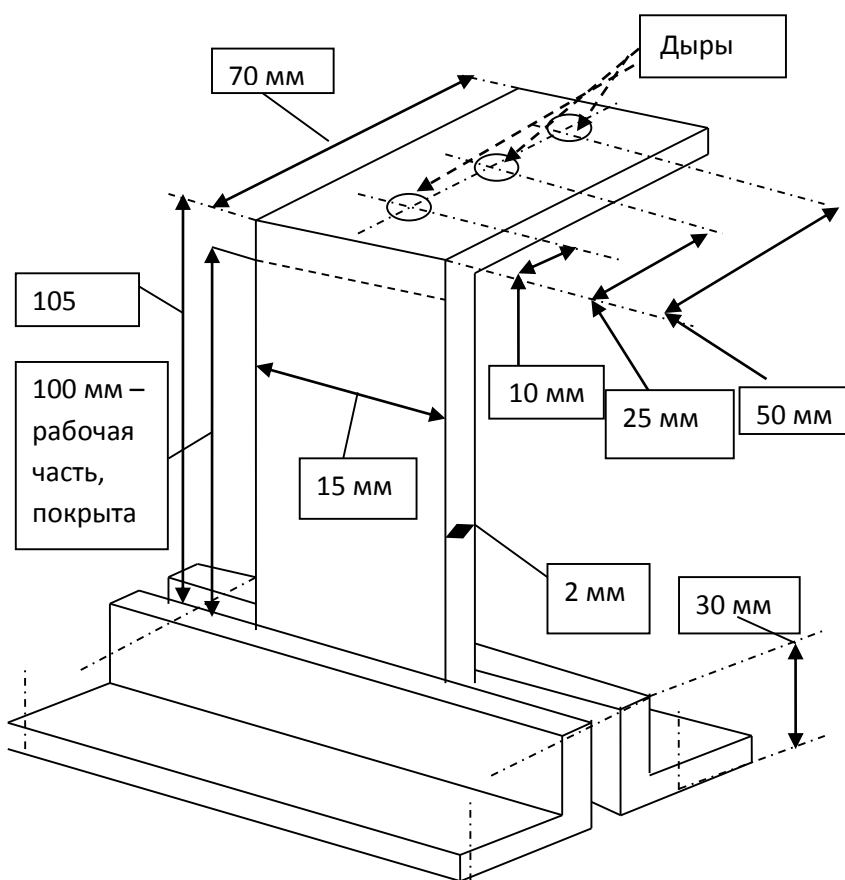


Рис.1. Схема модели балки.

Момент инерции сечения балки определяется исходя из соотношения:

$$J = \frac{bh^3}{12}, \quad (2)$$

здесь  $b$  - ширина балки;  $h$  - его толщина.

Изгибающий момент равен:

$$M = P \cdot L, \quad (3)$$

где  $P$  - величина силы (вес груза);  $L$  - плечо приложения силы.

Перепишем формулу (1), подставив выражения входных величин.

$$Y = \frac{12PL}{2Ebh^3} X^2. \quad (4)$$

Для сравнения результатов измерений, выполненных с помощью CGI, с результатами расчетов при аналогичных параметрах нагружения балки была проведена серия экспериментов. При этом для максимального приближения условий эксперимента к расчетным, т.е. идеальным, был изготовлен прецизионный образцовый пучок. Также была разработана и использована методика, включающая статистическую обработку информации измерений и корректировки.

Дифференциал значений прогиба (абсолютная ошибка расчета перемещения) в зависимости от погрешностей измерения величин, входящих в выражение (1), рассчитывается по формуле [4]:

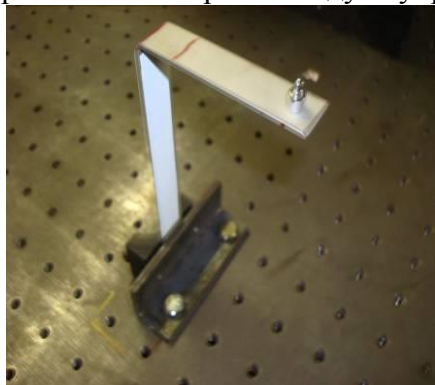
$$\Delta Y = \frac{12PL}{2Ebh^3} X^2 \left( \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{3\Delta h}{h} + \frac{2\Delta X}{X} \right). \quad (5)$$

В ходе измерений значения этих параметров составили:  $E = 0.695 \cdot 10^5$  МПа  $\sim 0.695 \cdot 10^{10}$  кг/м<sup>2</sup> - модуль упругости прессованной полосы из деформируемого алюминиевого сплава АМц (табличные данные),  $b = 0,015$  м,  $h = 0,00214$  м,  $P = 0,001$  кг (стандартный вес),  $L = 0,06$  м,  $X_{\max} = 0,1$  м.

Значение модуля упругости  $E$  является ориентировочным и устанавливается с точностью до второго десятичного знака, поэтому принимаем  $\Delta E = 0.01 \cdot 10^{10}$  кг/м<sup>2</sup>.

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.0144. \quad (6)$$

В приведенной выше оценке наибольший вклад в общую погрешность расчета вносит погрешность измерения модуля упругости и толщины балки.



а) Вид сверху



б) Вид сзади

Рис.2. Фотографии макета балки

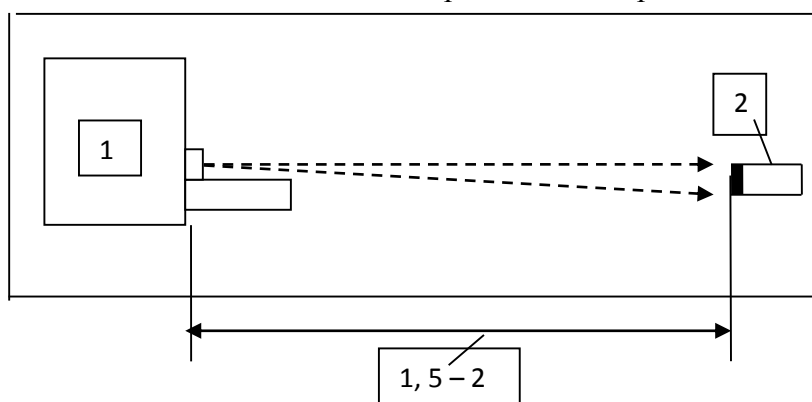
Экспериментальные измерения деформаций проводились по схеме, представленной на рис.3. следующим образом:

- 1 - снята цифровая голограмма ненагруженного модельного луча.
- 2 - снята цифровая голограмма модельного луча под нагрузкой.
- 3 - снята цифровая голограмма модельной балки после нагружения, т.е. голограмма балки с остаточной деформацией.
- 4 - с помощью модифицированного программного обеспечения смоделирована 3D картина поля перемещений под действием нагрузки в единицах измерения «микрон».

Голограммы были получены с помощью He-Ne лазера мощностью 20 мВт на цифровой матрице размером 1000x1000 пикселей. На рис.5. показаны цифровые голограммы, полученные в результате одного цикла измерений. Стрелками показано, какие голограммы использовались для сравнения промежуточных интерферограмм, а

также показан конечный результат – трехмерное поле смещений нагруженной модельной балки.

Для сравнения экспериментальных и расчетных значений было рассчитано и измерено смещение конца балки при различных нагрузках. Результаты сравнения показаны на рис.6. Как видно из рис.6., измеренные и расчетные данные смещений модельной балки совпадают с точностью до расчетной погрешности измерения.



1 – схема расположения ЦГИ, 2 – балка модели.  
Рис.3. Схема дистанционных измерений деформаций

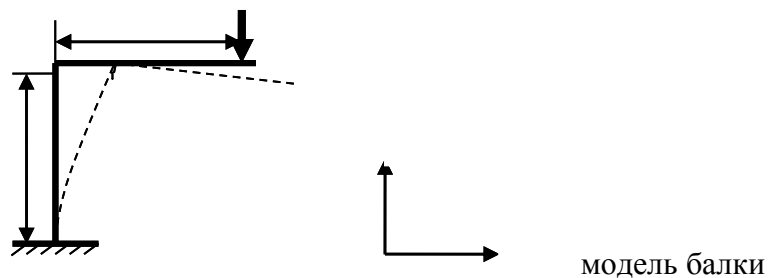
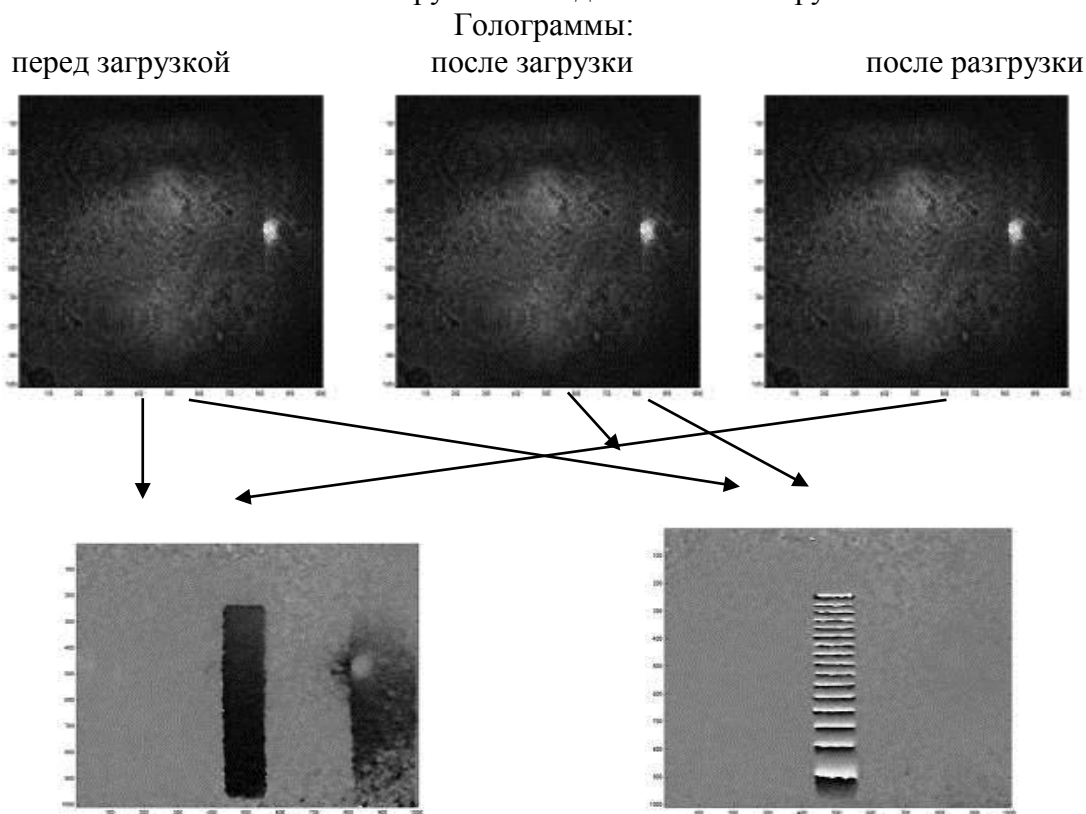


Рис.4. Схема нагружения модельной балки грузом Р



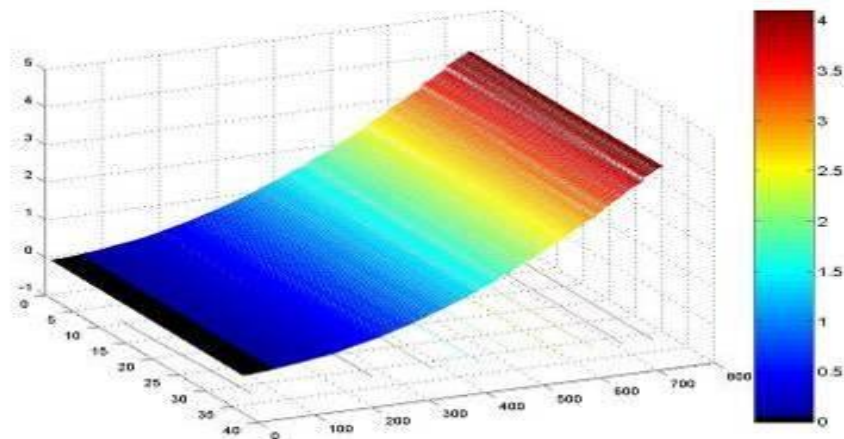


Рис.5. Результаты измерения отклонения модельной балки

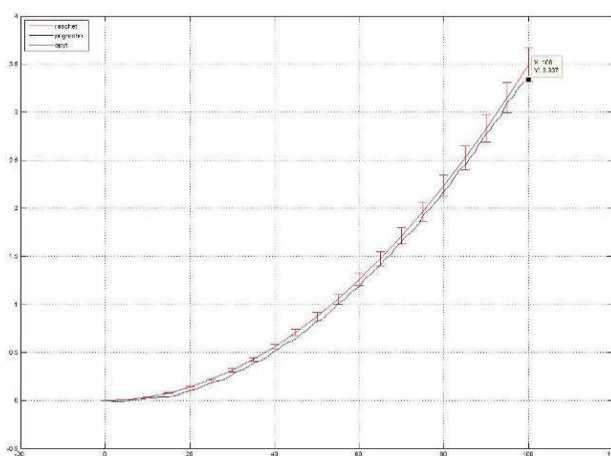


Рис.6. - Результаты сравнения прогибов, измеренных с помощью CGI (нижняя кривая) с результатами расчета (верхняя кривая - расчет с ошибкой)

В таблице 1 приведены измеренные значения перемещений  $Y$  на конце рабочего участка балки ( $X=100$  мм) в одной серии измерений.

Таблица 1

Измеренные значения смещения

Номер измерения Измеренная величина смещения концов балки, МКМ	Номер измерения Измеренная величина смещения концов балки, $\mu\text{m}$	Номер измерения Измеренная величина смещения концов балки, МКМ	Номер измерения Измеренная величина смещения концов балки, $\mu\text{m}$
1	3,394	5	3,397
2	3,413	6	3,469
3	3,462	7	3,456
4	3,487	8	3,448

Среднее значение измеренных перемещений  $Y$  по формуле:

$$Y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^8 Y_i}{8} = 3,44 \text{ мкм.} \quad (7)$$

Абсолютное значение максимального отклонения измеренных значений перемещений  $Y$  от среднего значения рассчитывается по формуле:

$$\Delta Y = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{2} = (3,487 - 3,394) / 2 = 0,0465 \text{ мкм,} \quad (8)$$

здесь  $Y_{\max}, Y_{\min}$  - максимальные и минимальные значения смещения из всех измеренных.

**Результаты исследования.** Абсолютную величину предельного относительного отклонения измеренных величин от среднего значения измеренных перемещений рассчитывают по формуле:

$$\Delta_{\text{эц}} = \frac{\Delta Y}{Y_{\text{пд}}} = 0,0465 / 3,44 = 0,0135 = 1,35 \%. \quad (9)$$

Ограничить общую относительную погрешность измерения смещения

$$\Delta_{\text{max}} = \pm(\Delta_{\text{эц}} + \Delta_{\text{ид}}) = \pm (1,35 + 5,21) = \pm 6,56\%$$

здесь  $\pm 5,21 \%$  - ошибки расчета упругой линии балки.

**Выводы.** Таким образом, при проведении реальных измерений малых смещений точек деформируемого объекта была достигнута суммарная относительная погрешность 6,56%. Показано, что разработанная методика может быть использована для измерения упругих постоянных, прежде всего, «однородных» материалов, таких как металлы и их сплавы. Для этого нужна лишь часть исследуемого материала в виде балки Г-образной формы; также на основе сравнения с табличными данными можно узнать, из какого «неизвестного» материала изготовлена балка.

#### Литература:

1. Серенен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машины на прочность / С.В. Серенен, В.П.Когаев, Р.М.Шнейдерович. М.: Энергоатомиздат, 2013.- 317 с.
2. Шашин, М.Ю. Мексиканские свойства металлов / М.Ю.Шашин. СПб.:МАКС-ПРЕСС, 2007.-259 с.
3. Безродный В.И., Деревянко Н.А., Ищенко А.А., Лазер на красителях на основе полиуретановой матрицы // Журнал технической физики, -2001, -Т. 71, вып.1, -С.72-78.
4. Биргера И.А. Расчет на прочность деталей машин //— М.: Машиностроение, -2009, -Р. 278-300.