

Е. Е. МАЙОРОВ, А. Ч. МАШЕК, В. Т. ПРОКОПЕНКО, Н. Я. ЧИСТЯКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ГОЛОВКИ

Представлен анализ метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки: исследованы диапазон измерения при контроле формы поверхности диффузно-отражающего объекта, амплитуда выходного сигнала, погрешность измерений. Приведены результаты сравнительного анализа оптико-механической головки с существующим аттестованным прибором.

Ключевые слова: оптико-механическая головка, огибающая интерференционного сигнала, пружинный параллелограммный механизм, спектр-модуляция.

Измерительная оптико-механическая головка (ОМГ), предназначенная для контроля формы поверхности диффузно-отражающих объектов, а также для томографических исследований, представляет собой сканирующий интерферометр Майкельсона с двумя подвижными зеркалами [1]. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, где 1, 15 — суперлюминесцентные диоды; 2 — микрообъектив; 3, 8 — светоделители; 4 — объект; 5, 7, 9, 10, 11 — зеркала; 6, 14, 16 — фотоприемники; 12 — модулятор; 13 — дифракционные решетки; 17 — датчик скорости; 18 — блок электронной обработки сигналов; ПК — компьютер; O_1-N , O_1-M , O_2-N , O_2-L — оптические длины плеч интерферометра.

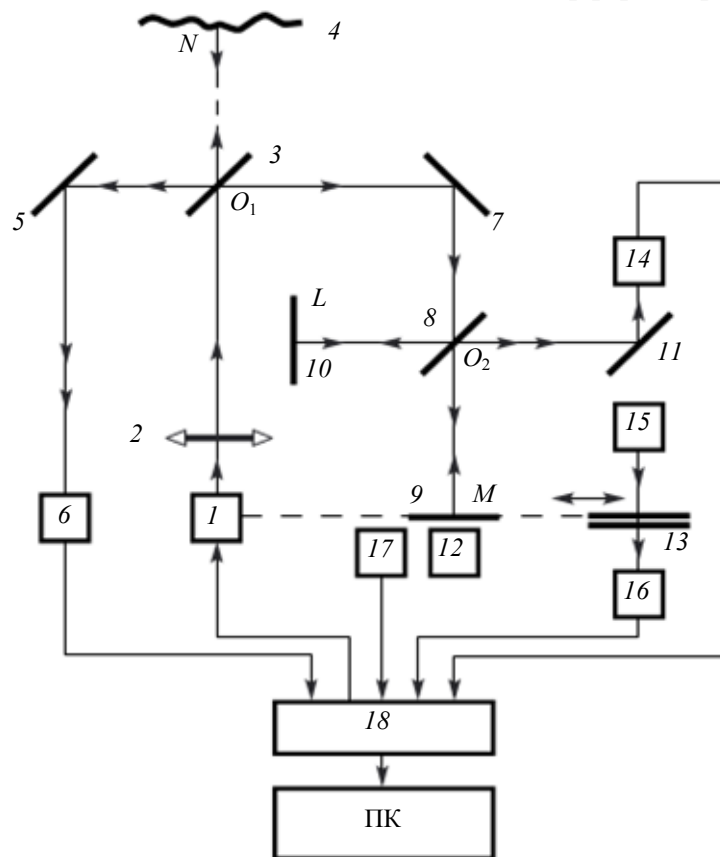


Рис. 1

Важными метрологическими характеристиками ОМГ являются диапазон измерений при контроле формы поверхности, амплитуда выходного сигнала при модуляции оптической разности хода и погрешность измерений системы.

Диапазон измерений. Диапазон измерения (Δz) при контроле формы поверхности диффузно-отражающих объектов с использованием ОМГ определяется диапазоном компенсационного изменения разности хода интерферирующих пучков [2]. Посредством этого изменения обеспечивается достаточная для анализа величина интерференционного сигнала. В этой связи для определения диапазона Δz производилось исследование амплитуды выходного сигнала (U/U_{\max}) при изменении расстояния (z) от оптической измерительной головки до поверхности объекта, в качестве которого использовалась плоскопараллельная стеклянная пластина. Исходным при проведении эксперимента считалось расстояние $z = 120$ мм, соответствующее максимальной амплитуде выходного сигнала при отсутствии возбуждающего напряжения на модуляторе положения опорного зеркала. Расчет зависимости амплитуды выходного сигнала от расстояния z производился при смещении контролируемой поверхности объекта вдоль направления зондирования в обе стороны от исходной точки. Результаты измерений при частоте сканирования опорного зеркала $f_M = 23$ Гц и $z = 120$ мм представлены на рис. 2, а.

Как следует из полученной зависимости, для используемой конструкции модулятора $\Delta z \approx 3,8$ мм. Схема модулятора показана на рис. 2, б, где 1 — пружины, 2 — опорное зеркало, 3 — постоянный магнит, стрелкой обозначено направление движения.

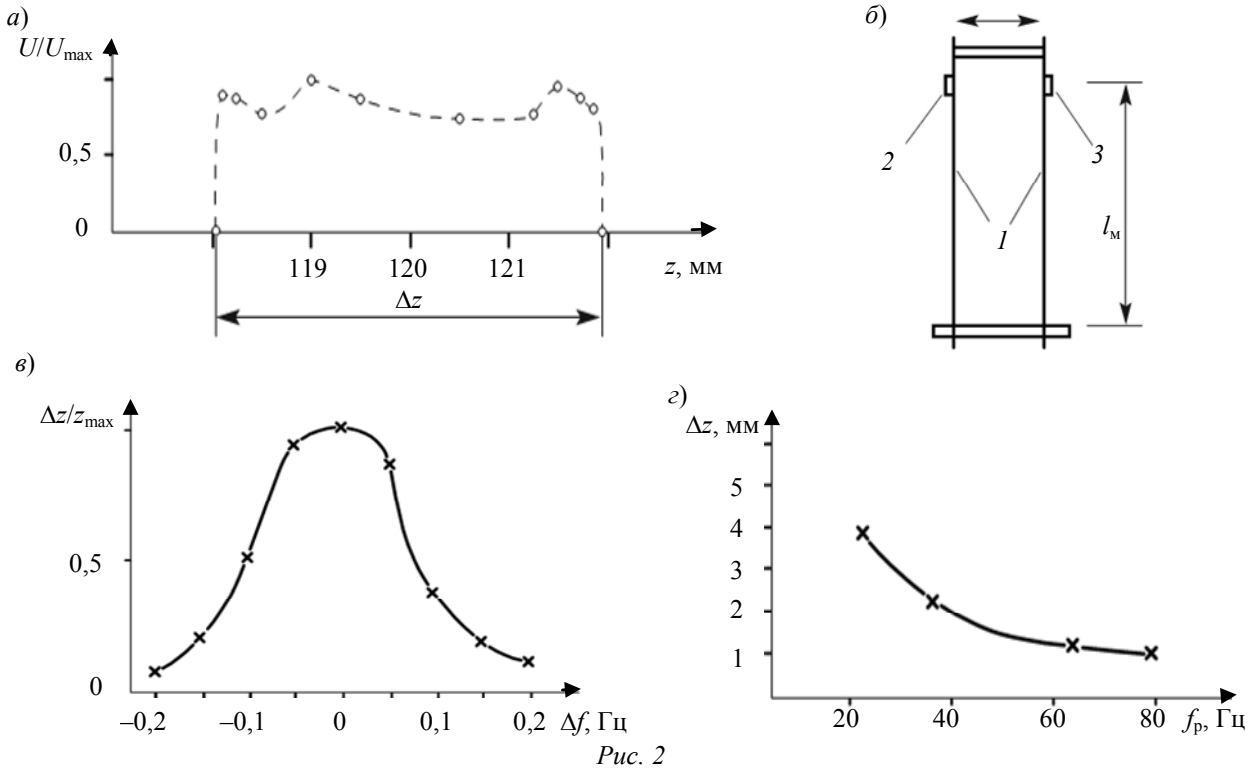


Рис. 2

Модулятор изготовлен на основе пружинного параллелограммного механизма и электромагнита. Возбуждение модулятора производится переменным током с частотой модуляции f_M , сканирование — на резонансной частоте механизма f_p : $f_M = f_p$. Оптимальное соотношение длины l_M пружинных сторон параллелограмма, частоты модуляции и амплитуды колебаний подбиралось экспериментальным путем. Повышение частоты модуляции f_M , с одной стороны, увеличивает частоту измерений, с другой — уменьшает амплитуду колебаний. При увеличении длины l_M увеличивается амплитуда колебаний, но уменьшается резонансная частота параллелограммного механизма (рис. 2, в).

Следует отметить, что пружинная колебательная система является высокодобротной: отклонение частоты f_M на 1 % от резонансной частоты f_p приводит к уменьшению амплитуды колебаний в 2 раза (см. рис. 2, в). На рис. 2, г показана зависимость диапазона измерений от резонансной частоты, изменение которой производилось за счет изменения длины пружин l_M .

Для каждого значения f_p определялась зависимость, аналогичная представленной на рис. 2, *a*, по которой вычислялся диапазон измерений. Полученная зависимость диапазона измерений от частоты сканирования опорного зеркала позволяет для каждой конкретной задачи выбрать оптимальное соотношение этих параметров.

Амплитуда информационного сигнала. Амплитуда сигнала совместно с огибающей интерференционного сигнала являются важнейшими характеристиками измерительного устройства, которые содержат информацию об измеряемом расстоянии, обеспечивают необходимую величину превышения полезного сигнала над уровнем шумов и помехозащищенность измерений [3]. Получение информации об изменении амплитуды выходного сигнала при изменении оптической разности хода позволяет визуализировать влияние спекл-модуляции на точность измерений. Исследование изменения амплитуды сигнала при сканировании контролируемой поверхности объекта дает возможность объяснить механизм формирования огибающей интерференционного сигнала при декорреляции спекл-полей.

В работе не ставилась задача изучения возможности влияния шероховатости поверхности на характеристики измерительной системы. Поэтому измерения проводились с использованием одного объекта с аттестованной поверхностью — плоскопараллельной стеклянной пластины, шлифованная поверхность которой относится к шестому классу шероховатости ($R_a = 2,0 \dots 2,5$ мкм).

Пластина крепилась на подвижной части микрометрического столика. Измерения проводились для различных значений диаметра (d) зондирующего пятна. Диаметр изменялся посредством введения между оптическим щупом и поверхностью плоскопараллельной пластины дополнительных стеклянных пластин различной толщины: 1,25, 2,5 и 3,5 мм, что соответствовало диаметру зондирующего пятна 50, 70 и 90 мкм. Результаты измерений показаны на рис. 3, *b—z*; на рис. 3, *a* представлен график зависимости $U/U_{\max}(x)$ для контролируемой пластины с шероховатостью $R_a = 2,0 \dots 2,5$ мкм и $d = 30$ мкм. Результаты расчета зависимости среднего значения амплитуды сигнала от размера зондирующего пятна показаны на рис. 3, *d*, где \bar{U}_{30} — амплитуда сигнала при $d = 30$ мкм.

Из приведенных зависимостей следует, что амплитуда сигнала может изменяться более чем на порядок. Это объясняет наличие сильно деформированных участков огибающей вследствие декорреляции спекл-полей. Действительно, при изменении разности хода лучей суперпозиция некоррелированных составляющих спекл-поля, имеющих различные амплитуды, приводит к дополнительной модуляции амплитуды интерференционного сигнала и, как следствие, к деформации огибающей. Результаты исследования формы огибающей при различных углах падения зондирующего излучения (θ) представлены на рис. 4. Как следует из графиков, при увеличении угла θ форма огибающей интерференционного сигнала изменяется.

Погрешность измерений. В процессе экспериментальных исследований регистрировались результаты измерений расстояния z при перемещении объекта относительно зондирующего пятна при различных значениях угла θ . Положение контролируемой поверхности относительно зондирующего луча фиксировалось под углом θ , равным 0, 30, 45, 60 и 72°. Таким образом, номинальное исходное расстояние ($z = 120$ мкм) оставалось неизменным, и регистрировались флуктуации результатов измерений этого расстояния (СКО δ_z), обусловленные спекл-модуляцией огибающей выходного сигнала. Перемещение объекта, закрепленного на микрометрическом столике, относительно щупа осуществлялось с шагом 50 мкм. Для каждого угла θ производилось 10 измерений.

В ходе эксперимента осуществлялся независимый контроль возможного отклонения направления перемещения столика (объекта) от плоскопараллельного. Для этого был собран дополнительный интерферометр Майкельсона, одно из зеркал которого крепилось на столике параллельно направлению перемещения. В качестве источника излучения использовался He—Ne-лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Контроль осуществлялся по классической

методике: смещение интерференционной картины на одну полосу соответствовало отклонению от плоскости на величину $\lambda/2 \approx 0,3$ мкм [4].

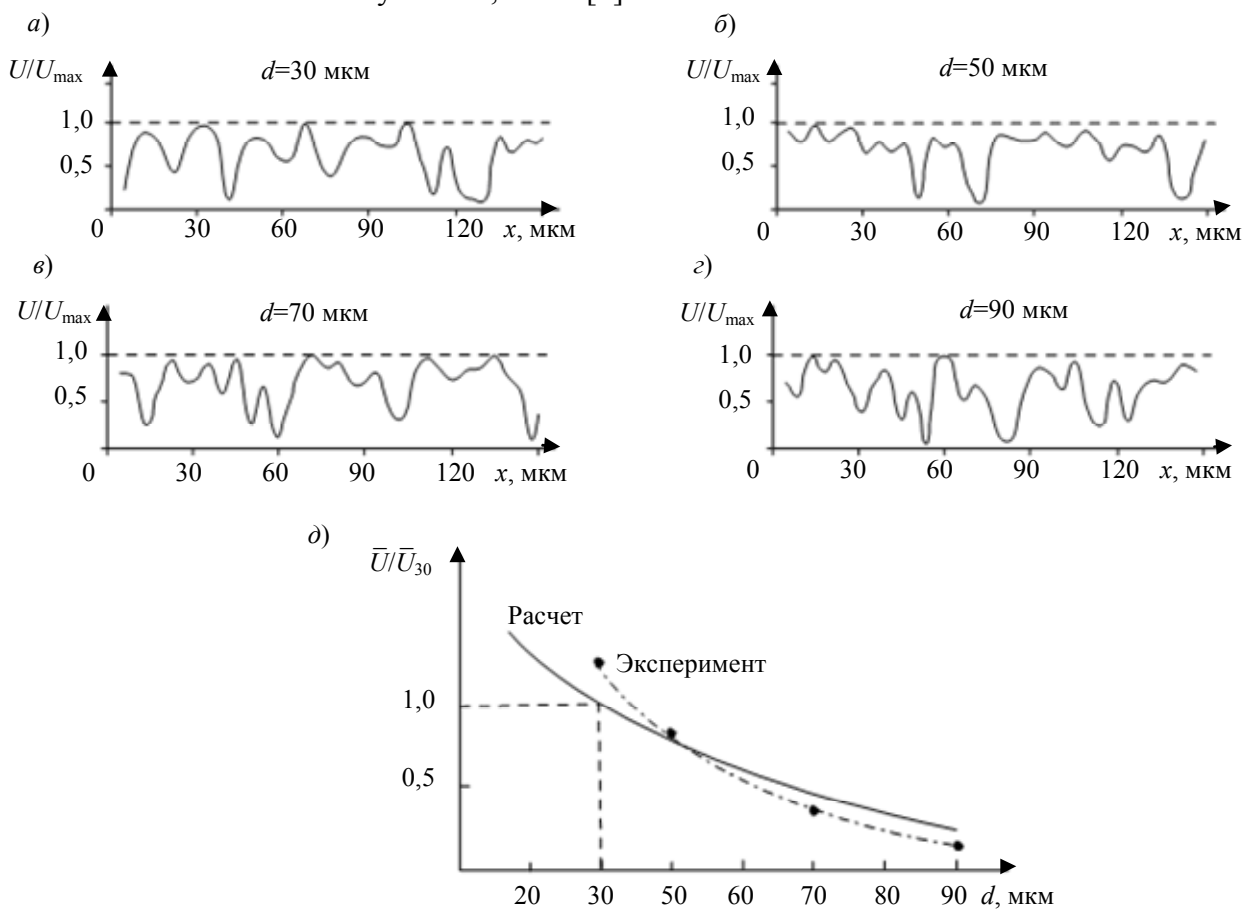


Рис. 3

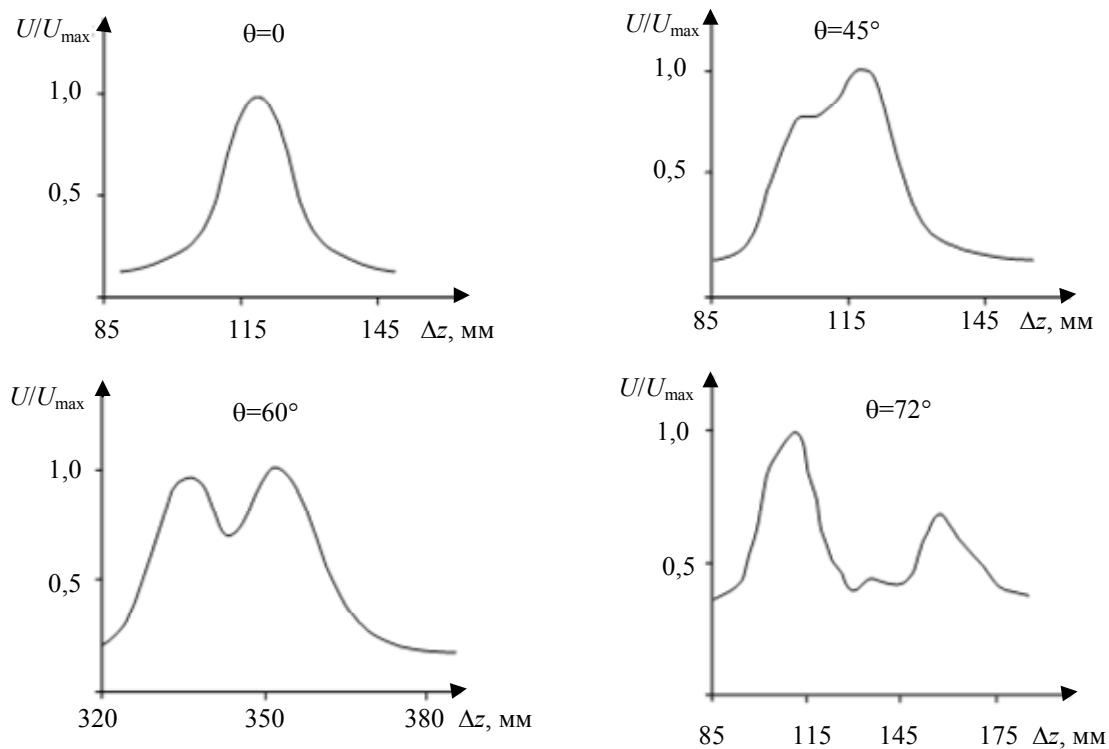


Рис. 4

Результаты измерений при обработке сигнала методом дифференцирования огибающей показаны на рис. 5, а при обработке методом площадей [4] — на рис. 6.

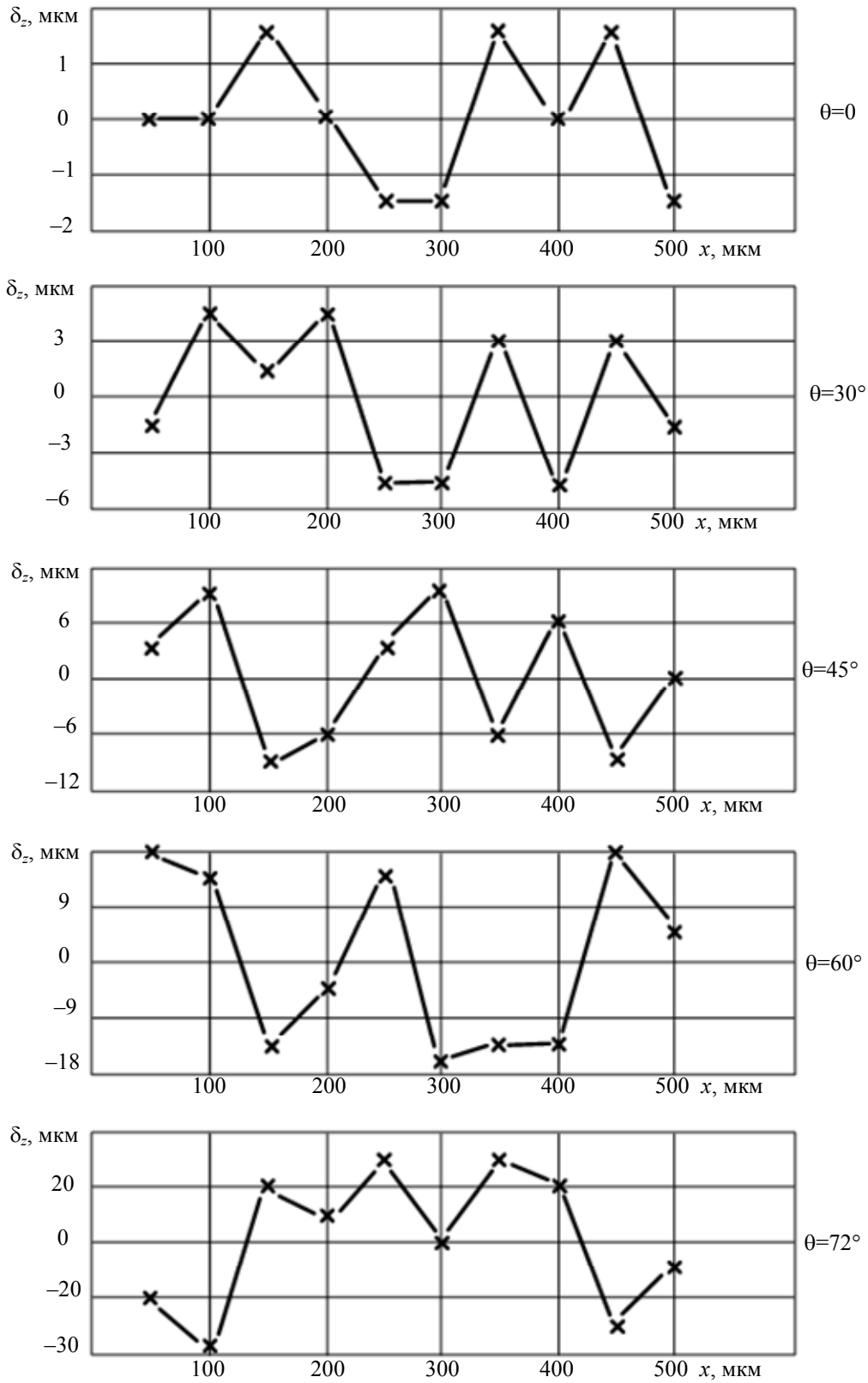


Рис. 5

В ходе исследований проводился также сравнительный анализ результатов экспериментальных измерений расстояния z с независимыми измерениями (Δz_a), выполненными с помощью аттестованного прибора — индикатора линейных перемещений 1МИГ (ГОСТ 9696-75) с погрешностью отсчета показаний 0,5 мкм. Результаты измерений представлены на рис. 7.

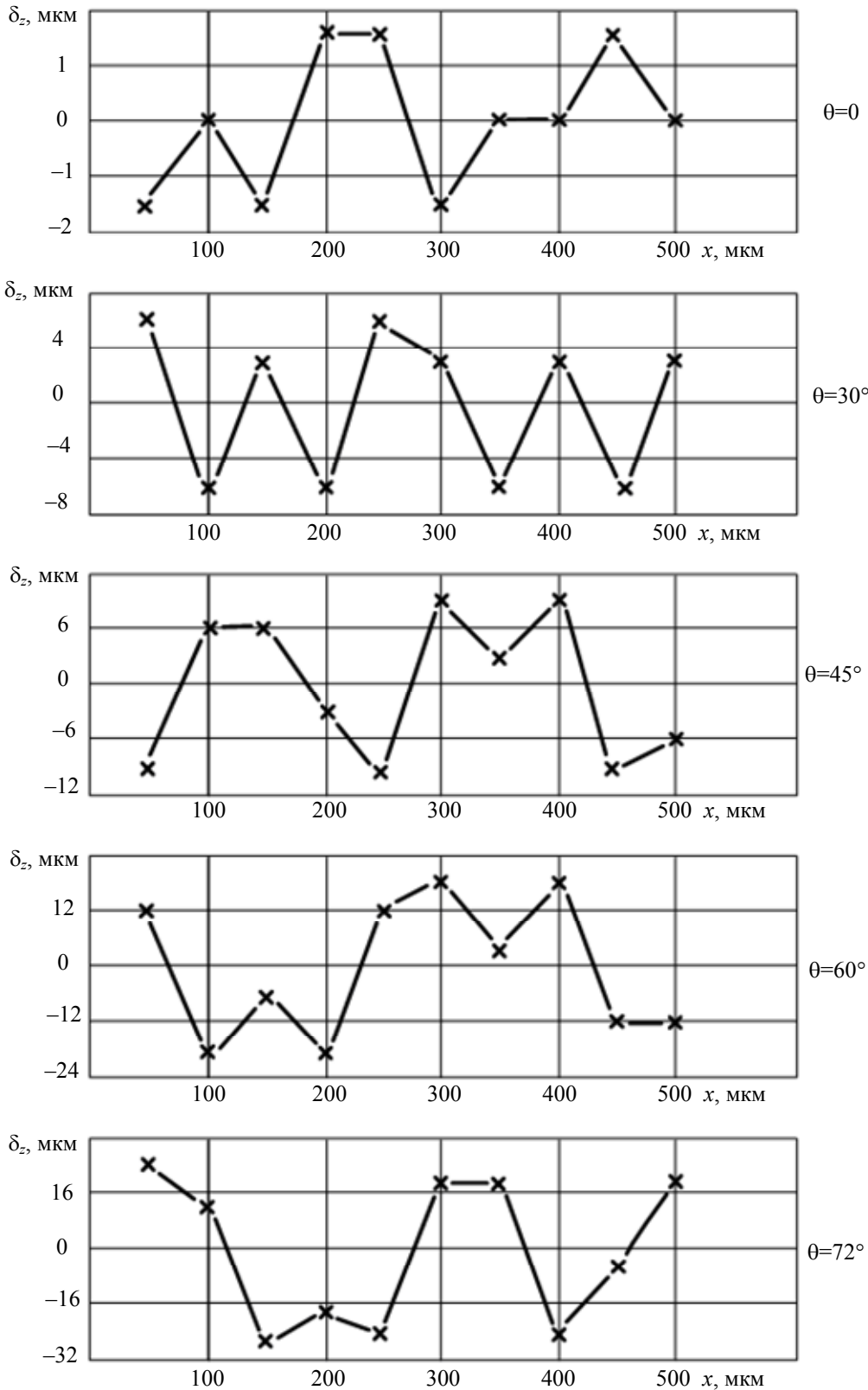


Рис. 6

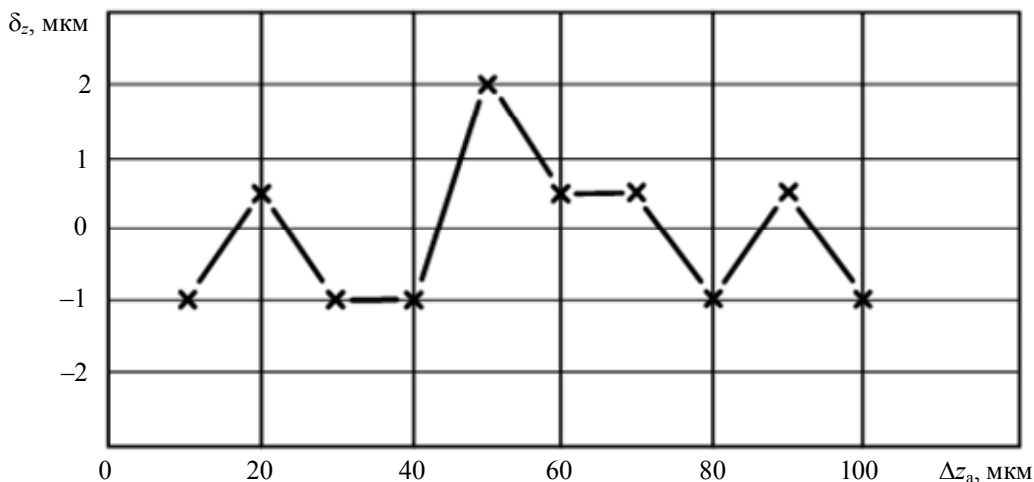


Рис. 7

Приведенные результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с теоретическими расчетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pat. 6195168 USA. Infrared Scanning Interferometry Apparatus and Method / De Lega et al. 2001.
2. Большаков О. П., Котов И. Р., Хопов В. В. Система для измерения рельефа поверхности и упругости кожи // Мед. техника. 1997. № 5. С. 35—38.
3. Анисимов Н. М., Вязанкина М. К., Машек А. Ч., Майоров Е. Е., Чистякова Н. Я., Федоров А. Л. Лазерная спекл-техника // Сб. тр. Первой междунар. науч.-практ. конф. „Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии и медицине“. СПб: СПбГПУ, 2010. С. 148—152.
4. Майоров Е. Е., Крюкова Т. В., Смирнова Т. А., Чистякова Н. Я. Использование оптических приборов и методов в исследовании биологических объектов // Сб. статей Второй междунар. науч.-практ. конф. „Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования в физиологии, фармакологии и медицине“. СПб: СПбГПУ, 2011. С. 94—96.

Сведения об авторах

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики, Санкт-Петербург; E-mail: mayorov_ee@mail.ru
- Александр Чеславович Машек** — Военная академия связи им. С. М. Буденного, кафедра физики и математики, Санкт-Петербург; старший преподаватель; E-mail: galusinka@mail.ru
- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru
- Нина Ярославна Чистякова** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики, Санкт-Петербург; E-mail: medbiophys@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники
НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
29.12.11 г.