



УДК 535.4; 681.787

## ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ МИКРОДЕФОРМАЦИЙ РАССЕИВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

О. В. Диков\*, С. А. Савонин, В. И. Качула,  
О. А. Перепелицына\*, В. П. Рябухо

Саратовский государственный университет

E-mail: rvp@sgu.ru

\*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов

E-mail: rvp-optics@yandex.ru



Рассматриваются основы метода голографической интерферометрии с записью цифровой голограммы и численной процедурой восстановления комплексной амплитуды объектного поля для расчета поля микросмещений поверхности объекта. Обсуждаются схемные решения и экспериментальные результаты.

**Ключевые слова:** цифровая голография, голографическая интерферометрия, численная обработка интерферограмм, микродеформации.

### Digital Holographic Interferometry of Microdeformations of the Scattering Objects

O. V. Dikov, S. A. Savonin, V. I. Kachula,  
O. A. Perepelitsyna, V. P. Ryabukho

The principles of holographic interferometry with recording digital holograms and numerical reconstruction procedure of the complex amplitude of the object wave for the calculation of the field displacement surface of the object being discussed. The scheme design and experimental results of the study are presented.

**Key words:** digital holography, holographic interferometry, numerical interferogram processing, microdeformation.

### Введение

В голографической интерферометрии в отличие от классической осуществляется интерференция волн, проходящих по одному пути, в разные моменты времени. Характер картины интерференции обусловлен лишь изменениями объекта за время между экспозициями. Голографическим интерференционным методом можно исследовать объекты неправильной формы и шероховатые, диффузно отражающие свет. Голографическая интерферометрия нечувствительна к дефектам оптических деталей установки, что позволяет исследовать интерферометрическим методом объекты достаточно больших размеров.

При помощи цифровых регистрирующих устройств существует возможность производить запись голограммы в цифровом виде. Тогда восстановление с голограммы объектного волнового поля и последующее формирование изображения объекта реализуется через последовательность процедур численного преобразования цифровой

голограммы [1]. Подобный метод записи голограммы и восстановления с нее информации о записанном объектном волновом поле называется цифровой голографией.

Компьютерная обработка цифровых голограмм позволяет восстанавливать поля комплексных амплитуд изображения поверхности исследуемого объекта и, соответственно, определять фазовые изменения этого поля, возникающие вследствие микроперемещений поверхности объекта. В силу своей природы интерференционные измерения, использующие в качестве меры длины световую волну, выполняются с точностью до долей длины волны лазерного излучения, что и обеспечивает высокую точность измерений. Наиболее эффективные результаты при контроле поля микроперемещений могут быть получены при использовании цифровой голографической интерферометрии с многоэкспозиционной записью голограмм последовательных состояний исследуемого объекта (с записью потока кадров цифровых голограмм) [2].

### 1. Принципы цифровой голографической интерферометрии

В цифровой голографии и, соответственно, в методе цифровой голографической интерферометрии записываются цифровые голограммы объектного поля. Пространственное распределение интенсивности  $I(\vec{r})$  в картине интерференции объектной и опорной волн записывается с помощью матричного цифрового фотоэлектрического детектора – ПЗС-матрицы или КМОП-матрицы. Полученная таким образом цифровая голограмма  $I(\vec{r}_{jk}) = I(x_j, y_k)$  представляет собой матрицу чисел размером  $M \times N$ , совпадающим с размером цифровой фотоэлектрической матрицы.

Если запись голограммы производится в дифракционном поле, то восстановление изображения происходит в результате процесса дифракционного распространения восстановленного поля от голограммы до области локализации изображения



[3]. Математически дифракционный процесс распространения волнового поля с достаточной точностью можно описать с помощью интегральных преобразований Френеля–Кирхгофа комплексной амплитуды волнового поля, восстановленного в плоскости голограммы. Современные цифровые технологии позволяют численно реализовать подобные интегральные преобразования.

Численное интегральное дифракционное преобразование цифровой голограммы, в частности преобразование Френеля, позволяет получать дискретное представление комплексной амплитуды объектного поля в прямом  $U_S(\vec{p}_{0jk}) = U_S(x_{0j}, y_{0k})$  или комплексно сопряженном  $U_S^*(x_{0j}, y_{0k})$  виде, реконструировать в численной форме изображение объекта  $I_S(x_{0j}, y_{0k}) = |U_S|^2 = |U_S^*|^2$  и с использованием графических компьютерных средств визуализировать это цифровое изображение.

Возможность восстановления комплексной амплитуды объектного поля  $U_S(\vec{p}_0)$  или  $U_S^*(\vec{p}_0)$ , в свою очередь, предопределяет возможность реализации в численном виде метода голографической интерферометрии [4,5]. Для этого необходимо выполнить процедуру сложения или вычитания комплексных амплитуд объектных полей  $U_{S1}$  и  $U_{S2}$ , восстановленных с цифровых голограмм, записанных при различных деформированных состояниях исследуемого объекта, и визуализировать распределение суммарного или разностного изображения. На разностном или суммарном изображении образуются интерференционные полосы, параметры которых позволяют определить поле микроперемещений поверхности  $\vec{g}(\vec{p}_0)$  объекта.

## 2. Схемные решения для цифровой голографической интерферометрии

Схемы записи цифровых голограмм принципиально не отличаются от схем записи аналоговых голограмм. Отличия имеют количественный характер и определяются сравнительно низкой разрешающей способностью матричных фотоприемников по сравнению с фотопластинками для записи голограмм. Расстояние между центрами пикселей  $\Delta x$  матричных фотоприемников составляет  $\approx 3$  мкм, что соответствует разрешающей способности  $R = 1/\Delta x \approx 330$  лин/мм. Фотопластинки для голографии имеют разрешение  $R = 5000$  лин/мм.

В голографии необходимо записать пространственно высокочастотное распределение интенсивности  $I(\vec{p})$  в виде системы интерференцион-

ных полос, модулированных спеклами объектного поля. В соответствии с критерием Найквиста [6] пространственная частота этих полос  $f_s$  должна быть ниже пространственной частоты расположения пикселей матрицы  $f_d = 1/\Delta x : f_s \leq f_d/2$  или  $\Lambda \geq 2\Delta x$ , где  $\Lambda$  – период полос голограммы. Поскольку  $\Lambda$  определяется длиной волны  $\lambda_0$  и углом схождения опорной и объектной волн  $\theta$  на матрицу, то при заданной  $\lambda_0$  имеем ограничения на угол падения опорного пучка,  $\sin \theta \leq \lambda_0/2\Delta x$ . Для  $\Delta x \approx 3$  мкм и  $\lambda_0 \approx 0,63$  мкм имеем  $\theta \leq 6^\circ$ .

Другая особенность цифровой голографии связана с ограничениями, накладываемыми на численное преобразование цифровой голограммы. В принципе возможна реализация алгоритма любого дискретного дифракционного преобразования: Френеля–Кирхгофа, Френеля или Фурье. Однако наиболее быстрым и легко реализуемым является алгоритм быстрого преобразования Фурье, который проще использовать в практике цифровой голографии. Поэтому схемы записи цифровых голограмм должны быть построены таким образом, чтобы для восстановления комплексной амплитуды изображения объекта использовалось Фурье-преобразование [7]. К таким схемам относится схема записи безлинзовой Фурье-голограммы (рис. 1), в которой источник  $S_R$  опорной волны располагается в той же плоскости  $\vec{p}_0$ , что и поверхность объекта.

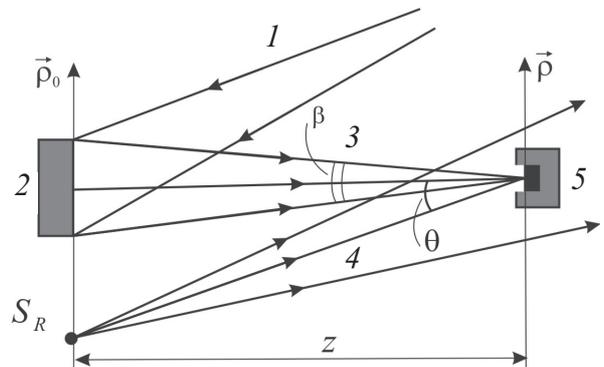


Рис. 1. Схема записи безлинзовой цифровой Фурье-голограммы: 1 – освещающий лазерный пучок; 2 – объект; 3 – объектное поле; 4 – опорная волна; 5 – матричный фотоприемник

Замечательное свойство такой схемы записи заключается в возможности использования для восстановления поля изображения объекта  $U_S(\vec{p}_0)$  Фурье-преобразования численной голограммы  $I(\vec{p})$ :

$$U_S(\vec{p}_0) = F\{I(\vec{p})H(\vec{p})\} = F\{I(\vec{p})\} \otimes F\{H(\vec{p})\}, \quad (1)$$



где  $F\{\dots\}$  – символ Фурье-преобразования,  $\otimes$  – знак операции свертки,  $H(\vec{\rho})$  – апертурная функция матрицы.

### 3. Цифровые голограммы сфокусированного изображения

При записи безлинзовой Фурье-голограммы имеются ограничения на поперечные размеры объекта, обусловленные необходимостью разрешения матрицей фотоприемников спекл-структуры дифракционного поля и превышения размерами спеклов  $\varepsilon_{\perp} \approx \lambda/\beta$  периода  $\Lambda$  интерференционных полос,  $\varepsilon_{\perp} > 2\Lambda > \Delta x$ .

Ограничение на поперечные размеры объекта в определенной степени может быть снято в цифровой голографии сфокусированного изображения объекта (рис. 2), когда в плоскость матрицы с помощью линзового объектива фокусируется изображение объекта с уменьшением или увеличением в зависимости от размеров объекта и направляется опорный пучок света. Подбором коэффициента увеличения (уменьшения) можно сфокусировать на матрицу изображение всего объекта или его фрагмента в зависимости от решаемой прикладной задачи.

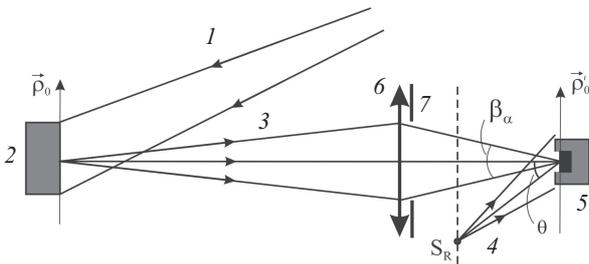


Рис. 2. Схема записи цифровой голограммы сфокусированного изображения с уменьшением размеров изображения по отношению к размеру объекта: 1 – освещающий пучок; 2 – объект; 3 – объектный пучок света; 4 – опорный пучок; 5 – матричный фотоприемник; 6 – линзовый объектив; 7 – апертурная диафрагма

При записи голограммы сфокусированного изображения на матрице фотоприемника формируется изображение объекта. Поэтому цифровая голограмма объекта  $I(\vec{\rho}'_0)$  уже содержит информацию об изображении объекта  $U_S(\vec{\rho}'_0)$  и  $I_S(\vec{\rho}'_0)$ :

$$I(\vec{\rho}'_0) = I_S(\vec{\rho}'_0) + I_R + U_S(\vec{\rho}'_0)U_R^* + U_S^*(\vec{\rho}'_0)U_R = I_S(\vec{\rho}'_0) + I_R + 2A_S(\vec{\rho}'_0)A_R \cos[\varphi_S(\vec{\rho}'_0) - \varphi_S(\vec{\rho}'_0)]. \quad (2)$$

В данном уравнении содержится информация об амплитуде  $A_S(\vec{\rho}'_0)$  и фазе  $\varphi_S(\vec{\rho}'_0)$  объектной волны. Для восстановления комплексной амплитуды объектного поля  $U_S(\vec{\rho}'_0) = A_S(\vec{\rho}'_0) \exp[i\varphi(\vec{\rho}'_0)]$  необходимо выполнить численное преобразова-

ние голограммы  $I(\vec{\rho}'_0)$ , полосовую фильтрацию в пространственно-частотном спектре голограммы, а затем обратное (или еще раз прямое) Фурье-преобразование отфильтрованного пространственного спектра [8]. В соответствии с уравнением (2) имеем:

$$F\{I\} = F\{I_S\} + F\{I_R\} + F\{U_S\} \otimes F\{U_R^*\} + F\{U_S^*\} \otimes F\{U_R\}, \quad (3)$$

где первое слагаемое  $F\{I_S\}$  определяет спектр интенсивности изображения объекта; второе слагаемое  $F\{I_R\}$  – спектр интенсивности опорной волны, который в силу постоянства  $I_R$  сосредоточен в области нулевых частот; третье и четвертое слагаемые определяют спектры сопряженных комплексных амплитуд изображения объекта, смещенных в область высоких положительных и отрицательных частот, определяемых пространственной частотой опорной волны  $f_R = \pm \lambda_0^{-1} \sin \theta$  в силу наклонного падения опорной волны под углом  $\theta$  на матрицу.

На рис. 3 представлено изображение пространственного спектра  $F\{U_S\}$  цифровой голограммы сфокусированного изображения  $I(\rho)$ , полученного путем Фурье-преобразования голограммы. При записи этой голограммы  $I(\vec{\rho}'_0)$  квазиточечный опорный источник  $S_R$  (см. рис. 2) располагался в плоскости выходного зрачка объектива. Следовательно, выполнялось условие записи безлинзовой голограммы Фурье выходного зрачка. Поэтому в спектре на рис. 3 боковые изображения  $|F\{U_S^*U_R\}|^2$  и  $|F\{U_SU_R^*\}|^2$  представляют собой распределения интенсивности объектного поля (и поля комплексно ему сопряженного) выходного зрачка объектива.

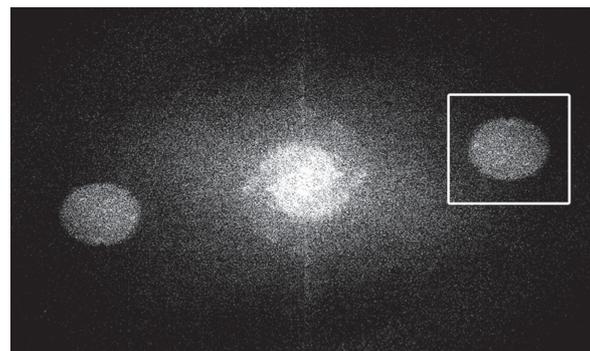


Рис. 3. Фильтрация объектных компонент пространственного спектра цифровой голограммы сфокусированного изображения

Фильтрация пространственного спектра комплексной амплитуды изображения  $F\{U_SU_R^*\}$  или  $F\{U_S^*U_R\}$ , как это показано на рис. 3, и обратное Фурье-преобразование отфильтрованного участка



спектра позволяют восстанавливать комплексную амплитуду поля изображения объекта:

$$F^{-1}\{BF\{U_S^*U_R\}\} = F^{-1}\{B\} \otimes (U_S^*U_R), \quad (4)$$

где  $B$  – апертурная функция окна фильтрации спектра.

Таким образом, пространственно частотная фильтрация цифровой голограммы сфокусированного изображения объекта позволяет восстанавливать с определенной точностью комплексную амплитуду поля изображения объекта и реализовать в численном виде метод голографической интерферометрии микроперемещений рассеивающих объектов или путем формирования интерференционных полос на изображении объекта, или путем непосредственного вычисления

полей фазовых сдвигов объектного поля  $\Delta\Psi(\vec{\rho}_0)$ , вызванных микросмещениями.

#### 4. Определение поля микроперемещений поверхности объекта

На рис. 4 представлены голографические изображения-интерферограммы, полученные методом цифровой голографической интерферометрии. Объектом контроля служила упругая пластина-мембрана, жестко закрепленная по контуру, подвергаемая деформации под действием сосредоточенной силы, приложенной по нормали в центре с обратной стороны пластины. В результате действия приложенной силы точки поверхности объекта претерпевают микросмещения, поле которых и являются предметом исследования.

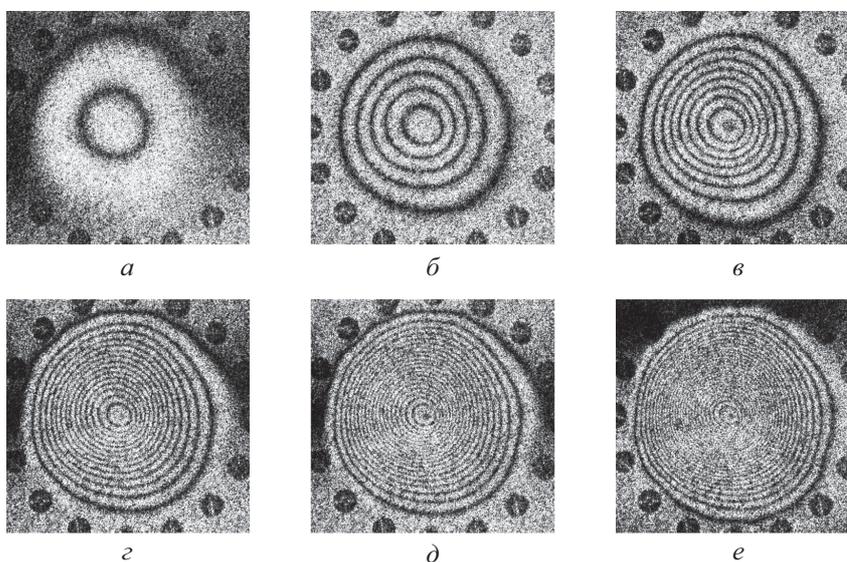


Рис. 4. Цифровые интерферограммы деформации мембраны под действием сосредоточенной силы для различных величин нагрузки, Н :  $a - 0,031$  Н;  $b - 0,154$  Н;  $в - 0,308$  Н;  $г - 0,462$  Н;  $д - 0,615$  Н;  $e - 0,769$  Н

В эксперименте записываются цифровые голограммы изображений объекта, соответствующие его различным деформационным состояниям. Метод цифровой голографии предоставляет возможность записи достаточно большого числа голограмм, соответствующих различным последовательным состояниям объекта. Такая многоэкспозиционная запись голограмм позволяет существенно расширить сверху диапазон измеряемых смещений и деформаций контролируемого объекта.

Восстановленные комплексные амплитуды объектных полей, соответствующие различным состояниям объекта, имеют различные фазовые распределения, вызванные изменением пространственного положения точек поверхности

исследуемого объекта. Если амплитуды полей не изменяются, а меняются только фазы полей, то распределение интенсивности в суммарном изображении имеет вид

$$I(\vec{\rho}_0) = 2I_{ik}(\vec{\rho}_0)[1 + \cos(\Delta\Psi_{ik}(\vec{\rho}_0))], \quad (5)$$

где индексы  $i$  и  $k$  определяют различные состояния объекта.

Получаемое действительное цифровое изображение  $I(\vec{\rho}_0)$  согласно (5) оказывается промодулированной косинусоидальной функцией, зависящей от разности фаз. В методе цифровой голографической интерферометрии эта модуляция проявляется в виде системы интерференционных полос, образующихся на восстановленном голографическом изображении.



Система интерференционных полос на изображении пластины качественно и количественно отражает поле микроперемещений  $\vec{g}(\vec{\rho}_0)$  точек поверхности пластины. Пространственное фазовое распределение  $\Delta\Psi(\vec{\rho}_0)$  определяется выражением

$$\Delta\Psi(\vec{\rho}_0) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{g}(\vec{\rho}_0) (\vec{N}_0 - \vec{N}_S), \quad (6)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны,  $\vec{N}_0$  и  $\vec{N}_S$  – единичные вектора направлений освещения и регистрации голограммы.

На рис. 5 представлены графики распределения смещений, рассчитанные с использованием (6), для различных величин сосредоточенной нагрузки в зависимости от координат в плоскости объекта.

Анализ полученных интерферограмм проводился следующим образом: для каждой интерференционной картины (см. рис. 4) определялась пространственная фазовая модуляция  $\Delta\Psi(x)$  в на-

правлении оси  $x$ , обусловленная смещением точек поверхности исследуемого отражающего объекта. Определялись дискретные значения  $\Delta\Psi_m(x_i) = m\pi$  по точкам пересечения оси  $x$  с центрами светлых и темных полос. Далее с использованием выражения (6) рассчитывались значения вектора смещения.

Методом цифровой голографической интерферометрии были исследованы деформационные смещения ряда узлов и конструкций различного технического назначения и различной формы: резервуары с плоскими (рис. 6, рис. 7) и цилиндрическими поверхностями, претерпевающие деформации под действием распределенных сил статического и динамически изменяющегося давления; упругие детали под действием точечной деформирующей нагрузки, а также промышленные сварные конструкции и узлы запорных соединений и элементов газораспределительных пунктов.

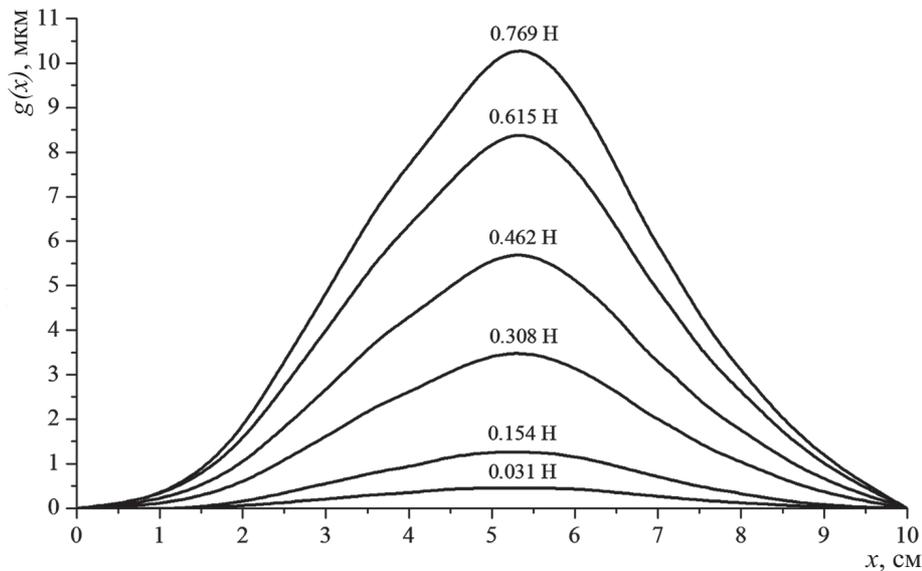


Рис. 5. Рассчитанный профиль деформации мембраны под действием сосредоточенной силы для различных величин нагрузки

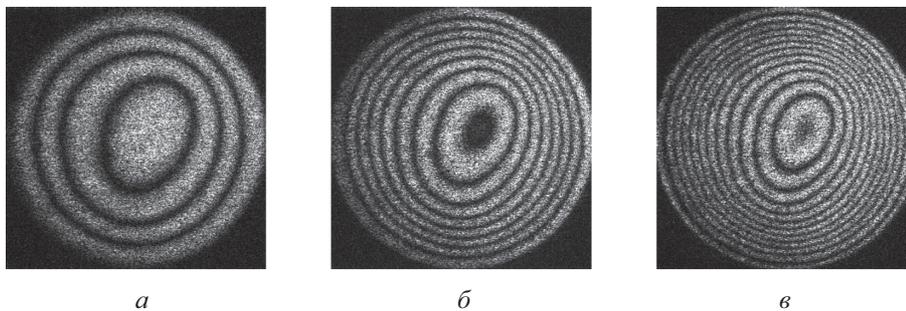


Рис. 6. Цифровые интерферограммы деформации мембраны под действием распределённой силы для различных величин избыточного давления МПа: а – 0.78 МПа; б – 1.86 МПа; в – 2.35 МПа

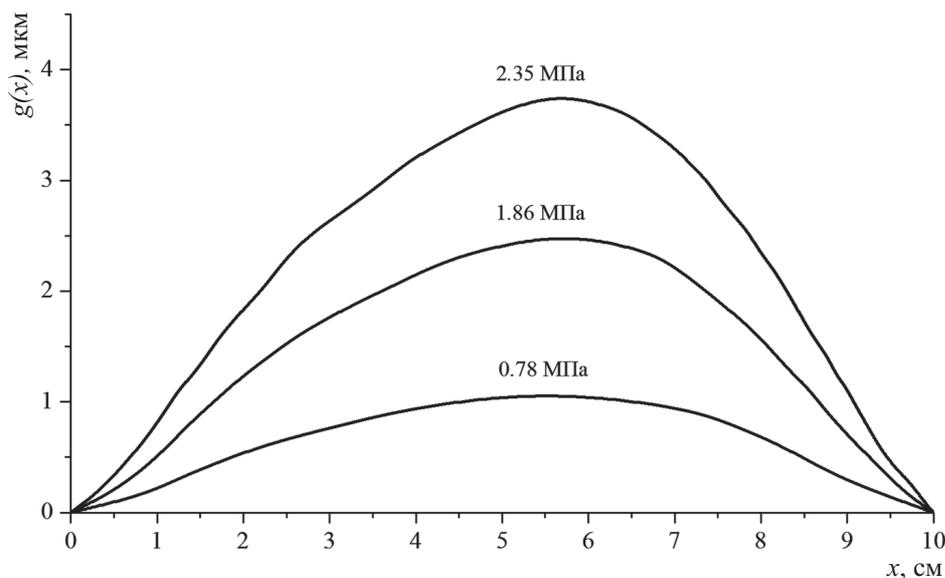


Рис. 7. Рассчитанный профиль деформации мембраны под действием распределённой силы для различных величин избыточного давления

### Заключение

Цифровые голографические интерференционные измерения позволяют определять поля микросмещений и соответственно микродеформаций объектов – реальных деталей и конструкций с рассеивающей оптически негладкой поверхностью. Применение апостериорной компьютерной обработки серии цифровых голограмм предоставляет новые практические возможности для определения поля микродеформаций с субмикронной точностью в широком диапазоне перемещений – от долей до сотен микрометра. Относительно высокие частотные параметры современных цифровых матричных фотоэлектрических приборов предопределяют возможность исследования динамически изменяющихся деформационных процессов. Эти измерительные возможности метода многоэкспозиционной цифровой голографической интерферометрии могут найти эффективное применение в прикладных задачах механики деформируемого тела, в задачах исследования напряженно деформируемых состояний конструкций при их прочностных испытаниях, включая вибрационные и ударные испытания. Совершенствование метода цифровой голографической интерферометрии – повышение разрешающей способности и функциональных возможностей – во многом связано с прогрессом развития цифровых устройств фото-

электрической записи оптических изображений и развитием программных средств обработки этих изображений.

### Список литературы

1. Schnars U., Jueptner W. Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction // *Appl. Opt.* 1994. Vol. 33, № 2. P. 179–181.
2. Pedrini G., Osten W., Gusev M. E. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement // *Appl. Opt.* 2006. Vol. 45, № 15. P. 3456–3462.
3. Балтийский С. А., Гуров И. П., Де Никола С., Коннола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики* / под ред. И. П. Гурова и С. А. Козлова. СПб., 2004. С. 91–117.
4. Schnars U., Jueptner W. *Digital Holography*. Berlin, 2004. 164 p.
5. Kreis T. *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. Wiley: VCH, 2005. 542 p.
6. Onural L. Sampling of the Diffraction Field // *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39, № 32. P. 5929–5935.
7. Краснопевцев Е. А. Преобразование Фурье–Френеля в голографической интерферометрии // *Оптический журн.* 2006. Т. 73, № 2. С. 31–36.
8. Абрамов А. Ю., Савонин С. А., Диков О. В., Перепелицына О. А., Рябухо В. П. Цифровая голографическая интерферометрия сфокусированных изображений фазовых микрообъектов // *Фундаментальные проблемы оптики-2010: сб. тр. конф.* / под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. СПб., 2010. Т. 1. С. 272–274.