

УДК 539.3

Шевченко<sup>1</sup> В.П. акад. НАН України, д.ф.-м.н., проф., Власов<sup>2</sup> О.И., Каиров<sup>2</sup> В.А.

1-Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина; 2-Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКТИВНО НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Shevchenko<sup>1</sup> V., Vlasov<sup>2</sup> O., Kairov<sup>2</sup> V.1-Donetsk National University, Donetsk, Ukraine; 2-National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Nikolaev, Ukraine ([alex-kairov@yandex.ru](mailto:alex-kairov@yandex.ru))

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF CONSTRUCTIONAL NON-HOMOGENEOUS CILINDRICAL SHELLS FREE OSCILLATIONS

Рассмотрены свободные колебания тонких упругих подкрепленных ребрами конструктивно неоднородных цилиндрических оболочек вращения с присоединенными твердыми телами. Приведены результаты экспериментальных исследований собственных частот и форм колебаний. Получены зависимости влияния подкрепляющих ребер и присоединенных твердых тел на амплитудно-частотные характеристики оболочечных конструкций. Изложена методика исследования. Представлены интерферограммы основных форм колебаний. Выполнен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с расчетными. Исследования проводились методом голографической интерферометрии.

Ключевые слова: свободные колебания, цилиндрические оболочки, подкрепляющие ребра, присоединенные твердые тела, голографическая интерферометрия.

#### Введение

Тонкостенные оболочечные конструкции широко применяются в машиностроении, авиастроении и других отраслях современной техники. Наличие ребер жесткости и присоединенных твердых тел создают локальную инерционную неоднородность оболочек и оказывают существенное влияние на их основные динамические характеристики, что определяет актуальность рассматриваемой проблемы. Особое место в исследовании динамики оболочечных конструкций занимают задачи свободных колебаний. Свободным колебаниям подкрепленных ребрами тонких упругих оболочек с присоединенными твердыми телами посвящено сравнительно небольшое число экспериментальных исследований. Обзор экспериментальных результатов и методов исследований, посвященных данной проблеме, приведен в работах [1-4], среди которых наиболее эффективным является метод голографической интерферометрии [5-8].

#### Цель исследования

Разработка комплекса мероприятий по повышению вибропрочности оболочечных конструкций требует детального изучения колебательных процессов, протекающих в них под воздействием динамических нагрузок. Поэтому разработанные математические модели и полученные численные результаты требуют экспериментального подтверждения.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния подкрепляющих ребер и присоединенных твердых тел на частоты и формы свободных колебаний тонких упругих конструктивно неоднородных оболочек.

#### Исследование

Исследования проводились на моделях тонкостенных цилиндрических оболочек, регулярно подкрепленных равноотстоящими стрингерами 4x1 мм и шпангоутами 6x1 мм прямоугольного профиля. Оболочки изготовлены из стали с относительными геометрическими характеристиками:  $L/R = 2,3$ ;  $R/h = 115$ ;  $R = 75$  мм, где  $R$ ,  $L$ ,  $h$  – их радиус, длина и толщина.

Эксперименты выполнялись на вибростенде, функциональная схема которого представлена на рис. 1. Модели устанавливались в специальном зажимном приспособлении, реализующем граничные условия, имитирующие жесткое  $C-C$ , шарнирное  $S-S$  и консольное  $C-F$  закрепление контуров. Собственные частоты и формы колебаний определялись в режиме резонансного возбуждения. Исследован нижний и средний диапазоны спектра частот колебаний оболочек.

Формы колебаний, соответствующие возбуждаемым частотам и характеризующиеся в окружном направлении числом волн  $n_1$ , а в осевом – совокупностью полуволн  $m$ , определялись методом голографической интерферометрии, который при установившихся гармонических колебаниях позволяет регистрировать распределение виброперемещений поверхности модели при амплитуде порядка длины световой волны.

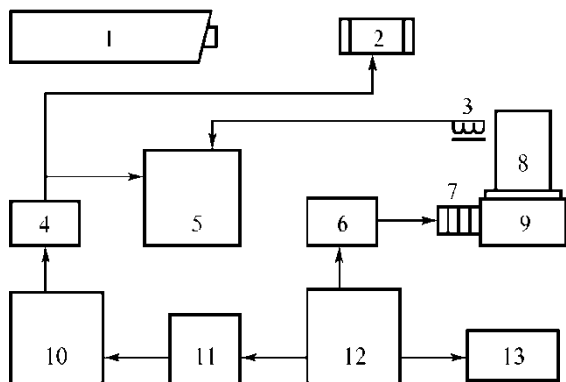


Рис. 1. Функциональная схема вибростенда

Гармонические колебания оболочки возбуждались контактным пьезоэлектрическим вибратором, жестко связанным с зажимным приспособлением, реализующим заданные граничные условия. Такая схема возбуждения колебаний исключает нежелательное влияние случайных факторов на собственные частоты и искажение соответствующих им формообразований. Возбуждаемые частоты регулировались звуковым генератором синусоидальных импульсов, задающим через усилитель 6 питание вибратора током переменной частоты. Генератор формирует электрические синусоидальные импульсы перестраиваемой длительности с регулируемой задержкой и осуществляет с помощью фазовращателя их синхронизацию с колебаниями модели.

Состояние резонанса определялось двухлучевым осциллографом, на горизонтальный вход которого с генератора прямоугольных импульсов после усиления усилителем 4 подавались электрические сигналы, синхронизированные фазовращателем по фазе с сигналами звукового генератора, а на вертикальный вход – электрические сигналы, генерируемые индукционным датчиком и согласованные по фазе с колебаниями модели.

Оптическая схема стробоскопического комплекса для регистрации и интерферограмм собственных форм колебаний оболочек приведена на рис.2 и включает в себя: 1 – лазер; 2 – модулятор лазерного луча; 3 – светоделительный клин; 4-6 – плоские зеркала; 7, 13, 15 – криволинейные зеркала; 9, 10, 12 – микрообъективы; 8, 14, 16 – фотопластинки; 17 – оболочка.

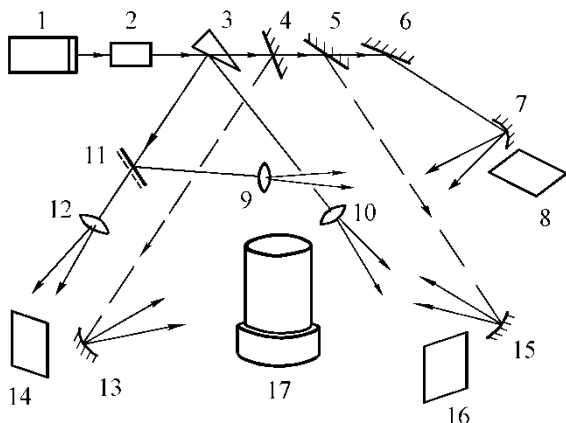


Рис. 2. Оптическая схема стробоскопического комплекса

Формы колебаний, соответствующие возбуждаемым частотам и характеризующиеся волновыми числами  $m$  и  $n_1$ , определялись с помощью осциллографа путем фиксации радиальных прогибов оболочки при перемещении индукционного датчика 3 вдоль линий ее главных кривизн. Количество узловых линий на наружной поверхности модели подсчитывалось по числу минимумов напряжения в сети пропорционально амплитуде колебаний. Датчик 3, снабжен выходом для регистрации электрических сигналов на осциллографе, пропорциональных величине прогиба и совпадающих по фазе с виброперемещениями. Соответствующие частоты колебаний измерялись электронным частотомером. Фиксируемые формы колебаний регистрировались методом голографической интерферометрии, который при установившихся гармонических колебаниях позволяет регистрировать распределения виброперемещений поверхности модели при амплитуде порядка длины световой волны. Для регистрации интерферограмм использовалась двухлучевая оптическая схема. С целью повышения контрастности интерферограмм и их расшифровки применялось стробирование генерируемого луча лазера. Стробирование осуществлялось электрооптическим модулятором, питающимся от звукового генератора через фазовращатель, генератор прямоугольных импульсов и усилитель 4. Частота стробирования задавалась кратной частоте колебаний модели. Контроль синхронизации стробимпульсов с частотой колебаний модели осуществлялся двухлучевым осциллографом.

Уровень возбуждения подбирался таким, чтобы прогиб в пучности не превышал  $1/20$  толщины оболочки, соответствовал амплитудам колебаний и обеспечивал нормальную разрешимость полос на интерферограммах.

**Основные результаты и их анализ**

Ниже приведены результаты исследований динамического поведения подкрепленных оболочек с жестко присоединенными твердыми телами. Полученные результаты исследований зависимости низшей частоты от количества подкрепляющих стрингеров  $N_1$  приведены в табл. 1, где параметры  $f_3$  и  $f_T$  соответствуют экспериментальным и теоретическим значениям частот.

Таблица 1

**Зависимость частоты колебаний от количества стрингеров**

$N_1$	Парам.	$C-C$	$S-S$	$C-F$
–	$f_T$	1517	1072	622
	$f_3$	1466	1041	615
12	$f_T$	1645	1115	625
	$f_3$	1609	1097	619
24	$f_T$	1722	1146	627
	$f_3$	1679	1127	620
36	$f_T$	1769	1165	628
	$f_3$	1714	1143	624

Зависимость частот колебаний подкрепленной 12 стрингерами незагруженной оболочки от волновых чисел  $n_1$  приведена на рис.3,а. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют граничным условиям: жесткое закрепление, шарнирное опирание и консольное закрепление. Пунктиром обозначены расчетные значения спектра частот, а сплошной – полученные экспериментально.

Из анализа экспериментальных и расчетных данных следует, что увеличение количества стрингеров оказывает незначительное влияние на минимальную частоту и на низший спектр частот колебаний в целом. Формообразования стрингерной и гладкой оболочек практически совпадают. Волновые числа для граничных условий  $C-F$ ,  $S-S$  и  $C-C$  принимают значения  $n_1 = 4, 5, 6$  соответственно. При наружном подкреплении поверхности собственные частоты несколько выше, чем при внутреннем. Стрингеры вносят незначительные локальные искажения в амплитудные поля перемещений поверхности, сужая их.

В отличие от стрингеров, изгибную жесткость оболочки в радиальной плоскости значительно увеличивают шпангоуты, понижая волновое число  $n_1$  для основной формы колебаний. В табл. 2 для оболочки, подкрепленной с наружной стороны равноотстоящими шпангоутами, приведена зависимость низшей частоты и окружающих волновых чисел  $n_1$  от количества ребер  $N_2$ .

Таблица 2

**Зависимость частоты колебаний от количества шпангоутов**

$N_2$	$C-C$			$S-S$			$C-F$		
	$f_T$	$f_3$	$n_1$	$f_T$	$f_3$	$n_1$	$f_T$	$f_3$	$n_1$
1	2084	2011	4	1520	1487	4	779	740	3
2	2158	2096	4	1649	1585	4	840	812	3
3	2210	2174	4	1752	1694	4	896	854	3
4	2263	–	4	1768	–	3	945	–	3
5	2312	–	3	1776	–	3	990	–	3

Из анализа полученных результатов следует, что для подкрепленных оболочек имеет место существенное повышение основной частоты колебаний. Минимальным собственным частотам усиленных шпангоутами оболочек, также как и для неподкрепленных, соответствуют изгибные формы колебаний с одной полуволной в продольном направлении ( $m=1$ ) и с максимальной амплитудой перемещений в направлении нормали к срединной поверхности. Амплитудно-частотные характеристики оболочек зависят в основном от жесткости, количества, расположения и эксцентриситета шпангоутов. При этом общая деформация ребер определяется изгибными и крутильными составляющими, а составляющие деформации растяжения-сжатия минимальны. Поэтому при расчете колебаний в большинстве случаев этой составляющей можно пренебречь.

Комбинированное подкрепление оболочки стрингерами и шпангоутами приводит к повышению спектра частот, локализации деформаций между ребрами и снижению амплитуды колебаний.

Присоединенные тела также оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные характеристики оболочек. В процессе эксперимента исследованы частоты колебаний оболочки с жестко присоединенным в среднем сечении к ее поверхности твердым телом. Влияние присоединенного тела на частоты колебаний, подкрепленной 12 стрингерами жестко закрепленной оболочки видно на рис.3,б. Кривая 1 соответствует незагруженной оболочке, а кривая 2 – оболочке с присоединенным твердым телом, масса которого составляет 0,04 кг. При этом отношение массы присоединенного тела к массе незагруженной оболочки составляет  $M_1 / M_0 = 0,1$ .

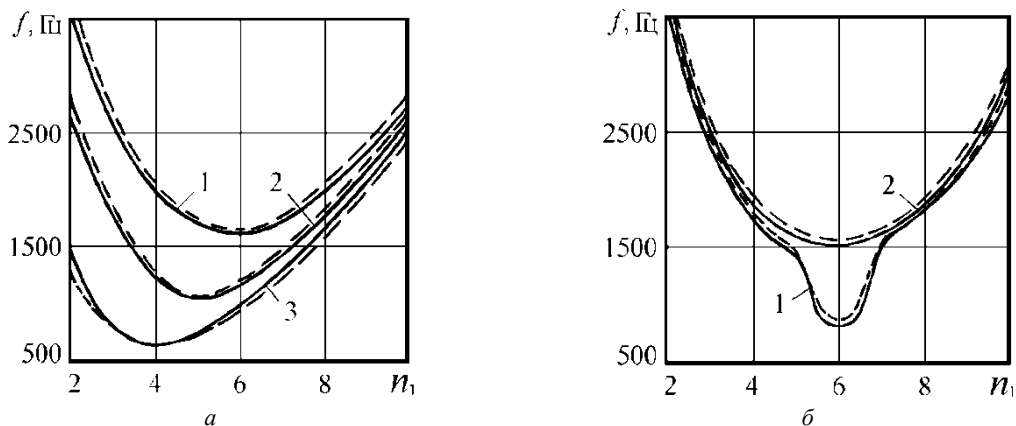


Рис. 3. Зависимость частот колебаний подкрепленных стрингерами оболочек от волновых чисел  $n_1$

Полученные данные подтверждают положение о том, что присоединенные твердые тела приводят к понижению спектра частот, однако степень их изменения для различных формообразований неодинакова. Необходимо отметить существенное отличие в поведении оболочки, совершающей колебания на основной частоте, от колебаний на неосновных частотах. Присоединенное тело даже сравнительно небольшой массы приводит к заметному снижению основной частоты. С увеличением массы тела низшая частота понижается в большей степени и влияние граничных условий на колебания ослабевает. Остальные частоты спектра понижаются незначительно. При этом присоединенное тело демпфирует виброперемещения оболочки в своей окрестности и является гасителем колебаний для части ее поверхности. В верхнем диапазоне спектра частоты располагаются настолько плотно, что формы колебаний при незначительном плавном изменении частоты возбуждения резко переходят одна в другую.

Таким образом, присоединенные твердые тела даже сравнительно небольшой массы приводят к понижению спектра частот, и особенно низшей частоты, что вызывает необходимость осуществления мероприятий по их отстройке от нежелательных резонансов. Наиболее оптимальным подходом при решении данной проблемы является варьирование количества, жесткости и расположения подкрепляющих ребер относительно присоединенных тел.

Влияние системы присоединенных тел на колебания исследовалось на примере оболочки с двумя присоединенными телами, расположенными в ее среднем сечении вдоль окружности. Зависимость низшей частоты колебаний от угла  $\theta_m$  между центрами масс присоединенных тел представлена в табл. 3. Сравнение приведенных данных показывает, что для различных граничных условий существует такой угол между телами, при котором низшая частота колебаний достигает своего наибольшего и наименьшего значений. При малых углах  $\theta_m$  влияние присоединенных тел существенно, но с увеличением расстояния между ними оно ослабевает.

Таблица 3

Зависимость частоты колебаний от угла расположения между телами

Гранич услов.	Частота Гц	Угол между телами $\theta$ , град						
		0	30	60	90	120	150	180
C–C	$f_3$	435	524	565	592	595	590	587
	$f_T$	456	548	592	617	620	618	616
C–F	$f_3$	368	522	497	470	485	495	490
	$f_T$	395	551	530	496	517	520	514

Система присоединенных тел оказывает влияние и на соответствующие формообразования. На рис. 4,а представлена интерферограмма основной формы колебаний ( $m = 1, n_1 = 4$ ) с частотой 485 Гц консольно закрепленной неподкрепленной оболочки с двумя присоединенными телами, расположенными под углом  $120^\circ$  в окружном направлении. Наблюдаемые на интерферограммах интерференционные полосы указывают границы

полей виброперемещений поверхности модели равных амплитуд, пропорционально периоду времени существования каждого из них. Светлые полосы соответствуют неподвижным участкам колеблющейся поверхности и отождествляются с нулевой полосой, а темные – подвижным. Приведенное формообразование отличается от формы колебаний незагруженной оболочки и характеризуется локализацией перемещений поверхности в области крепления тела с быстрым затуханием при удалении от него. Наибольшие прогибы образуются в точке крепления тела и ограничены близлежащими ребрами. С увеличением расстояния между телами их взаимовлияние ослабевает. Таким образом, из полученных интерферограмм видно, что присоединенные тела оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные характеристики колебаний оболочки.

С увеличением жесткости конструкции шпангоутами влияние присоединенных тел уменьшается, в результате чего частоты колебаний возрастают. Шпангоуты в отличие от стрингеров значительно увеличивают изгибную жесткость в радиальной плоскости и вносят локальные искажения в амплитудные поля виброперемещений поверхности оболочки, понижая волновое число  $n_1$  для основной формы колебаний.

Соответствующее низшей частоте формообразование отличается от формы колебаний незагруженной оболочки и характеризуется преобладанием перемещений в окрестности точки крепления тела, ограниченной ближними ребрами, над перемещениями остальных участков поверхности и быстро затухают с удалением от него. Это хорошо видно на интерферограмме, основной формы колебаний консольно закрепленной оболочки, приведенной на рис.4,б. Оболочка подкреплена снаружи двумя равноотстоящими шпангоутами и колеблется с частотой  $f_3 = 750$  Гц ( $m=1, n_1=3$ ). Наибольшие деформации соответствуют максимальным амплитудам перемещений. Амплитуды колебаний уменьшаются с ростом частоты  $f$  и волновых чисел  $m$  и  $n_1$ .

На неосновных частотах присоединенное тело в меньшей степени влияет на колебания, демпфируя виброперемещения оболочки в своей окрестности, а при возбуждении некоторых формообразований практически не участвует в колебательном процессе. Это видно на интерферограмме одной из характерных форм колебаний оболочки с двумя присоединенными телами, расположенными между шпангоутами, на частоте 1310 Гц ( $m=1, n_1=5$ ), представленной на рис.4,в. При этом частота и форма колебаний соответствуют незагруженной оболочке ( $f_3 = 1300$  Гц,  $n_1=5$ ).

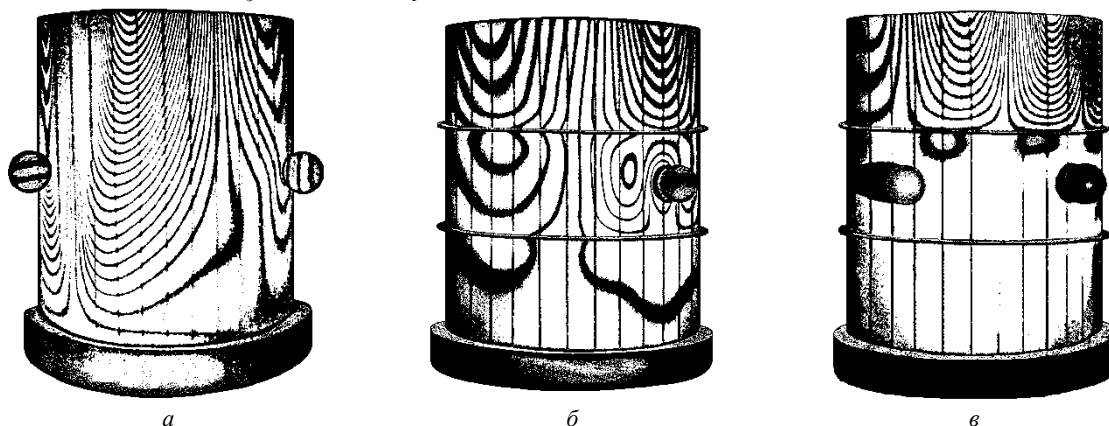


Рис. 4. Интерферограммы резонансных форм колебаний гладкой и подкреплённой оболочек с присоединёнными твердыми телами

Таким образом, из полученных интерферограмм видно, что присоединенные тела и подкрепляющие ребра оказывают существенное влияние на амплитудно-частотные характеристики колебаний оболочки, а также на распределение внутренних деформаций и напряжений. При комбинированном подкреплении оболочки равноотстоящими стрингерами и шпангоутами присоединенное тело меньше сказывается на частотах колебаний, его влияние на формообразования более локализовано и ограничено областью близко расположенных ребер.

Для отстройки амплитудно-частотных характеристик оболочек от нежелательных резонансов наиболее оптимальным подходом является варьирование количества, жесткости и расположения подкрепляющих ребер относительно присоединенных тел.

#### Выводы

С использованием метода голографической интерферометрии исследованы свободные колебания оболочечных конструкций. Выявлены новые зависимости, закономерности и физико-механические эффекты, обусловленные конструктивными неоднородностями оболочечной системы, имеющие важное практическое значение.

Полученные результаты показывают, что подкрепляющие ребра и присоединенные твердые тела оказывают существенное влияние на собственные частоты и формы колебаний оболочек, а также на распределение внутренних деформаций и напряжений. Разработаны мероприятия по улучшению основных вибродинамических характеристик конструктивно неоднородных оболочек, позволяющие повысить их вибропрочность и несущую способность.

Разработанная методика и полученные результаты могут быть использованы для повышения вибропрочности элементов корпусов турбомашин и других оболочечных конструкций, применяемых в современной технике.

**Анотація.** Розглянуто вільні коливання тонких пружних підкріплених ребрами конструктивно неоднорідних циліндричних оболонок обертання з приєднаними твердими тілами. Приведені результати експериментальних досліджень власних частот та форм коливань. Одержані залежності впливу підкріплюючих ребер і приєднаних твердих тіл на амплітудно-частотні характеристики оболочкових конструкцій. Викладено методику досліджень. Представлені інтерферограми основних форм коливань. Виконано порівняльний аналіз одержаних експериментальних даних з розрахунковими. Дослідження виконувалися методом голографічної інтерферометрії.

**Ключові слова:** вільні коливання, циліндричні оболонки, підкріплюючі ребра, приєднані тверді тіла, голографічна інтерферометрія.

**Abstract.** Free oscillations of the thin, elastic reinforced cylindrical shells with attached solid bodies have been researched. The comparison analysis results of the obtained experimental data with the the results of calculation are also given.

**Purpose.** The experimental decision of the reinforcing stringers and attached solid bodies influence on the thin elastic non-homogeneous shells constructions' free oscillations forms and frequencies.

**Design/methodology/approach.** The results of thin elastic reinforced steel cylindrical shells with attached solid bodies free oscillations forms and frequencies experimental decision are given. The experimental methodology and the apparatus used in this experiment are also described. Amplitudes and frequencies of the investigated shells were obtained on the special vibration apparatus according to the resonance procedure by the usage of holographic interferometry method. The interferograms of several oscillation forms have been obtained. The interferograms' contrast range was achieved by laser ray's optical disk usage. It was also researched the influence of the construction features on the shells' frequencies and amplitudes. The analysis of the obtained results is also attached.

**Findings.** The influence of reinforcing stringers and attached solid bodies on the shells' oscillation forms and frequencies has been researched. The dependencies between oscillation frequencies and different oscillation forms wave numbers have been obtained too. The lowest and the medium frequencies' spectrums were also investigated.

**Originality/value.** The developed methodology and obtained experimental data can be used for turbine engines frames and other shell constructions, which are used in modern technique, vibrodurability increase.

**Keywords:** Free oscillation, Cylindrical shells, Reinforced ribs, Solid attached bodies, Holographic interferometry.

#### Библиографический список использованной литературы

1. Заруцкий В.А. О комплексных экспериментальных исследованиях устойчивости и колебаний конструктивно-неоднородных оболочек // Прикл. механика. – 2001. – Т.37, № 8. – С.38-67.
2. Kairov A.S. An experimental study of the natural vibrations of supported shells / A.S. Kairov // Jour. of mathematical sciences. – New York, 1995. – 77, № 6. – P.3533-3536.
3. Писаренко Г.С. Экспериментальные методы в механике деформируемого тела / Г.С. Писаренко, В.А. Стрижало.– К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
4. Экспериментальная механика конструкций: в 2 кн. Кн.1; пер. с англ. / Под.ред. А. Кабаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия: Пер. с англ. / Ч. Вест. – М.: Мир, 1982. – 504 с.
6. Гинзбург В.М. Голографические измерения / В.М. Гинзбург, Б.М. Степанов. – М.: Радио и связь, 1981. – 296 с.
7. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике / А.Г. Козачок. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.
8. Островский Ю.И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций / Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев. – М.: Наука, 1988. – 248 с.

#### References

1. Vest Ch. Golograficheskaya interferometriya [The holographic interferometry] Moscow: Mir, 1982. 504 p.
2. Ginzburg V.M. Golograficheskie izmereniya [The holographic measurement] Moscow: Radio i svyaz', 1981. 296 p.
3. Zarutskij V.A. O kompleksnyh jeksperimental'nyh issledovaniyah ustojchivosti i kolebanij konstruktivno-neodnorodnyh obolochek (The complex research of constructional non-homogeneous shells oscillation and stability) The Applied Mechanics Journal. 2001. V.37, No 8 pp. 38-67.
4. Kozachok A. G. Golograficheskie metody issledovaniya v jeksperimental'noj mekhanike [The methods of holographic research in the experimental mechanics] Moscow: Mashinostroenie, 1984. 176 p.
5. Kairov A.S. An experimental study of the natural vibrations of supported shells. A.S. Kairov. Jour. of mathematical sciences. New York, 1995. 77, No 6. P.3533-3536.
6. Ostrovskij Yu. I. Golograficheskie interferentsionnye metody izmereniya deformatsij [Holographic interferential methods of deformation's measurement] Moscow: Nauka, 1988. 248 p.
7. Pisarenko G. S. Jeksperimental'nye metody v mehanike deformiruемого tela [Experimental methods in the mechanics of deformed body] Kiev: Naukova dumka, 1986. 264 p.
8. Kabayasi A. Jeksperimental'naya mekhanika konstruksij [The experimental mechanics of constructions] V.1 Moscow: Mir, 1990. 616 p.