

**УДК 539.3:004.942**

**В.И. ОЛЕВСКИЙ** канд. техн. наук, доц., КТВМ ГВНЗ УДХТУ,  
г. Днепропетровск

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОБОЛОЧЕК  
С НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ**

Показана возможность использования пространственной изменчивости собственных свободных колебаний тонкостенной цилиндрической оболочки с регулярными и нерегулярными несовершенствами для оценки величины ее несущей способности при действии осевого сжатия. Ключевые слова: изменчивость, устойчивость, несовершенства.

Показана можливість використання просторової змінності власних вільних коливань тонкостінної циліндричної оболонки з регулярними і нерегулярними недосконалостями для оцінки величини її несучої здатності при дії осьового стиснення. Ключові слова: змінність, стійкість, недосконалість.

The possibility of using the spatial variability of their own free vibrations of thin-walled cylindrical shell with regular and irregular imperfections is shown for estimation of its load-carrying capacity under the action of axial compression.

Key words: variability, stability, imperfections.

**1. Введение**

Реальные крупногабаритные оболочечные конструкции являются сложными пространственными сооружениями, форма которых не совпадает с идеальными обводами, предусмотренными в конструкторской документации. Причиной этого является особенность технологии изготовления, сборки и транспортировки оболочек. Потеря устойчивости является основной причиной разрушения оболочек, при этом величина критических усилий существенно отличается от расчетной нагрузки. Поэтому возникает необходимость усложнения расчетных схем, используемых для описания реального поведения оболочечных конструкций.

Собственная форма колебаний является одной из интегральных характеристик оболочек, и относятся к фундаментальным понятиям механики конструкций. В частности, она отражает важную особенность системы, связанную с ее жесткостью в поперечном направлении. несовершенства формы оболочек приводят к существенной неоднородности докритического деформирования, и, как следствие, к большим поперечным изгибам вплоть до уровня геометрической нелинейности. Поэтому влияние технологических несовершенств на несущую способность должно быть связано с близостью формы докритического деформирования к форме собственных колебаний конструкции.

В работах [1, 2] для продольно сжатых тонкостенных круговых цилиндрических оболочек введено понятие «статического резонанса» и

обосновано существование этого явления путем анализа экспериментальных и расчетных данных. Сущность статического резонанса заключается в том, что при совпадении окружной изменяемости первого тона собственных свободных поперечных колебаний с изменяемостью несовершенств, силового набора или нагрузки, происходит наибольшее снижение несущей способности конструкции. Изучению этой взаимосвязи и посвящена настоящая работа.

## 2. Описание экспериментальных исследований.

Исследования проводились на основе структурно-экстраполяционного анализа и многофакторных экспериментов по изучению влияния технологических несовершенств на параметр устойчивости продольно сжатой цилиндрической оболочки [3-5]. Применение многофакторного подхода позволяет корректно решить задачу о нелинейном совместном влиянии несовершенств на несущую способность конструкции. В экспериментах участвовали тонкостенные оболочки диаметром 0,143 м, толщиной стенки  $2,5 \times 10^{-4}$  м и длиной 0,2 м, изготовленные из стали марки X18H9-н. Статистические характеристики факторов приведены в табл. 1. Были реализованы двухфакторные эксперименты второго порядка на двух уровнях  $\alpha$  и  $a/b$ , на двух уровнях овальности нижнего  $(a/b)_H$  и верхнего  $(a/b)_B$  торцов при  $\alpha = 2^\circ 16'$ , а также на двух уровнях  $A_T$  и пяти уровнях  $n_T$ .

Таблица 1 - Статистические характеристики факторов

Описание переменных	Условные обозначения	Единица измерения	Среднее значение	Размах
Конусность	$\alpha$	минуты	96	40
Овальность	$a/b$	–	0,9	0,039
Неплоскостность				
Амплитуда	$A_T$	м	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,80 \times 10^{-5}$
Число волн	$n_T$	–	12	5

Испытанию на устойчивость на машине УМЭ-10ТМ подвергались оболочки с овальностью по нижнему и верхнему торцу, равной 0,84 и 0,96 и конусностью равной  $0^\circ 56'$  и  $2^\circ 16'$ , а также с числом волн неплоскостности по нижнему торцу  $n_T$ , равным 2, 5, 8 и 37 и амплитудой  $A_T$  0,15 мм и 0,25 мм.

## 3. Анализ экспериментальных данных

Испытания показали, что исчерпание несущей способности оболочек с неплоскостностью происходит преимущественно в два этапа – вначале достигается точка бифуркации, затем предельная точка. Для неплоскостности характерно соответствие прогибов числу волн и смещение их к возмущенному торцу. При этом если форма докритического изгиба близка к закритической по окружной изменяемости, то обе точки сливаются, и потеря устойчивости происходит в предельной точке. Значение критических напряжений в этом случае минимально.

Потеря несущей способности оболочки с конусностью и овальностью происходит в один этап, путем достижения предельной точки. Потеря устойчивости конической оболочки с одинаковой малой овальностью торцов

происходит по общей форме, близкой к собственной форме потери устойчивости овальной цилиндрической оболочки при действии равномерного осевого сжатия, но смещенной к большему торцу. На одной стороне оболочки появляются два - три пояса вмятин, расположенных у большего торца. Они охватывают панель меньшей кривизны и распространяются на боковую часть панелей большей кривизны. Локальные вмятины имеют относительно большие размеры и образуют регулярную не замкнутую форму выпучивания. Увеличение конусности и одинаковой овальности торцов приводит к смещению зоны волнообразования в продольном направлении к меньшему торцу при сохранении общего характера выпучивания. При высокой конусности (в пределах данного эксперимента) увеличение овальности нижнего торца при сохранении формы верхнего увеличивает продольную локализацию выпучивания, смещая вмятины еще ближе к нижнему торцу при сохранении изменчивости в окружном направлении. Наоборот, превалирование при высокой конусности овальности верхнего торца приводит к существенному смещению вмятин к торцу с большей овальностью.

По результатам эксперимента построены математические модели вида

$$K \times 10^2 = 20,505 + 0,563A_T - 2,519n_T - 0,506A_T n_T + 7,513n_T^2,$$

при  $(a/b)_H^\circ = (a/b)_B^\circ = (a/b)^\circ$

$$K \times 10^2 = 37,9 + 0,29\alpha^\circ - 1,2(a/b)^\circ - 1,4\alpha^\circ (a/b)^\circ$$

при  $\alpha^\circ = 1$

$$K \times 10^2 = 34,6 - 1,7(a/b)_H^\circ - 0,33(a/b)_B^\circ - 1,3(a/b)_H^\circ (a/b)_B^\circ$$

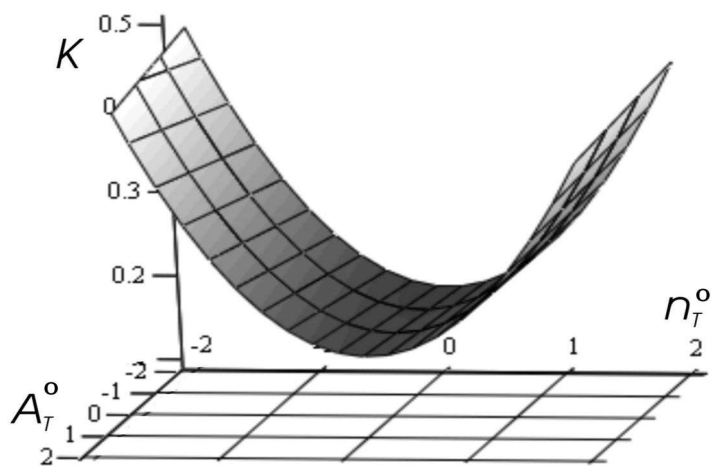
где  $(...)^{\circ}$  — стандартизированная величина;  $K = T_{кр} / 2\pi E \delta^2$  — коэффициент критических безразмерных напряжений;  $T_{кр}$  — критическое значение сжимающей нагрузки;  $E$  — модуль Юнга.

Полученные модели адекватны экспериментальным данным по критерию Фишера при 5%-ном уровне значимости. Присутствие в ней значимых членов второго порядка указывает на существенную нелинейность взаимосвязи параметров. Соответствующие им поверхности парных взаимодействий приведены на рис 1. Их анализ показывает, что для неплоскостности (рис 1а) в целом характерна зависимость, близкая к аналогичной для неоднородного осевого сжатия [2]. При этом увеличение амплитуды неплоскостности сдвигает кривую влево, изменяя тем самым значение наилучшего сочетания параметров несовершенств.

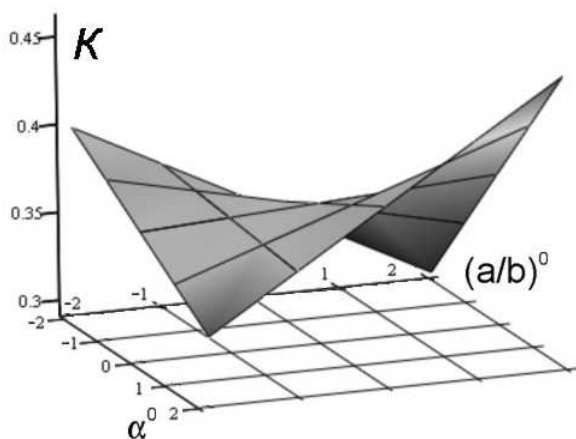
Для овально-конических оболочек увеличение одиночных несовершенств значительно снижает несущую способность оболочки. Кроме того, в рассматриваемых пределах овальность имеет большее влияние на параметр  $K$ , чем конусность (рис. 1б). При этом одновременное увеличение конусности и овальности может привести к повышению несущей способности до уровня, соответствующего бездефектной оболочке. Это является существенно нелинейным эффектом, который не мог быть найден в результате однофакторных экспериментов.

При развитой конусности овальность нижнего торца оказывает более значимое влияние на параметр критических усилий, чем овальность верхнего торца (рис. 1в). Совместное увеличение овальности торцов приводит к повышению несущей

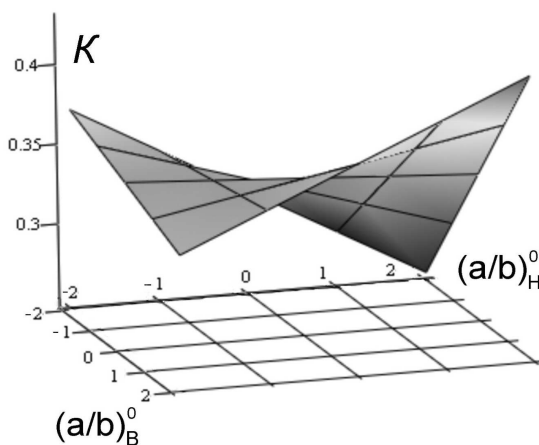
способности, что также является существенно нелинейным эффектом и хорошо согласуется с результатами, представленными на рис. 1б.



а)



б)



в)

Рис.1. Поверхности парных взаимодействий несовершенств для неплоскостности (а), конусности с овальностью (б) и конусности с разноовальностью (в)

#### 4. Оценка частоты поперечных колебаний

Изменение параметров несовершенств приводит к смещению частот свободных колебаний. Для неплоскостности, имеющей регулярную изменяемость, совпадающую с числом волн  $n_T$ , можно применить расчетные данные, полученные в работах Красовского В.Л. с соавторами [1,2] относительно неоднородного сжатия. При этом следует более детально рассмотреть влияние концентрации напряжений, которое может быть вызвано увеличением амплитуды волн неплоскостности, на окружную частоту собственных колебаний оболочки.

Вместе с тем, данный подход хорошо согласуется и для других типов рассмотренных несовершенств, изменяемость которых не совпадает с изменяемостью деформирования. Так, известны исследования [6] цилиндрических оболочек с эллиптическим поперечным сечением на основе метода голографической интерферометрии, которые демонстрируют, что в цилиндрических оболочках эллиптического сечения наблюдается понижение частот основного тона с увеличением эксцентриситета, при этом уменьшается число волн в окружном направлении. Модели изготавливались из рулонной стальной ленты, длина периметра для оболочек была постоянной и равнялась

длине окружности радиуса  $R = 44 \text{ мм}$ . Исследовались оболочки средней длины  $L$  с параметрами  $L/R = 1,13 \div 3,41$  и  $R/h = 183 \div 367$ . Отношение малых  $a$  больших  $b$  и полуосей для оболочек варьировалось в пределах  $a/b = 0,33 \div 1$ . Если для круговой оболочки низший тон соответствовал одной полуволне в продольном направлении и шести волнам в окружном, то для  $a/b = 0,50 \div 0,66$  - соответственно одной и пяти, а для  $a/b = 0,33 \div 0,40$  - одной и четырем.

Аналогичные результаты были получены в работе [7] для консольных оболочек четырех типов с различным эксцентриситетом. С увеличением эксцентриситета для сечения оболочек наблюдалось понижение частот колебаний.

Хорошо известны также данные по теоретическому и экспериментальному исследованию колебаний конических оболочек [8]. Экспериментальные исследования проводились на шести сварных образцах из листового алюминиевого сплава толщиной  $h = 1 \text{ мм}$ , параметры которых варьировались в пределах  $\alpha = 15^\circ \div 75^\circ$ ,  $L/R = 1,55 \div 7,73$  и  $R/h = 90 \div 360$  (в качестве  $R$  рассматривается радиус кривизны оболочки). Анализ данных показал, что при увеличении малых углов конусности  $\alpha$  до  $40^\circ$  окружная частота первого тона колебаний увеличивается.

Таким образом, увеличение овальности понижает окружную частоту, а увеличение конусности - повышает ее. Эта разнонаправленность влияния несовершенств хорошо качественно поясняет поведение математических моделей, приведенных в п. 3.

Аналогичные результаты дает и расчет собственной частоты линейных колебаний овально-конической оболочки с эллиптическим поперечным сечением по методике [9].

## 5. Выводы

Проведенные исследования показывают, что применение динамических характеристик для определения несущей способности неоднородно деформируемых оболочек является эффективным инструментом предварительной оценки работоспособности тонкостенных конструкций. Использование окружной частоты нижнего тона собственных колебаний конструкции, рассчитанных по линейной теории или полученных экспериментально, к оценке опасных сочетаний амплитуд несовершенств оболочки с близкой пространственной частотой позволяет уменьшить объем вычислений и может стать удобным способом расчета. Показана возможность оценки величины критических усилий для цилиндрических оболочек как для случая регулярных возмущений, так и для возмущений, чья изменяемость не совпадает с характером деформирования. Показано, что изменение параметров несовершенств приводит к смещению частот свободных колебаний и, тем самым, позволяет судить об изменении величины критических нагрузок. Это позволяет использовать результаты анализа данных неразрушающих экспериментов по определению собственной пространственной формы колебаний изучаемого объекта к оценке его несущей способности.

**Список литературы:** 1.Красовский В.Л. О явлении «статического резонанса» в тонкостенных цилиндрических оболочках //Новини науки Придніпров'я. –2004. -№6. –С.54-64. Красовский В.Л., Колесников М., Шмидт Р. «Статический резонанс» в цилиндрических оболочках при периодически неоднородном сжатии (эксперимент и численное исследование) // Theoretical Foundations in Civil Engineering. -Warsaw: WPU. -2008. -Р.87-96 2.Моссаковский, В. И. Деформирование и устойчивость технологически несовершенных цилиндрических оболочек при неоднородном напряженном состоянии [Текст] / В. И. Моссаковский, А. М. Мильцын, В. И. Олевский // Проблемы прочности. – 1990. - N12. - С.28-32. 3.Мильцын, А. М. Многофакторное исследование продольно сжатых цилиндрических оболочек с технологическими несовершенствами типа конусности и овальности [Текст] / А. М. Мильцын, В. И. Олевский, В. В. Плетин // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2010. – № 14. – С. 254-266. 4.Пилов, П. И. Моделирование и структурно-экстраполяционный анализ в задачах обогащения [Текст]: монографія / П. И. Пилов, А. М. Мильцын, В. И. Олевский - Д.: Наука та освіта, 1992. – 174 с. 5.Кузнецов, Ю. М. Исследование собственных колебаний цилиндрических оболочек эллиптического сечения методом голографической интерферометрии [Текст] / Ю. М. Кузнецов, А. К. Шалабанов // Исследования по теории пластин и оболочек. - Казань, Изд-во КХУ. - вып. 17, №2. - 1984. – С. 133-140.6.Сальников, Г. М. Собственные колебания усеченных конических оболочек кругового и эллиптического сечения [Текст] / Г. М. Сальников // Исслед. по теор. пластин и оболочек. – вып. 6, №7. – 1970. - Казань: Изд-во Казанского ун-та.- С. 587–596.7.Преображенский, И. Н. Устойчивость и колебания конических оболочек [Текст]: монографія / И. Н. Преображенский, В. З. Грицак. – М., 1986. – 240 с.8.Агеносов Л. Г., Свободные колебания и устойчивость конических оболочек произвольного поперечного сечения [Текст] / Л. Г. Агеносов, А. В. Саченков // Исслед. по теор. пластин и оболочек, вып. 4. – 1966. - Казань: Изд-во Казанского ун-та.- С. 342–355.

*Поступила в редколлегию 19.03.2011*

**УДК 621.225; 669.162**

**І.І. БЛОКОНЬ**, пом. директора, СП ЗАТ «ХЕМЗ-ІРЕС»  
**В.О. ЯРУТА**, канд. техн. наук, викладач ХДАК, м. Харків  
**Р.В. СУШИЛОВ**, інженер-технолог, СП ЗАТ «ХЕМЗ-ІРЕС»  
**О.М. ЯРУТА**, канд. техн. наук, провідний інженер-технолог,  
 СП ЗАТ «ХЕМЗ-ІРЕС», м. Харків  
**І.П. ГРЕЧКА**, канд. техн. наук, ас., НТУ «ХПІ»

### **УНІВЕРСАЛІЗАЦІЯ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ З ГІДРОЗАХИСТОМ**

Описан прибор для измерения толщины немагнитного антифрикционного твердого слоя в пяте, корпус которой изготовлено из стали, и количества карбидной составляющей в аустенитном чугуна корпуса подшипника.

Описано універсальний прилад для вимірювання товщини немагнітного антифрикційного твердого шару у п'яті, корпус якої виготовлено із сталі, та кількості карбідної складової у аустенітному чавуні корпуса підшипника.

Is described the device for measurement of thickness of not magnetic antifrictional firm layer in footstep which case it is made of steel, and quantities carbide by a component in austenitic pig-iron of the case of the bearing .