

Петров М.В. Экспериментальное исследование влияния сыпучего материала на устойчивость при изгибе тонкостенных оболочек с сыпучим наполнителем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 4. С. 157-164. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.15

Petrov M.V. Experimental analysis of the effect of discrete aggregate on the bending stability of thin-walled cylindrical shells. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 4, pp. 157-164. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.15



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2019

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2019.4.15

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК С СЫПУЧИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

М.В. Петров

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 апреля 2019 г.
Принята: 20 сентября 2019 г.
Опубликована: 30 декабря 2019 г.

Ключевые слова:

эксперимент, образец, деформация, критическая сила, устойчивость, изгиб, сыпучий материал, поперечная сила, автоцистерна.

АННОТАЦИЯ

Экспериментально изучено влияние сыпучего наполнителя на устойчивость при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек. Для исследования образцы выполнялись из алюминиевого сплава 3004 в состоянии Н19. Образцы закреплялись консольно, на свободный конец их прикладывалась вертикальная сосредоточенная поперечная сила. Испытывались пустые и заполненные железным порошком образцы, по десять образцов для каждой серии. Нагружение образцов выполнялось ступенчато, порциями по 10Н, при приближении к моменту потери устойчивости нагружали по 1Н и менее. На каждой ступени нагружения фиксировали усилие, прогиб свободного конца образца, деформацию в продольном направлении. Построены графики зависимости перемещения свободного конца образца от поперечной силы. Критическая сила определялась моментом резкого увеличения перемещения свободного конца образца. Устойчивость образцов терялась в упругости. Графики для пустых и заполненных образцов для каждой серии почти совпадают до потери устойчивости пустых образцов. Это значит, что в момент потери устойчивости пустого образца начинается образование вмятины, направленной к продольной оси, а для заполненных образцов образованию вмятин препятствует сыпучий материал, поэтому критическая сила увеличивалась.

Влияние сыпучего наполнителя рассмотрено по приближенной зависимости [24] для автоцистерн, изготавливаемых на предприятии. Критическое напряжение для цистерны с наполнителем определяется суммой критического напряжения для пустой оболочки с напряжениями, создаваемыми весовой нагрузкой и гидростатическим давлением сыпучего наполнителя. Расчет критических напряжений показал, что для модельных образцов сыпучий наполнитель увеличивает значение критического напряжения на 8,3 %, для натурной цистерны – на 62 %.

Изучено влияние на устойчивость различных сыпучих наполнителей: речного песка, железного и медного порошков при разной степени наполнения образцов. С увеличением плотности порошков и объема наполнения значение критической силы возрастало. Для образцов, заполненных на 90 % объема речным песком, критическая сила увеличивалась на 13 %, для заполненных железным порошком – увеличивалась на 41 %, для заполненных медным порошком – на 43 %.

© ПНИПУ

© Петров Михаил Васильевич – д.т.н., доц., e-mail: mihapeter.40@gmail.com, [iD: 0000-0002-7355-8553](https://orcid.org/0000-0002-7355-8553)

Mikhail V. Petrov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: mihapeter.40@gmail.com,

[iD: 0000-0002-7355-8553](https://orcid.org/0000-0002-7355-8553)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF DISCRETE AGGREGATE ON THE BENDING STABILITY OF THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS

M.V. Petrov

I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 April 2018
Accepted: 20 September 2019
Published: 30 December 2019

Keywords:

experiment; sample; deformation; critical force; stability; bend; loose material; cross force; tanker truck.

ABSTRACT

The effect of a discrete aggregate on the bending stability of thin-walled cylindrical shells was studied. The samples for the study were made of aluminum alloy 3004 (temper H19). The samples were cantilevered; a vertical concentrated cross force was applied to its free end. Ten empty samples and ten samples 90% filled with iron powder were tested. The samples were loaded in stages by 10N, and when approaching the moment of buckling the samples were loaded by 1N or less. The force, deflection of the free end of the sample, and axial strain were recorded at each stage of loading. Displacement of the free end of the sample versus cross force diagrams is plotted. The buckling force was determined by the inflection point of the diagrams. The samples lost the stability in elasticity. The diagrams for the empty and filled samples for each series almost coincide until the loss of stability of the empty sample. This means that when the empty sample loses its stability, the buckle directed towards the center line is formed; and for the filled samples, the formation of buckles is prevented by the discrete material, therefore the critical force increased by 18.8%.

The influence of discrete aggregate is considered on the basis of approximation [24] for tank trucks manufactured at the enterprise. The critical stress is calculated using the superposition principle, since the stability is lost in the elasticity. The critical stress for the filled tank is determined by the sum of the critical stress for an empty shell with the stresses created by the weight load and the hydrostatic pressure of the discrete filler. The calculation of critical stresses showed that for the pattern samples the influence of discrete filler is 8.3%, and for the full-sized tanks the influence of discrete filler on the value of the critical voltage is significant and amounts to 62%.

We studied the effect of various discrete fillers on stability, such as river sand, iron and copper powders at different filling ratios of the samples. Due to an increase in powder density and filling volume, the value of the critical force increased. For the samples filled to 90% with the river sand had the critical force increase by 13.3%, while those filled with the iron powder had their critical force increase by 40.5%, the copper powder samples had an increase of the critical force by 43.1%.

© PNRPU

Введение

Оболочечные элементы строительных, авиационных конструкций, транспортных систем, автоцистерн, трубопроводов теряют устойчивость при изгибе. Потеря устойчивости пустых тонкостенных цилиндрических оболочек при изгибе рассматривалась во многих трудах отечественных и зарубежных ученых [1–17].

Рассмотрена устойчивость оболочек гладких и подкрепленных, изотропных и анизотропных, деформируемых в пределах и за пределами упругости различной формы. Мало исследована потеря устойчивости и закритическое упругопластическое деформирование тонкостенных оболочек при их взаимодействии с сыпучим наполнителем [18–24]. Проблема устойчивости при изгибе автоцистерн для перевозки сыпучих материалов появилась в связи с началом их производства на предприятии ЗАО «Чебоксарское предприятие „Сеспель“». На рис. 1 показана подъемная автоцистерна, которая при подъеме с одного конца для выгрузки сыпучего наполнителя изгибается, деформируется, может потерять устойчивость.

Цистерна представляет собой тонкостенную оболочку. Задача устойчивости при изгибе оболочки с сыпучим наполнителем является трехмерной, геометриче-

ски и физически нелинейной с учетом возможных необратимых деформаций конструкции [18]. Численный анализ деформирования, потери устойчивости и закритического поведения большегабаритных емкостей для автомобильной транспортировки сыпучих грузов производился в исследованиях [18–23].



Рис. 1. Подъемная автоцистерна

Fig. 1. Lifting tanker truck

Определяющая система уравнений сформулирована в переменных Лагранжа в трехмерной динамической постановке [18]. Упругопластическое деформирование

описано соотношениями теории течения [22–23]. Геометрическая нелинейность учтена с помощью пересчета геометрии оболочки в каждый момент времени. Численное решение задачи основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест» [18]. Численные исследования выполнялись в рамках вычислительного комплекса «Динамика-3», аттестованного в научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности [25] и Госстандарте РФ [26].

Экспериментальные исследования выполнялись на модельных образцах из разных материалов [19–21]. Образцы закреплялись консольно или на двух шарнирных опорах [20]. Размеры образцов рассчитаны так, чтобы результаты экспериментов можно было перенести, используя коэффициенты подобия, на натурные цистерны. Исследовалось поведение пустых и заполненных сыпучим материалом образцов, определялась критическая нагрузка, изучалось влияние геометрических размеров, геометрических несовершенств образцов на предельную нагрузку [20–23]. Выполнена верификация численной методики расчета экспериментами. Численные расчеты и эксперименты показали, что для оболочек, заполненных сыпучим материалом, предельные нагрузки возрастают. Влияние сыпучего наполнителя на устойчивость изучена недостаточно. Поэтому исследование влияния сыпучего наполнителя на устойчивость оболочек является актуальным и необходимым для производства автоцистерн.

Цель работы – изучить влияние сыпучего наполнителя на устойчивость при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек применительно к автоцистернам, изготавливаемым на предприятиях.

1. Экспериментальная установка, образцы, материалы

Экспериментальная установка показана на рис. 2, где 1 – жесткая металлическая стенка; 2 – индикатор часового типа ИЧ-10; 3 – штатив; 4 – образец; 5 – нагружающее устройство.

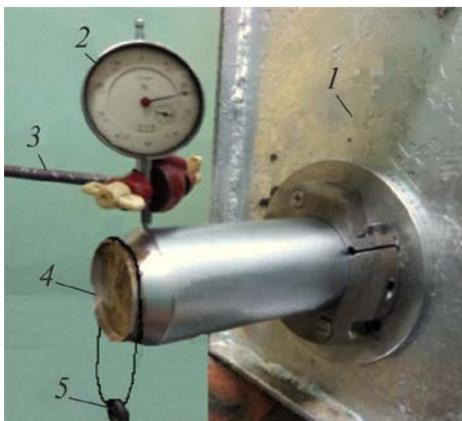


Рис. 2. Экспериментальная установка

Fig. 2. Photo of the facilities

Для измерения деформаций на предполагаемое место потери устойчивости наклеивались тензодатчики марки КФБП1-10-200 в продольном направлении. Деформации фиксировались измерителем деформации «Терем-4». Материал образцов – алюминиевый сплав 3004 в состоянии Н19. Сыпучим материалом был железный порошок ПЖ-5. Образцы изготавливались глубокой вытяжкой, тщательно отбирались, чтобы не было дефектов. Размеры образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размер образцов

Table 1

Sample size

Серия испытаний	Радиус R , мм	Толщина стенки h , мм	Длина L , мм	h/R	L/R
1	32,8	0,1	135	0,003	4,12
2	32,8	0,1	270	0,003	8,24
3	41,65	0,12	165	0,0029	3,96

2. Проведение экспериментов

Эксперименты выполнялись на консольно закрепленных образцах, на свободный конец которых прикладывалась поперечная сила F . Прогиб свободного конца образца «у» измерялся индикатором часового типа ИЧ-10. Для каждой серии экспериментов испытывалось по десять образцов. Выполнялось ступенчатое нагружение порциями по 10 Н, при приближении к моменту потери устойчивости нагружали по 1Н и менее, на каждой ступени нагружения фиксировали усилие, прогиб свободного конца, деформацию в продольном направлении.

3. Результаты экспериментов и численных расчетов

Выполнялась статистическая обработка результатов экспериментов. По результатам экспериментов построены графики $y = f(F)$, изображенные на рис. 3.

Результаты экспериментов и численных расчетов критических сил приведены в табл. 2. Доверительный интервал для значений критических сил F_{cr} , измеренных в экспериментах для пустых образцов третьей серии, равен (0,254;0,27)кН, а для таких же образцов, заполненных железным порошком на 90 % объема, равен (0,333;0,349)кН. Численные расчеты выполнены с помощью вычислительного комплекса «Динамика-3».

Для пустых и заполненных образцов графики на рис. 3 почти совпадают до потери устойчивости пустых образцов и изменяются линейно. Устойчивость образцов теряется при сжимающих напряжениях, меньших предела текучести материала. Вмятины образуются в зоне наибольших сжимающих напряжений перемещением элемента образца внутрь, к оси образца, однако перемещениям противодействует давление сыпучего материала, начинается влияние сыпучего материала на устойчивость, поэтому критическая поперечная нагрузка возрастает, возрастает критическое осевое напряжение σ_{cr} .

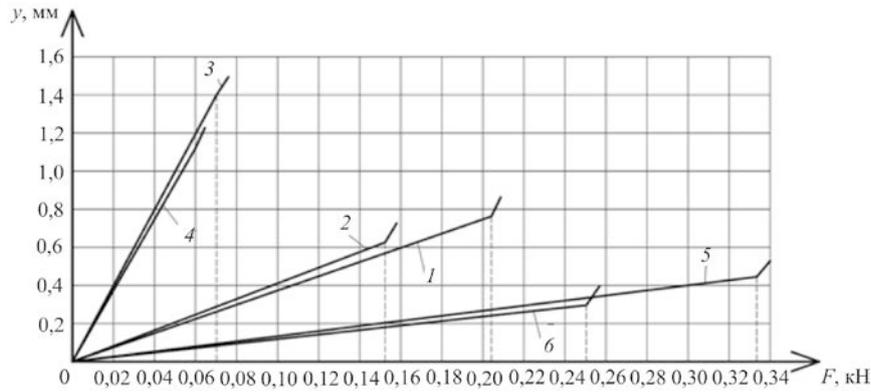


Рис. 3. Зависимость прогиба свободного торца образцов от поперечной силы: 1, 3, 5 – для образцов с сыпучим материалом для первой, второй, третьей серии; 2, 4, 6 – для пустых образцов для первой, второй, третьей серии соответственно

Fig. 3. Dependence of a deflection of the free end face of samples on cross force: 1, 3, 5 are for samples with a loose material for the first, second, third series; 2, 4, 6 are for empty exemplars for the first, second, third series respectively

Таблица 2
 Результаты экспериментов и численных расчетов критических сил
 Table 2
 Results of experiments and numerical calculations of critical forces

Серия испытаний	Процент заполнения образца, %	Критическая сила F_{cr} , кН		Расхождение F_{cr} , %	Процент увеличения F_{cr} для заполненного образца (эксперимент)
		Эксперимент	Численный расчет		
1	0 (пустой)	0,153	0,16	4,5	41
	90	0,215	0,223	3,7	
2	0	0,060	0,063	5	17
	90	0,070	0,0747	6,7	
3	0	0,262	0,269	2,7	30
	90	0,341	0,349	2,3	

Измеренные тензодатчиками в зоне потери устойчивости продольные деформации позволили подсчитать осевое критическое напряжение σ_{cr} . Например, для пустых образцов первой серии $\sigma_{cr} = 45 \dots 60$ МПа, а предел текучести материала $\sigma_y = 324$ МПа. Критическое напряжение значительно меньше предела текучести. Критическое напряжение σ_{cr} для заполненного на 90 % объема образца, равно 85,4 МПа, это в 1,4 раза больше, чем σ_{cr} для пустого образца. Для заполненных образцов первой серии критическая сила увеличилась на 41 %, для второй серии – на 17 %, для третьей серии – на 30 %. Критические силы, измеренные экспериментами и рассчитанные численными расчетами, отличаются максимально на 6,7 %.

4. Приближенный расчет σ_{cr}

На предприятиях нет вычислительного комплекса «Динамика-3», поэтому разработан приближенный метод расчета на устойчивость [24].

В приближенных расчетах критическое напряжение σ_{cr} рассчитывается по формуле

$$\sigma_{cr} = \sigma_{cr}^0 + \sigma_1 + \sigma_2 = k(l)E \frac{h}{R} + \frac{M}{W} + \frac{\rho g H R}{2h}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала оболочки; h – толщина стенки; R – радиус образца. Коэффициент $k(l)$ принимает значения 0,3 для оболочек средней длины, 0,22 – для более длинных оболочек; M – изгибающий момент от весовой нагрузки в месте потери устойчивости; W – осевой момент сопротивления поперечного сечения; ρ – плотность заполнителя; H – высота уровня заполнения; $g = 9,8$ м/с².

Первое слагаемое в формуле (1) определяет критическое напряжение для пустой оболочки [1]. Второе и третье слагаемые определяют влияние заполнителя на критическое напряжение. Второе слагаемое в формуле (1) определяет осевое напряжение от изгибающего момента весовой нагрузки. Третье слагаемое определяет осевое напряжение, создаваемое давлением сыпучей среды в зоне образования вмятин, которая получена преобразованием формулы для расчета осевого напряжения, возникающего в тонкостенных цилиндрических оболочках, находящихся под действием внутреннего давления [24].

Рассмотрим влияние сыпучего наполнителя ПЖ-5 на устойчивость для образцов первой серии:

$$\sigma_{cr}^0 = 0,3E \frac{h}{R} = 0,3 \cdot 0,7 \cdot 10^5 \cdot 0,1 / 32,8 = 64 \text{ МПа.}$$

где E – модуль упругости материала образцов, $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа.

Равномерно распределенная весовая нагрузка

$$q = \frac{m}{l} = \frac{12,9 \cdot 10^{-6}}{135 \cdot 10^{-3}} = 0,0956 \cdot 10^{-3} \frac{\text{МН}}{\text{м}},$$

где m – масса загрузки, $m = 12,9 \cdot 10^{-6}$ МН.

Осевой момент сопротивления

$$W = \pi h R^2 = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 32,8^2 \cdot 10^{-9} = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

$$\sigma_1 = \frac{q l^2}{2W} = \frac{0,0956 \cdot 10^{-3} \cdot 135^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0,34 \cdot 10^{-6}} = 2,56 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_2 = \frac{\rho g H R}{2h} = \frac{2,62 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 64 \cdot 10^{-3} \cdot 32,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} = 2,75 \text{ МПа,}$$

где ρ – насыпная плотность железного порошка, $\rho = 2,62 \cdot 10^{-2} \text{ МН/м}^3$; H – высота загрузки, $H = 64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$\sigma_{cr} = \sigma_{cr}^I + \sigma_1 + \sigma_2 = 64 + 2,56 + 2,75 = 69,3 \text{ МПа.}$$

Расхождение между опытным значением $\sigma_{cr} = 85,4 \text{ МПа}$ и рассчитанным по приближенной формуле (1) значением $\sigma_{cr} = 69,3 \text{ МПа}$ составляет 18,8 %. Численными расчетами в программе «Динамика-3» получено σ_{cr} , равное 86 МПа. Влияние σ_1 и σ_2 на устойчивость малое, составляет 8,3 %.

Рассмотрим влияние сыпучего материала на устойчивость для натуральных цистерн. Пусть цистерна имеет следующие размеры: $R = 1,27 \text{ м}$; $h = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l = 6 \text{ м}$; $E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Материал цистерны – алюминиевый сплав марки АМг5. Загружена цистерна железным порошком на 90 % объема насыпной плотностью $\rho = 2,62 \cdot 10^{-2} \text{ МН/м}^3$. Цистерна опирается на две концевые шарнирные опоры.

$$\text{Объем цистерны } V = \pi R^2 l = 3,14 \cdot 1,27^2 \cdot 6 = 30 \text{ м}^3.$$

$$\text{Объем загрузки } V_1 = 0,9V = 0,9 \cdot 30 = 27,3 \text{ м}^3.$$

$$\text{Масса порошка } m = \rho V_1 = 2,62 \cdot 10^{-2} \cdot 27,3 = 0,71 \text{ МН.}$$

Равномерно распределенная весовая нагрузка

$$q = \frac{m}{l} = \frac{0,71}{6} = 0,12 \frac{\text{МН}}{\text{м}}.$$

Осевой момент сопротивления

$$W = \pi h R^2 = 3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,27^2 = 0,04 \text{ м}^3.$$

$$\sigma_{cr}^I = 0,22E \frac{h}{R} = 0,22 \cdot 0,7 \cdot 10^5 \frac{8 \cdot 10^{-3}}{1,27} = 97 \text{ МПа,}$$

$$\sigma_1 = \frac{q l^2}{8W} = \frac{0,12 \cdot 36}{8 \cdot 0,04} = 13,5 \text{ МПа.}$$

$$\sigma_2 = \frac{\rho g H R}{2h} = 2,62 \cdot 10^{-2} \cdot 9,8 \cdot 2,3 \frac{1,27}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 46,8 \text{ МПа,}$$

где $H = 2,3 \text{ м}$.

Критическое напряжение

$$\sigma_{cr} = \sigma_{cr}^I + \sigma_1 + \sigma_2 = 97 + 13,5 + 46,8 = 157,3 \text{ МПа.}$$

Критическое напряжение за счет действия сыпучего заполнителя возрастает на 62 %.

Ясно, что для натуральных цистерн влияние сыпучего материала на устойчивость при изгибе значительно.

На предприятиях изготавливают автоцистерны размером $R = 1,25 \text{ м}$; $h = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l = 16 \text{ м}$.

5. Влияние различных сыпучих материалов и процента загрузки объема оболочки на предельное состояние

Экспериментально изучено на образцах первой серии. Образцы загружались речным песком $\rho = 1,52 \text{ г/см}^3$, железным порошком $\rho = 2,62 \text{ г/см}^3$, медным порошком $\rho = 3,54 \text{ г/см}^3$. Значения критических нагрузок и критических напряжений для образцов, заполненных различными сыпучими материалами на 90 % объема, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения критических нагрузок и критических напряжений

Table 3

Values of critical loads and critical stresses

Тип порошка	Плотность ρ , г/см ³	Критическая нагрузка F_{cr} , кН	Критическое напряжение опытное σ_{cr} , МПа	По формуле (1) σ_{cr} , МПа	Расхождение σ_{cr} , %
Железный	2,62	0,215	85,4	69,3	18,8
Медный	3,54	0,217	78	70,38	9,7
Речной песок	1,52	0,163	64,7	66,9	3,4

Из табл. 3 видно, что критическое напряжение для образцов 1-й серии, загруженных железным порошком на 90 % объема, отличается от критического напряжения, рассчитанного по формуле (1), максимально на 18,8 %. Следовательно, для расчета критического напряжения можно пользоваться формулой (1).

Увеличение критических нагрузок на образцы, заполненные различными сыпучими материалами на различные объемы, относительно критических нагрузок на пустые образцы, представлено в табл. 4.

Таблица 4

Увеличение критических нагрузок

Table 4

The increase in critical loads

Вид сыпучего материала	Объем заполнения		
	на 30 %	на 60 %	на 90 %
Речной песок	2	3,27	13
Железный порошок ПЖ-5	4	7,84	41
Медный порошок	7,84	17,65	43

Зависимости критической силы от процента наполнения образцов показаны на рис. 4.

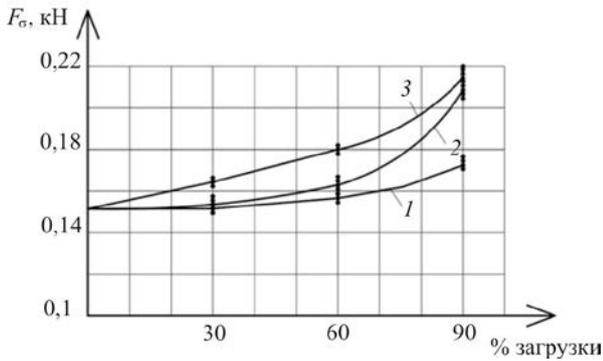


Рис. 4. Графики зависимости критической силы от процента загрузки: 1 – для речного песка; 2 – для железного порошка ПЖ-5; 3 – для медного порошка

Fig. 4. Dependence of the critical force on the loading per cent: 1 – for river sand; 2 – for iron powder PZh-5; 3 – for copper powder

Из анализа результатов табл. 4 и рис. 4 можно сделать вывод, что с увеличением плотности сыпучего наполнителя и процента заполнения объема оболочки критическая сила возрастает.

Образец первой серии, заполненный железным порошком на 90 % объема, после потери устойчивости при критической нагрузке $F_{cr} = 0,214 \text{ кН}$, показан на рис. 5, а, форма того же деформированного образца, полученная в результате численного моделирования, показана на рис. 5, б. Характер деформаций образцов после потери устойчивости во всех случаях одинаковый.

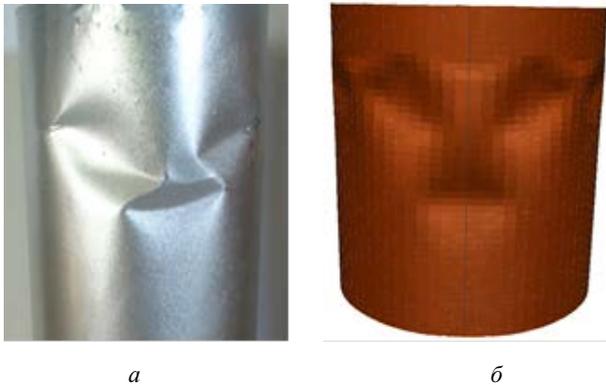


Рис. 5. Деформированный образец: а – образец первой серии, заполненный на 90 % объема; б – образец, полученный численным моделированием

Fig. 5. The deformed sample: a – first series filled to 90 % of the volume; b – obtained by numerical simulation

6. Анализ результатов

Экспериментальные и численные исследования показали, что заполнение тонкостенных цилиндрических цистерн сыпучими материалами для их перевозки позволяет увеличить их устойчивость при изгибе. Важность и полезность работы подтверждается тем, что она финансировалась РФФИ (проект № 16-38-60051 мол_а_дк). Критические силы, измеренные в экспериментах и рас-

считанные численными расчетами, максимально отличаются на 6,7% (см. табл. 2), следовательно, эксперименты выполнены качественно, а численная методика вычислительного комплекса «Динамика-3» хорошо описывает процесс деформирования, потери устойчивости и закритического поведения пустых и заполненных сыпучим материалом тонкостенных оболочек. Влияние сыпучего наполнителя на устойчивость заключается в противодействии образованию вмятин. Для заполненных железным порошком образцов первой серии критическая сила увеличилась на 41 % по сравнению с критической силой для пустых образцов. Для расчета критического напряжения на предприятиях рекомендован приближенный метод расчета, который верифицирован экспериментами и численными расчетами. Расчет критического напряжения для автоцистерны показал, что железный порошок, заполнивший на 90 % объем цистерны, увеличивает критическое напряжение на 62 %. Устойчивость оболочек зависит от плотности наполнителя и процента заполнения объема. У образцов первой серии, заполненных речным песком насыпной плотностью $\rho = 1,52 \text{ г/см}^3$, при наполнении на 30 % критическая сила увеличилась на 2 %, при наполнении на 60 % критическая сила увеличилась на 3,27 %, при наполнении на 90 % – на 13 % (см. табл. 4). У образца, заполненного медным порошком $\rho = 3,54 \text{ г/см}^3$, при наполнении на 30 % критическая сила увеличилась на 7,84 %, при наполнении на 90 % критическая сила увеличилась на 43 %. С увеличением плотности сыпучего наполнителя и объема заполнения критическая нагрузка возрастает.

Заключение

1. Сыпучий наполнитель влияет на критическую нагрузку оболочки при изгибе. С увеличением плотности и процента загрузки сыпучего материала критическая сила возрастает.

2. При проектировании и изготовлении автоцистерн для перевозки сыпучего материала необходимо учитывать влияние наполнителя на устойчивость, в этом случае снижаются потребность в металле и стоимость.

3. Формулой (1) можно пользоваться для расчета критических нагрузок на предприятиях, изготавливающих автоцистерны.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-38-60051 мол_а_дк).

Acknowledgment

Work is performed with the financial support of the Russian Federal Property Fund (Project No. 16-38-60051 mol_a_dk)

Библиографический список

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Физматгиз, 1967. – 984 с.
2. Григолюк Э.И. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 360 с.
3. Пикуль В.В. Современное состояние теории оболочек и перспективы ее развития // МТТ. – 2000. – № 2. – С. 153–168.
4. Коноплев Ю.Г. Экспериментальное исследование задачи о действии сосредоточенной силы на цилиндрическую оболочку // Исследования по теории пластин и оболочек. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 1966. – № 4. – С. 83–90.
5. Ильгамов М.А. Экспериментальное исследование устойчивости консольно закрепленной цилиндрической оболочки под действием поперечной силы и внутреннего давления // Исследования по теории пластин и оболочек. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 1964. – № 2. – С. 186–191.
6. Саченков А.В. Теоретико-экспериментальный метод исследования устойчивости пластин и оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 1970. – Вып. 617. – С. 391–433.
7. Mathon C., Limam A. Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending // Thin-Walled Structures. – 2006. – Vol. 44. – No. 1. – P. 39–50.
8. Li L.-Y., Kettle R. Nonlinear bending response and buckling of ringstiffened cylindrical shells under pure bending // International Journal of Solids and Structures. – 2002. – Vol. 39. – No. 3. – P. 765–781.
9. Бойко Д.В., Железнов Л.П., Кабанов В.В. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости подкрепленных овальных цилиндрических оболочек при комбинированном нагружении изгибающим моментом и краевой поперечной силой // Механика твердого тела. – 2012. – № 3. – С. 47–53.
10. Brazier L. On the flexure of thin cylindrical shells and other thin sections // Proc. Roy. Soc. – 1927. – Vol. A116. – No. 773. – P. 104–114.
11. Моссаковский В.И., Маневич Л.И., Мильцын А.М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. – Киев: Наук. думка, 1977. – 141 с.
12. Ильгамов М.А., Иванов В.А., Гулин Б.В. Расчет оболочек с упругим наполнителем. – М.: Наука, 1987. – 260 с.
13. Houliara S., Karamanos S.A. Stability of long transversely-isotropic elastic cylindrical shells under bending // International Journal of Solids and Structures. – 2010. – Vol. 47. – No. 1. – P. 10–14.
14. Axelrad E.L. Shell theory and its specialized branches // Int. J. Solids and Struct. – 2000. – Vol. 37. – No. 10. – P. 1425–1451.
15. Yan W., Ying J., Chen W.Q. The behavior of angle-ply laminated cylindrical shells with viscoelastic interfaces in cylindrical bending // Composite Structures. – 2007. – Vol. 78. – No. 4. – P. 551–559.
16. Zeinoddini M., Harding J.E., Parke G.A.R. Axially preloaded steel tubes subjected to lateral impacts (a numerical simulation) // International Journal of Impact Engineering. – 2008. – No. 35. – P. 1267–1279.
17. Nonlinear behavior of short elastic cylindrical shells under global bending / O.K. Fajuyitan, A.J. Sadowski, M.A. Wadee, J.M. Rotter // Thin Walled Structures. – 2018. – Vol. 124. – P. 574–587.
18. Теоретическое и экспериментальное исследование потери устойчивости и закритического поведения тонкостенной цилиндрической оболочки при изгибе / В.Г. Баженов [и др.] // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2009. – Вып. 71. – С. 77–83.
19. Численное исследование процессов деформирования, потери устойчивости и закритического поведения упругопластических оболочек вращения при квазистатических и динамических нагружениях / В.Г. Баженов [и др.] // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XIX Междунар. симпозиума им. А.Г. Горшкова. – М.: ТР-принт, 2013. – С. 23–26.
20. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе / М.В. Петров [и др.] // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И.Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2015. – № 2 (24). – С. 119–125.
21. Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V.G. Bazhenov, E.G. Gonik, A.I. Kibets, M.V. Petrov, T.G. Fedorova, I.A. Frolova // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Vol. 28. – No. 1–2. – P. 16–20.
22. Конечно-элементное решение задачи устойчивости и закритического поведения автоцистерн для транспортировки сыпучих грузов / В.Г. Баженов [и др.] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2013. – Вып. 75 (1). – С. 56–62.
23. Stability and supercritical behavior of large-size tankers for transportation of loose goods / V.G. Bazhenov, E.G. Gonik, A.I. Kibets, M.V. Petrov, T.G. Fedorova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2015. – Vol. 44. – No. 5. – P. 422–427.
24. Способ приближенного расчета на устойчивость при поперечном изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек средней длины, заполненных сыпучим материалом / М.В. Петров [и др.] // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И.Я. Яковлева. Механика предельного состояния. – 2018. – № 4 (38). – С. 122–128.
25. Аттестационный паспорт программного средства. Вычислительный комплекс «Динамика-3» / Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Регистрационный паспорт аттестации ПС№325 от 18.04.2013.
26. Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.ME20.H00338.
27. Rotter J.M., Sadowski A.J., Chen L. Nonlinear stability of thin elastic cylinders of different length under global bending // International Journal of Solids and Structures. – 2014. – Vol. 51. – P. 2826–2839.
28. Xu Z., Gardner L., Sadowski A.J. Nonlinear stability of elastic elliptical cylindrical shells under uniform bending // International Journal of Mechanical Sciences. – 2017. – Vol. 128–129. – P. 593–606.
29. Wang J., Sadowski A.J. Elastic imperfect tip-loaded cantilever cylinders of varying length // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 140. – P. 200–210.
30. Nonlinear behaviour of short elastic cylindrical shells under global bending / O.K. Fajuyitan, A.J. Sadowski, M.A. Wadee, J.M. Rotter // Thin-Walled Structures. – 2018. – Vol. 124. – P. 574–587.
31. Баженов В.Г. Большие деформации и предельные состояния упругопластических конструкций // Упругость и неупругость: материалы междунар. науч. симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 105-летию со дня рождения А.А. Ильюшина. – М.: Изд-во МГУ, 2016. – С. 136–140.

References

1. Vol'mir A.S. Ustoichivost' deformiruemykh sistem [Stability of deformable systems]. – Moscow, Fizmatgiz, 1967, 984 p.
2. Grigoliuk E.I. Ustoichivost' obolochek [Shell Resistance]. Moscow, Nauka, 1978, 360 p.
3. Pikul' V.V. Sovremennoe sostoianie teorii obolochek i perspektivy ee razvitiia [The current state of the theory of shells and the prospects for its development]. *Mekhanika tverdogo tela*, 2000, no. 2, pp. 153-168.
4. Konoplev Iu.G. Eksperimental'noe issledovanie zadachi o deistvii sosredotochennoi sily na tsilindricheskuiu obolochku [Experimental study of the problem of the action of a concentrated force on a cylindrical shell]. *Kazan', KGU*, 1966, no. 4, pp. 83-90.
5. Il'gamov M.A. Eksperimental'noe issledovanie ustoichivosti konsol'no zakreplennoi tsilindricheskoi obolochki pod deistviem poperechnoi sily i vnutrennego davleniia // Issledovaniia po teorii plastin i obolochek [Experimental study of the stability of a cantilevered cylindrical shell under the action of transverse force and internal pressure]. *Kazan', KGU*, 1964, no. 2, pp. 186-191.
6. Sachenkov A.V. Teoretiko-eksperimental'nyi metod issledovaniia ustoichivosti plastin i obolochek [Theoretical experimental method for studying the stability of plates and shells] *Issledovaniia po teorii plastin i obolochek*, 1970, is. 617, pp. 391-433.
7. Mathon C., Limam A. Experimental collapse of thin cylindrical shells submitted to internal pressure and pure bending. *Thin-Walled Structures*, 2006, vol. 44, no. 1, pp. 39-50.
8. Li L.-Y., Kettle R. Nonlinear bending response and buckling of ringstiffened cylindrical shells under pure bending. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, vol. 39, no. 3, pp. 765-781.
9. Boiko D.V., Zhelezov L.P., Kabanov V.V. Issledovanie nelineinogo deformirovaniia i ustoichivosti podkreplennykh oval'nykh tsilindricheskikh obolochek pri kombinirovannom nagruzenii izgbaiushchim momentom i kraevoi poperechnoi siloi [Investigation of nonlinear deformation and stability of reinforced oval cylindrical shells under combined loading by bending moment and edge shear force]. *Moscow, Mekhanika tverdogo tela*, 2012, no. 3, pp. 47-53.
10. Brazier L. On the flexure of thin cylindrical shells and other thin sections. *Proc. Roy. Soc.*, 1927, vol. A116, no. 773, pp. 104-114.
11. Mossakovskii V.I., Manevich L.I., Mil'syn A.M. Modelirovanie nesushchei sposobnosti tsilindricheskikh obolochek [Modeling of the bearing capacity of cylindrical shells]. *Kiev, Naukova Dumka*, 1977, 141 p.
12. Il'gamov M.A., Ivanov V.A., Gulin B.V. Raschet obolochek s uprugim zapolnitelem [Calculation of shells with elastic filler]. *Moscow, Nauka*, 1987, 260 p.
13. Houliara S., Karamanos S.A. Stability of long transverse-isotropic elastic cylindrical shells under bending. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, vol. 47, no. 1, pp. 10-14.
14. Axelrad E.L. Shell theory and its specialized branches. *Int.J. Solids and struct*, 2000, vol. 37, no. 10, pp. 1425-1451.
15. Yan W., Ying J., Chen W.Q. The behavior of angle-ply laminated cylindrical shells with viscoelastic interfaces in cylindrical bending. *Composite Structures*, 2007, vol. 78, no. 4, pp. 551-559.
16. Zeinoddini M., Harding J.E., Parke G.A.R. Axially preloaded steel tubes subjected to lateral impacts (a numerical simulation). *International Journal of Impact Engineering*, 2008, no. 35, pp. 1267-1279.
17. Fajuyitan O.K., Sadowski A.J., Wade M.A., Rotter J.M. Nonlinear behavior of short elastic cylindrical shells under global bending. *Thin Walled Structures*, 2018, vol. 124, pp. 574-587.
18. Bazhenov V.G. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie poteri ustoichivosti i zakriticheskogo povedeniia tonkostennoi tsilindricheskoi obolochki pri izgibe [Theoretical and experimental study of the loss of stability and supercritical behavior of a thin-walled cylindrical shell during bending]. *Problemy prochnosti i plastichnosti. Mezhev. sb. – N. Novgorod: NNGU*, 2009, is. 71, pp. 77-83.
19. Bazhenov V.G. Chislennoe issledovanie protsessov deformirovaniia, poteri ustoichivosti i zakriticheskogo povedeniia uprugoplasticheskikh obolochek vrashcheniia pri kvazistaticheskikh i dinamicheskikh nagruzeniiax [Numerical study of the processes of deformation, loss of stability and supercritical behavior of elastoplastic shells of revolution under quasistatic and dynamic loads]. *Materialy KhIKh mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruktssii i sploshnykh sred» imeni A.G. Gorshkova. – M.: Izd-vo: OOO «TR-print»*, 2013, pp. 23-26.
20. Petrov M.V. Eksperimental'noe issledovanie poteri ustoichivosti tonkostennykh obolochek pri chistom izgibe [Experimental study of the loss of stability of thin-walled shells during pure bending]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ia. Iakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoiianiia*, 2015, no. 2 (24), pp. 119-125.
21. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Petrov M.V., Fedorova T.G., Frolova I.A. Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending. *Materials Physics and Mechanics*, 2016, vol. 28, no. 1-2, pp. 16-20.
22. Bazhenov V.G. Konechno-elementnoe reshenie zadachi ustoichivosti i zakriticheskogo povedeniia avtotsistem dlia transportirovki sypuchikh gruzov [Finite-element solution of the problem of stability and supercritical behavior of tank trucks for transporting bulk cargo]. *Nizhnii. Novgorod, NNGU, Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti*, 2013, is. 75 (1), pp. 56-62.
23. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Petrov M.V., Fedorova T.G. Stability and supercritical behavior of large-size tankers for transportation of loose goods. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, no.5, pp. 422-427.
24. Petrov M.V. Sposob priblizhennogo rascheta na ustoichivost' pri poperechnom izgibe tonkostennykh tsilindricheskikh obolochek srednei dliny, zapolnennykh sypuchim materialom [The method of approximate calculation of the stability in transverse bending of thin-walled cylindrical shells of medium length, filled with bulk material]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ia. Iakovleva. Mekhanika predel'nogo sostoiianiia*, 2018, no 4 (38), pp. 122-128.
25. Vychislitel'nyi kompleks «Dinamika-3». Nauchno-tekhnichekii tsentr po iadernoi i radiatsionnoi bezopasnosti. Attestatsionnyi pasport programmno go sredstva. Registratsionnyi pasport attestatsii PS№325 ot 18.04.2013 [Computing complex "Dynamics-3". Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety. Certification passport software. Registration passport certification PS №325 18.04.2013].
26. Sertifikat sootvetstviia Gosstandarta Rossii № ROSS RU.ME20.H00338 [Certificate of Compliance of Gosstandart of Russia № ROSS RU.ME20.H00338].
27. Rotter J. M., Sadowski A. J., Chen L. Nonlinear stability of thin elastic cylinders of different length under global bending. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, vol. 51, pp. 2826-2839.
28. Xu Z., Gardner L., Sadowski A.J. Nonlinear stability of elastic elliptical cylindrical shells under uniform bending. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, vol. 128-129, pp. 593-606.
29. Wang J., Sadowski A. J. Elastic imperfect tip-loaded cantilever cylinders of varying length. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, vol. 140, pp. 200-210.
30. Fajuyitan O.K., Sadowski A.J., Wade M.A., Rotter J.M. Nonlinear behaviour of short elastic cylindrical shells under global bending. *Thin-Walled Structures*, 2018, vol. 124, pp. 574-587.
31. Bazhenov V.G. Bol'shie deformatsii i predel'nye sostoiianiia uprugoplasticheskikh konstruktssii [Large deformations and limiting states of elastoplastic structures]. *Moscow, MGU, Uprugost' i neuprugost': materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma po problemam mekhaniki deformiruemykh tel, posviashch. 105-letiiu so dnia rozhdeniia A.A.Iliushina*. 2016, pp. 136-140.