

УДК 539.374.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРИ
УСТОЙЧИВОСТИ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ***

© 2016 г. **Гоник Е.Г., Петров М.В., Федорова Т.Г.**

*Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары,
Российская Федерация*

nich@chuvsu.ru

Поступила в редакцию 17.03.2016

Экспериментально исследована потеря устойчивости пустых и заполненных сыпучим материалом консольно закрепленных образцов при поперечном изгибе. Образцы подбирались по геометрическому и физическому подобию с большегабаритными автоцистернами для перевозки сыпучих материалов. На свободный торец образца прикладывалась поперечная сила. Нагрузку пошагово увеличивали до потери устойчивости, которая сопровождалась хлопком. В процессе нагружения замерялись прогибы и деформации образца, фиксировалось изменение его диаметра. Согласно результатам экспериментальных исследований до потери устойчивости образец находился в упругой стадии. Потеря устойчивости образца происходила в области заделки в сжатой зоне и сопровождалась образованием и последующим ростом ромбовидных вмятин, выпуклостью внутрь. Исследована зависимость критической нагрузки от степени заполнения образцов. Для пустых образцов значение критической нагрузки, полученное экспериментально, хорошо согласуется с результатами других авторов. Отмечено, что влияние заполнителя на форму потери устойчивости оболочки незначительно, но на величину критической нагрузки существенно. Зависимость критической нагрузки от степени заполнения имеет нелинейный характер.

Ключевые слова: образец, индикатор, устойчивость, критическая сила, напряжение, тензорезистор.

Введение

В настоящее время много тонкостенных конструкций типа оболочек находят применение в технике и строительстве. В частности, для автомобильной перевозки сыпучих материалов используют цистерны в виде замкнутых цилиндрических оболочек. При эксплуатации цистерн одной из основных проблем является обеспечение их устойчивости при изгибе. Этим обусловлена актуальность экспериментального и теоретического исследования потери устойчивости и закритического пове-

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-38-60051 мол_а_дк)

дения тонкостенных оболочек с сыпучим наполнителем. Потеря устойчивости тонкостенных оболочек при действии различных нагрузок с учетом и без учета влияния заполняющей среды исследуется в работах [1–17].

В настоящей статье рассмотрена потеря устойчивости и закритическое поведение пустых и заполненных сыпучим материалом тонкостенных образцов. Цель работы – исследовать влияние сыпучего наполнителя на устойчивость тонкостенных оболочек при поперечном изгибе, что необходимо для верификации математических моделей и программных кодов [5, 8–10, 14, 15].

Экспериментальные исследования

Для достижения поставленной цели была собрана специально разработанная установка, показанная на рис. 1.

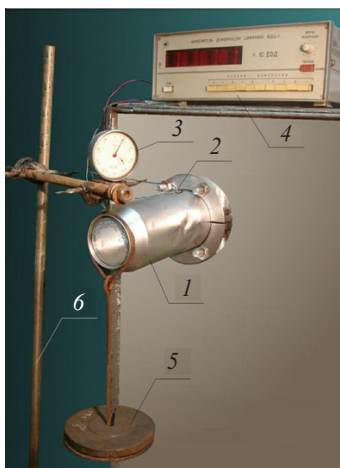


Рис. 1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из модельного образца 1, тензорезисторов 2, индикатора часового типа 3, измерителя деформаций 4, нагружающего устройства 5, штатива 6. Используемые измерительные приборы: индикатор часового типа ИЧ-10, измеритель деформаций ИДЦ-1 и электронный штангенциркуль. Деформации в исследуемой оболочке определялись тензорезисторами, приклеенными в зоне потери устойчивости в нижней и верхней частях образцов и подключенными к измерителю деформаций ИДЦ-1. Наружные диаметры образцов в четырех сечениях замерялись электронным штангенциркулем с погрешностью измерения 0,01 мм. Перемещения исследуемых образцов замерялись индикатором часового типа ИЧ-10.

Для лабораторных испытаний в качестве материала образцов был выбран алюминиевый сплав 3004 в состоянии Н19, идентичный по упругим характеристикам сплаву, применяемому ЗАО «Сеспель» [18] для производства автоцистерн. Испытания проводились на модельных образцах, подобранных по геометрическому и физическому подобию с цистернами, с параметрами подобия [17, 19]:

$$\alpha_1 = \frac{R}{R'} = 0,034, \quad \alpha_3 = \frac{h}{h'} = 0,034, \quad \frac{L}{R} = \frac{L'}{R'} = 3,96,$$

где $R = 41,65$ мм, $h = 0,12$ мм, $L = 165$ мм – радиус, толщина стенки и длина испы-

тываемых образцов; $R' = 1225$ мм, $h' = 3,5$ мм, $L' = 4850$ мм – радиус, толщина стенки и длина цистерн для транспортировки сыпучих грузов.

До начала испытаний образцы тщательно сортировались. Предпочтение отдавалось бесшовным образцам с размерами, необходимыми для лабораторных экспериментов. При испытании цилиндрических оболочек на изгиб один торец образца был жестко защемлен, а на другой торец, укрепленный плоским днищем, прикладывалась вертикальная нагрузка (см. рис.1).

Испытание оболочек на устойчивость проводилось поэтапно. Вначале были испытаны пустые образцы, а затем загруженные сыпучим веществом. В качестве заполнителя использовался железный порошок ПЖ-5 насыпной плотностью $\rho = 2,66$ г/см³. Заполнение оболочки осуществлялось на 30, 60 и 90% по объему.

Нагрузку пошагово увеличивали до потери устойчивости, которая сопровождалась хлопком. На каждом шаге увеличения нагрузки замерялись показания индикатора, тензорезисторов и диаметры оболочки. Конечная деформированная форма образца фиксировалась с помощью фотоаппарата.

Согласно показаниям тензодатчиков, до потери устойчивости образец находился в упругой стадии. После потери устойчивости в сжатой зоне образовывались ромбовидные вмятины выпуклостью внутрь (рис. 2, 3). Как для пустых, так и для загруженных образцов на боковой поверхности образовывались вмятины под углом 30–40° (см. рис. 3), что объясняется влиянием на устойчивость касательных напряжений. Такие же результаты были получены в работах [3, 7] при испытании оболочек на изгиб.



Рис.2. Вид образца снизу



Рис.3. Вид образца сбоку

По окончании экспериментов была проведена статистическая обработка результатов [20]. Данные по испытанию 10 пустых образцов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

№ образца	Критическая нагрузка F_{cr} , кН	Прогиб y , мм	Погрешность измерения $ \Delta y $, мм	$(\Delta y)^2$, мм ²
1	2	3	4	5
1	0,242	0,32	0,028	0,000784
2	0,272	0,41	0,062	0,003844
3	0,272	0,35	0,002	0,000004
4	0,262	0,34	0,008	0,000064
5	0,242	0,39	0,042	0,00176

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5
6	0,252	0,34	0,008	0,000064
7	0,282	0,34	0,008	0,000064
8	0,262	0,32	0,028	0,000784
9	0,272	0,31	0,038	0,001444
10	0,262	0,36	0,012	0,000144
Σ		3,48	0,236	0,008956

По этим данным вычислялась погрешность проведенных опытов. Среднеарифметическая величина прогиба оболочки при потере устойчивости оболочки по испытанным 10 образцам составила 0,348 мм. Среднеквадратичная погрешность результата серии измерений определялась по следующей формуле [20]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\Delta y_i)^2}{n(n-1)}} = 0,01.$$

Примем значение надежности $P = 0,95$ и $k = n - 1 = 9$. При этих значениях коэффициент Стьюдента $t(n)$, рассчитанный согласно [20], принимает значение 2,262. Границы доверительного интервала (погрешность результатов измерений)

$$\Delta W = t(n)S$$

равны 0,0226. Относительная погрешность результатов измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{W} \cdot 100\%$$

составляет 6,5% (здесь W – среднее значение прогиба).

По каждому варианту заполнения оболочек (30, 60 и 90%) были испытаны 10 образцов и проведена статистическая обработка результатов. Зависимости величины прогиба от нагрузки по средним статистическим значениям показаны на рис. 4.

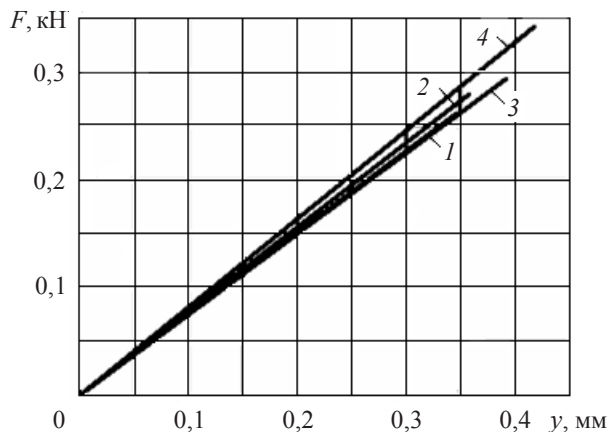


Рис.4. Графики зависимости прогиба от силы: 1 – для пустого образца, 2–4 – для образцов, заполненных сыпучим веществом на 30, 60 и 90% соответственно

Зависимость критической нагрузки от степени заполнения образцов железным порошком α показана в таблице 2 и на рис. 5.

Таблица 2

Величина заполнения, %	Критическая нагрузка F_{cr} , кН	Прогиб нагружаемого торца оболочки при потере устойчивости y , мм
0	0,262	0,348
30	0,271	0,36
60	0,285	0,39
90	0,341	0,42

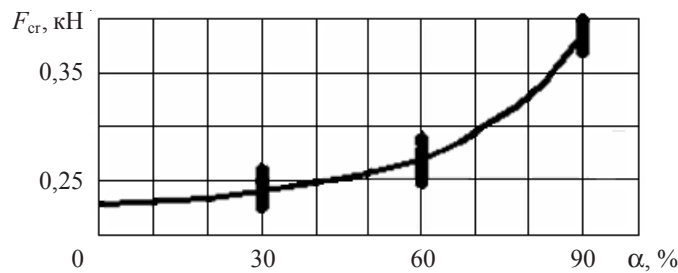


Рис.5. График зависимости критической силы от степени заполнения образцов сыпучим материалом

При увеличении степени заполнения образцов величина критической силы возрастает нелинейно. Результаты испытаний согласуются с другими экспериментальными данными. Так, полученное в испытаниях критическое значение напряжения σ_{cr} для пустых цилиндрических образцов составило 57,5 МПа, а рассчитанное по экспериментальной формуле [16]:

$$\sigma_{cr} = \frac{0,35E}{(1-\mu^2)^{5/8}} \left(\frac{h}{R} \right)^{5/4} \frac{L}{R},$$

где $E = 70$ ГПа – модуль упругости, $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона, составило 66 МПа. Разница составляет менее 15%.

Выводы

1. Потеря устойчивости консольно закрепленной оболочки при изгибе сопровождается образованием ромбовидных вмятин в области сжатия вблизи заделки. Влияние заполнителя на форму потери устойчивости оболочки незначительно.
2. До потери устойчивости образец ведет себя упруго. На закритической стадии деформирования первоначальная форма образца после снятия нагрузки не восстанавливается. На образце остаются локальные пластические деформации.
3. Заполнитель существенно увеличивает величину критической нагрузки. Зависимость критической нагрузки от степени заполнения имеет нелинейный характер.

Список литературы

1. Вольмир А.С. *Устойчивость деформируемых систем*. М.: Наука, 1967. 984 с.
2. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. *Устойчивость оболочек*. М.: Наука, 1978. 360 с.
3. Ильгамов М.А. Экспериментальное исследование устойчивости консольно закрепленной цилиндрической оболочки под действием поперечной силы и внутреннего давления. *Исследования по теории пластин и оболочек*. Казанск. ун-т. 1964. Ч. 2. С. 186–191.

4. Петров М.В., Федорова Т.Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом, при изгибе. *Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Механика*. 2011. №4(5). С. 2420–2422.
5. Баженов В.Г., Гоник Е.Г., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Павленкова Е.В., Петров М.В., Федорова Т.Г. Конечно-элементное решение задачи устойчивости и закритического поведения автоцистерн для транспортировки сыпучих грузов. *Проблемы прочности и пластичности*. Вып. 75. Ч. 1. 2013. С. 56–62.
6. Гоник Е.Г., Кибец А.И., Иванов В.А., Петров М.В., Федорова Т.Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости подъемной цистерны для перевозки сыпучих материалов при аварийном падении. *Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела*. Чебоксары. 2014. С. 129–131.
7. Петров М.В., Федорова Т.Г., Гоник Е.Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе. *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2015. №2(24). С.119–125.
8. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Petrov M.V. and 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, №5. P. 422–427.
9. Shariati M., Allahbakhsh H.R. Numerical and experimental investigations on the buckling of steel semi-spherical shells under various loadings. *Thin-Walled Structures*. 2010. Vol. 48, № 8. P. 620–628.
10. Баженов В.Г. Большие деформации и предельные состояния упругопластических конструкций. Упругость и неупругость. *Матер. Международ. науч. симпоз. по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 105-летию со дня рождения А.А. Ильюшина*. Москва, 20–21 янв. 2016 г. Под ред. проф. Г.Л. Бровко, Р.А. Васина, Д.В. Георгиевского. М.: МГУ, 2016. С.136–140.
11. Баженов В.Г., Жестков М.Н., Замятин В.А., Кибец А.И. Математическое моделирование развития запроектной аварии внутри корпуса реактора на быстрых нейтронах. *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. №3. С. 5–14.
12. Zeinoddini M., Harding J.E., Parke G.A.R. Contribution of ring resistance in the behaviour of steel tubes subjected to a lateral impact. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000. Vol. 42, №12. P. 2303–2320.
13. Zeinoddini M., Parke G.A.R., Harding J.E. Behaviour of axially preloaded steel tubes subjected to lateral impacts (an experimental study). *J. Impact Eng.* 2002. Vol. 27, №6. P. 669–690.
14. Баженов В.Г., Гоник Е.Г., Кибец А.И., Шошин Д.В. Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагрузениях. *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т.55, №1. С. 13–22.
15. Баженов В.Г., Варавин Д.А., Кибец А.И., Рябов А.А., Романов В.И. Исследование больших формоизменений сферической оболочки при контактом взаимодействии с жесткой облоймой под действием импульса перегрузки. *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56, №6. С. 38–45.
16. Вольмир А.С., Григорьев Ю.П., Станкевич А.И. *Сопrotивление материалов*. М.: Дрофа, 2007. 591 с.
17. Моссаковский В.И., Маневич Л.И., Мильцын А.М. *Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек*. Киев: Наукова думка, 1977. 141 с.
18. <http://www.sespel.com/>
19. Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.
20. Румшицкий Л.З. *Математическая обработка результатов эксперимента*. М.: Наука, 1971. 192 с.

References

1. Vol'mir A.S. *Ustoychivost' deformiruemyykh sistem*. М.: Nauka, 1967. 984 s.
2. Grigolyuk E.I., Kabanov V.V. *Ustoychivost' obolochek*. М.: Nauka, 1978. 360 s.
3. Il'gamov M.A. *Ekspериментal'noe issledovanie ustoychivosti konsol'no zakreplennoy*

tsilindricheskoy obolochki pod deystviem poperechnoy sily i vnutrennego davleniya. *Issledovaniya po teorii plastin i obolochek*. Kazansk. un-t. 1964. Ch. 2. S. 186–191.

4. Petrov M.V., Fedorova T.G. Eksperimental'noe issledovanie poteri ustoychivosti tonkostennykh obolochek, zapolnennykh sypuchim materialom, pri izgibe. *Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo. Mekhanika*. 2011. №4(5). S. 2420–2422.

5. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Kibets Yu.I., Pavlenkova E.V., Petrov M.V., Fedorova T.G. Konechno-elementnoe reshenie zadachi ustoychivosti i zakriticheskogo povedeniya avtotsistem dlya transportirovki sypuchikh грузов. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. Vyp. 75. Ch. 1. 2013. S. 56–62.

6. Gonik E.G., Kibets A.I., Ivanov V.A., Petrov M.V., Fedorova T.G. Eksperimental'noe issledovanie poteri ustoychivosti pod'emnoy tsisterny dlya perevozki sypuchikh materialov pri avariynom padenii. *Materialy VIII Vserossiyskoy konferentsii po mekhanike deformiruemogo tverdogo tela*. Cheboksary. 2014. S. 129–131.

7. Petrov M.V., Fedorova T.G., Gonik E.G. Eksperimental'noe issledovanie poteri ustoychivosti tonkostennykh obolochek pri chistom izgibe. *Vestnik ChGPU im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2015. №2(24). S. 119–125.

8. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Petrov M.V. and 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, №5. P. 422–427.

9. Shariati M., Allahbakhsh H.R. Numerical and experimental investigations on the buckling of steel semi-spherical shells under various loadings. *Thin-Walled Structures*. 2010. Vol. 48, № 8. P. 620–628.

10. Bazhenov V.G. Bol'shie deformatsii i predel'nye sostoyaniya uprugoplasticheskikh konstruksiy. Uprugost' i neuprugost'. *Mater. Mezhdunarod. nauch. simpoz. po problemam mekhaniki deformiruemyykh tel, posvyashchennogo 105-letiyu so dnya rozhdeniya A.A. Il'yushina*. Moskva, 20–21 yanv. 2016 g. Pod red. prof. G.L. Brovko, R.A. Vasina, D.V. Georgievskogo. M.: MGU, 2016. S. 136–140.

11. Bazhenov V.G., Zhestkov M.N., Zamyatin V.A., Kibets A.I. Matematicheskoe modelirovanie razvitiya zaproektnoy avarii vnutri korpusa reaktora na bystrykh neytronakh. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*. 2015. №3. S. 5–14.

12. Zeinoddini M., Harding J.E., Parke G.A.R. Contribution of ring resistance in the behaviour of steel tubes subjected to a lateral impact. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000. Vol. 42, №12. P. 2303–2320.

13. Zeinoddini M., Parke G.A.R., Harding J.E. Behaviour of axially preloaded steel tubes subjected to lateral impacts (an experimental study). *J. Impact Eng.* 2002. Vol. 27, №6. P. 669–690.

14. Bazhenov V.G., Gonik E.G., Kibets A.I., Shoshin D.V. Ustoychivost' i predel'nye sostoyaniya uprugoplasticheskikh sfericheskikh obolochek pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzheniyakh. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2014. T.55, №1. S. 13–22.

15. Bazhenov V.G., Varavin D.A., Kibets A.I., Ryabov A.A., Romanov V.I. Issledovanie bol'shikh formoizmeneniy sfericheskoy obolochki pri kontaktnom vzaimodeystvii s zhestkoy oboymoy pod deystviem impul'sa peregruzki. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2015. T. 56, №6. S. 38–45.

16. Vol'mir A.S., Grigor'yev Yu.P., Stankevich A.I. *Soprotivlenie materialov*. M.: Drofa, 2007. 591 s.

17. Mossakovskiy V.I., Manevich L.I., Mil'tsyn A.M. *Modelirovanie nesushchey sposobnosti tsilindricheskikh obolochek*. Kiev: Naukova dumka, 1977. 141 s.

18. <http://www.sespe.com/>

19. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike*. 8-e izd., pererab. M.: Nauka, 1977. 440 s.

20. Rumshiskiy L.Z. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta*. M.: Nauka, 1971. 192 c.

EXPEIMENTALLY INVESTIGATING LOSS OF STABILITY OF CANTILEVERED THIN-WALLED SHELLS LOADED IN TRANSVERSAL BENDING

Gonik E.G., Petrov M.V., Fedorova T.G.

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

Loss of stability of empty and loose matter-filled cantilevered specimens under transversal bending is experimentally studied. The specimens were chosen to be geometrically and physically similar to large-size tank-truck tanks for transporting loose matter. The free end of the specimen was loaded by a transversal force. The load was increased in a stepped mode up to loss of stability, which was accompanied by a clap. In the process of loading, bending and deformation of the specimen were measured, and alteration of the diameter was monitored. According to the experimental results, the specimen remained in the elastic state up to loss of stability. Loss of stability took place in the region of sealing in the compressed zone and was accompanied by the formation and subsequent growth of rhomb-shaped dinges, with their convex inwards. The critical loading value as a function of the filling degree of the specimen was studied. For empty specimens, the experimentally found critical loading value compares well with theoretical results published elsewhere. It is noted that the effect of the filling on loss of stability form is negligible, but is substantial on the critical loading value. The dependence of the critical loading value on the filling degree is nonlinear.

Keywords: sample, indicator, stability, critical force, stress, strain gaug.