

М. В. Петров, Е. Г. Гоник, Т. Г. Федорова

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНСОЛЬНО ЗАКРЕПЛЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ЧИСТОМ ИЗГИБЕ

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

**Аннотация.** Выполнены эксперименты по исследованию потери устойчивости пустых и заполненных сыпучим веществом консольно закрепленных цилиндрических оболочек при чистом изгибе. Для опыта образцы выбирались по подобию с большегабаритными автоцистернами для перевозки сыпучих материалов. Один конец жестко закреплялся на испытательном стенде, а на другой свободный конец образца прикладывался изгибающий момент. Его увеличивали до момента, когда происходила потеря устойчивости образца, которая сопровождалась хлопком. По полученным результатам экспериментальных исследований можно заключить, что потеря устойчивости образца происходит в упругой стадии. Образуются ромбовидные вмятины на середине образца в сжатой зоне выпуклостью внутрь. Критическая нагрузка не зависит от степени заполнения образцов. Значение критической нагрузки для пустых образцов совпадает с результатами работ [6].

**Ключевые слова:** индикатор, критическая сила, образец, оболочка, тензорезистор, устойчивость.

УДК: 539.374.3

**Введение.** Тонкостенные цилиндрические конструкции типа оболочек нашли широкое применение в технике и строительстве. В оболочках хранят и перевозят жидкие, сыпучие и газообразные вещества. Для транспортировки сыпучих материалов используют цистерны, имеющие вид замкнутой цилиндрической оболочки. Обеспечение устойчивости цистерн при изгибе является одной из основных задач при их

---

© Петров М. В., Гоник Е. Г., Федорова Т. Г., 2017

*Петров Михаил Васильевич*, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций строительного факультета, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

*Гоник Екатерина Григорьевна*

*e-mail: katya.gonik@mail.ru*, старший преподаватель кафедры строительных конструкций строительного факультета, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

*Федорова Татьяна Георгиевна*, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций строительного факультета, Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-38-60051 мол\_а\_дк).

Поступила 15.12.2016

эксплуатации. Актуальность экспериментальных и теоретических исследований этим и обусловлена. Исследования в данном направлении приведены в работах [1]–[12].

Цель работы – экспериментально исследовать поведение цилиндрических тонкостенных образцов при чистом изгибе, определить критическую нагрузку для пустых и заполненных сыпучим материалом образцов.

**Опытные исследования.** Для проведения опытов была собрана экспериментальная установка, показанная на рис. 1.

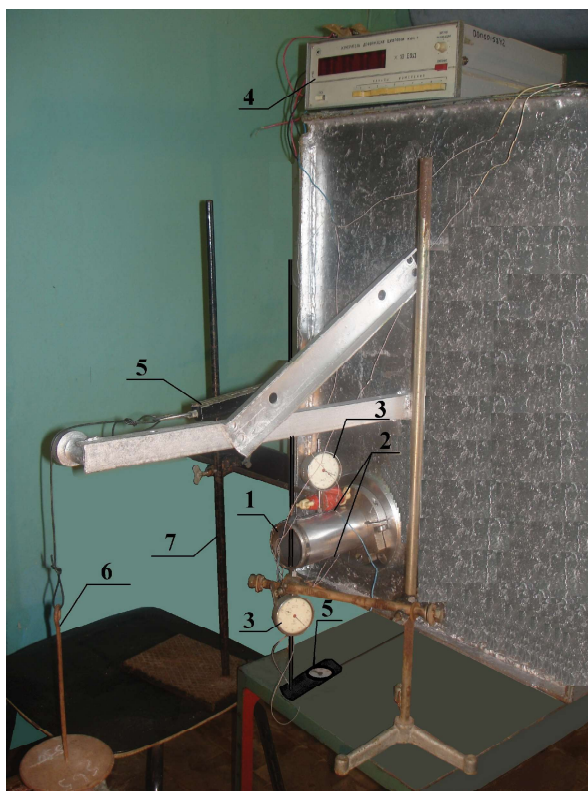


Рис. 1. Экспериментальная установка

В экспериментальную установку входили: модельный образец–1, тензорезисторы–2, индикаторы часового типа–3, измеритель деформаций–4, динамометры–5, подвески с грузами–6, штативы–7. Применяемые измерительные приборы: индикаторы часового типа ИЧ–10, измеритель деформаций ИДЦ–1 с тензорезисторами 2ФКП5–200, стрелочные динамометры МЕГЕОН 04100 и электронный штангенциркуль. Предварительно у образца замерялись наружные диаметры в трех сечениях электронным штангенциркулем с погрешностью измерения 0,01 мм. В процессе нагружения перемещения исследуемого образца замерялись индикаторами часового типа ИЧ–10. Один индикатор замерял вертикальное перемещение на середине длины образца сверху, другой индикатор замерял перемещение на свободном конце снизу. Значения деформаций показывал прибор – измеритель деформаций ИДЦ–1, к которому были подключены тензорезисторы, приклеенные на середине образца вдоль образующей сверху и снизу.

В лабораторных испытаниях исследовались образцы, выполненные из алюминиевого сплава 3004 — в состоянии Н19, схожего по физическим характеристикам со сплавом, применяемым ЗАО “Сеспель” [10] для производства автоцистерн. К испытаниям образцы тщательно подбирались. Были выбраны гладкие бесшовные образцы с размерами, необходимыми для лабораторных экспериментов, без видимых дефектов. Испытания были проведены на цилиндрических образцах, подобранных по геометрическому и физическому подобию с цистернами, со следующими параметрами подобия [9], [11]:

$$\alpha_1 = \frac{R}{R^*} = 0,026; \quad \alpha_3 = \frac{h}{h^*} = 0,020,$$
$$\frac{L}{R} = 3,359; \quad \frac{L^*}{R^*} = 3,357,$$

где  $R = 32,75$ мм,  $h = 0,1$ мм,  $L = 110$ мм — радиус, толщина стенки и длина испытываемых образцов,  $R^* = 1275$ мм,  $h^* = 5$ мм,  $L^* = 4280$ мм — радиус, толщина стенки и длина цистерн для транспортировки сыпучих грузов.

Испытания проводились на металлическом стенде. Один торец образца был жестко заземлен, а на другой торец, укрепленный плоским днищем, прикладывалась пара сил (рис. 1). Испытание образцов проводили поэтапно. Вначале испытывали пустые образцы, а затем — загруженные сыпучим веществом на 30%, 60% и 90% по объему. Сыпучим веществом являлся железный порошок ПЖ-5, насыпной плотностью  $\rho = 2,66$ г/см<sup>3</sup>.

Пару сил увеличивали до тех пор, пока образец не потеряет устойчивость. При увеличении момента на каждом этапе замерялись показания динамометров, индикаторов, тензорезисторов и диаметры оболочки в трех сечениях. Потеря устойчивости сопровождалась хлопком и образованием вмятин. Деформированная форма образца была зафиксирована с помощью фотоаппарата Casio EX-F1. На фотографии (рис. 2) видно, что на образце образовались ромбовидные вмятины выпуклостью внутрь.

Согласно показаниям прибора ИДЦ-1, к которому были подключены по мостовой схеме тензорезисторы, до потери устойчивости образец находился в упругой стадии работы. Подобные результаты были получены в работе [6], при испытании оболочек на чистый изгиб.

По окончании проведения опытов были оценены результаты и проведена статистическая обработка по [12]. Для пустых образцов для статистической обработки были приняты  $n=10$  образцов, экспериментальные результаты которых мало отличались. Они сведены в таблицу 1.



Рис. 2. Вид образца в зоне потери устойчивости

Таблица 1

№	$M_{cr}$ , Н·м	$y_1$ , мм	$y_2$ , мм	$\Delta y_1$ , мм	$\Delta y_2$ , мм	$(\Delta y_1)^2$ , мм <sup>2</sup>	$(\Delta y_2)^2$ , мм <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	15,2	0,06	0,14	0,004	0,004	0,000016	0,000016
2	15,6	0,06	0,14	0,004	0,004	0,000016	0,000016
3	14,5	0,05	0,13	0,006	0,006	0,000036	0,000036
4	14,8	0,05	0,13	0,006	0,006	0,000036	0,000036
5	14,5	0,05	0,13	0,006	0,006	0,000036	0,000036
6	15,6	0,06	0,14	0,004	0,004	0,000016	0,000016
7	15,2	0,06	0,14	0,004	0,004	0,000016	0,000016
8	15,6	0,06	0,14	0,004	0,004	0,000016	0,000016
9	15,2	0,06	0,14	0,004	0,004	0,000016	0,000016
10	14,8	0,05	0,13	0,006	0,006	0,000036	0,000036
$\Sigma$				0,048	0,048	0,00024	0,00024

где  $M_{cr} = F_{cr} \cdot a$ ,

$F_{cr}$  – критическая сила, замеренная динамометром,  
 $a$  – плечо, расстояние от оси динамометра до оси образца (см. рис. 3),

$y_1$  – вертикальное перемещение на середине длины образца,  
 $y_2$  – вертикальное перемещение на свободном конце образца.

Среднеарифметическая величина прогибов образцов составила: в середине  $y_1(t) = 0,056$  мм, на свободном конце  $y_2(t) = 0,136$  мм. Погрешности значений перемещений представлены в таблице 1, в 5 и 6 столбцах.

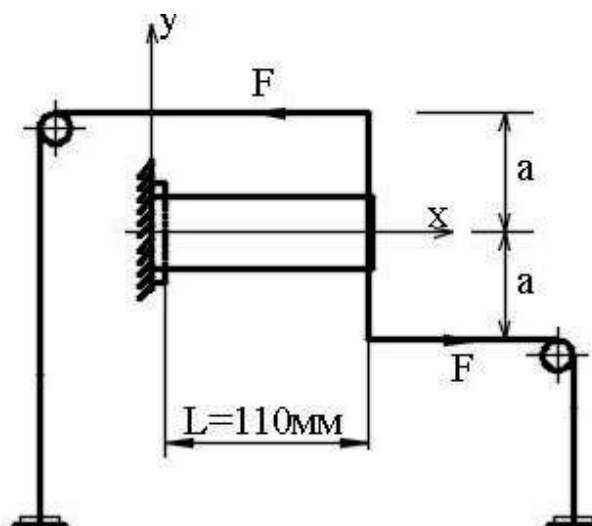


Рис. 3. Схема нагружения

Среднеквадратичная погрешность серии измерений определялась по формуле 1 [12]. В середине образца и на свободном конце она имеет одинаковое значение.

$$S_w = \sqrt{\frac{\sum [\Delta y_i^2(t)]}{n(n-1)}} = 0,0016 \text{ мм} \quad (1)$$

Коэффициент Стьюдента определялся по таблице IV приложения 2 [12]. Приняли значение надежности  $P = 0,95$  и  $k = n - 1 = 9$ . При данных значениях коэффициент Стьюдента  $t(n) = 2,262$ . Граница доверительного интервала (погрешность результата измерений) вычислялась:

$$\Delta W(t) = t(n)S_w = 0,0036 \text{ мм} \quad (2)$$

Относительная погрешность результата измерений в середине образца

$$\frac{\Delta W(t)}{W_1(t)} \cdot 100\% = 6,5\% \quad (3)$$

и на свободном конце образца

$$\frac{\Delta W(t)}{W_2(t)} \cdot 100\% = 2,6\%.$$

Зависимости величины прогибов от изгибающего момента представлены на графике (рис. 4).

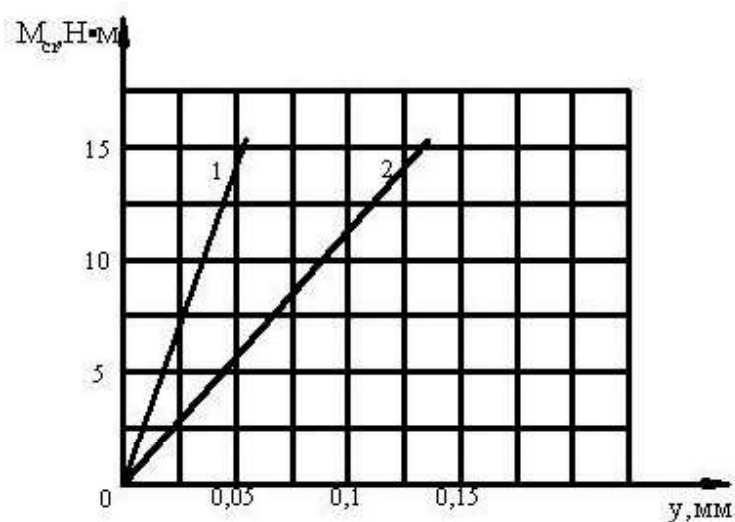


Рис. 4. График зависимости прогибов от изгибающего момента (1—на середине длины, 2—на свободном конце)

Было определено нижнее критическое напряжение в меридиональном направлении по формуле Гука. Оно составило  $\sigma_{cr} = 42$  МПа.

По формуле 17.72 [8] нижнее критическое напряжение будет:

$$\sigma_{cr}^n = \frac{0,18 \cdot E \cdot \delta}{R} = 38,6 \text{ МПа}, \quad (4)$$

где  $E=70$  ГПа модуль упругости,  $\delta=0,1$  мм толщина стенки оболочки,  $R=32,75$  мм радиус срединной поверхности образца. Разница составляет 8,1%.

Среднеарифметические значения  $M_{cr}$  для пустых и заполненных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Заполнение образцов	пустые	на 30%	на 60%	на 90%
Значения $M_{cr}, \text{Н}\cdot\text{м}$	15,1	15,15	15,17	15,2

Из таблицы 2 видно, что  $M_{cr}$  мало зависит от процента заполнения образцов.

#### Выводы.

1. Потеря устойчивости консольно закрепленного образца при чистом изгибе происходит в области сжатия на середине длины образца. Образуются мелкие вмятины, расположенные по полуокружности, направленные к центру кривизны. Явление потери устойчивости носит ярко выраженный местный характер.

2. До потери устойчивости образец ведет себя упруго. После снятия нагрузки первоначальная форма образца не восстанавливается. На образце остаются вмятины.

3. Критический изгибающий момент для пустых образцов мало отличается от критического изгибающего момента для заполненных сыпучим материалом ПЖ-5 образцов. Заполнитель не влияет на величину критической нагрузки и на форму потери устойчивости образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [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] 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. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4 (5). С. 2420–2422.
- [4] 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. 2013. Вып. 75 (1). С. 56–62.
- [5] 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.
- [6] Петров М. В., Федорова Т. Г., Гоник Е. Г. Экспериментальное исследование потери устойчивости тонкостенных оболочек при чистом изгибе // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 2 (24). С. 119–125.
- [7] 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, № 5. P. 422–427.
- [8] Вольмир А. С., Григорьев Ю. П., Станкевич А. И. Сопротивление материалов. М.: Москва, 2007. 591 с.
- [9] Моссаковский В. И., Маневич Л. И., Мильцын А. М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. Киев: Наукова думка, 1977. 141 с.
- [10] <http://www.sespel.com>.
- [11] Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [12] Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971.

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

## STABILITY RESEARCH KONSOLNO THE FIXED CYLINDRICAL THIN SHELLS AT A CLEAR BEND

I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

**Abstract.** Experiments on a research of loss of stability empty are executed and the fixed cylindrical envelopes filled with loose substance konsolno at a clear bend. For experience exemplars were chosen on similarity with bolshegabaritny tanker trucks for transportation of loose materials. One the end rigidly was fixed on the test stand, and on another, the free the end of an exemplar, was put a moment of deflection. It was increased till the moment, when there was a loss of stability of an exemplar which was followed cotton. By the received results of the pilot studies it is possible to conclude that loss of stability of an exemplar happens in a resilient stage. Rhomboidal dents on the middle of an exemplar in an oblate zone are formed by camber inside. Ultimate load does not depend on degree of fullness of exemplars. Value of ultimate load, for empty exemplars, coincides with results works [6].

**Keywords:** indicator, critical force, exemplar, envelope, resistance strain gage, stability.

### REFERENCES

- [1] Vol'mir A. S. Ustojchivost' deformiruemyh sistem. M.: Nauka, 1967. 984 s. (in Russian).
- [2] Grigoljuk Je. I., Kabanov V. V. Ustojchivost' obolochek. M.: Nauka, 1978. 360 s. (in Russian).
- [3] Petrov M. V., Fedorova T. G. Jeksperimental'noe issledovanie poteri ustojchivosti tonkostennyh obolochek, zapolnennyh sypuchim materialom pri izgibe // Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N. I. Lobachevskogo. Mehanika. N. Novgorod: Izd-vo NNGU im. N. I. Lobachevskogo. 2011. № 4 (5). S. 2420–2422. (in Russian).
- [4] Bazhenov V. G., Gonic E. G., Kibec A. I., Kibec Ju. I., Pavlenkova E. V., Petrov M. V., Fedorova T. G. Konechno-jelementnoe reshenie zadachi ustojchivosti i zakriticheskogo povedenija avtocistern dlja transportirovki sypuchih gruzov // Problemy prochnosti i plastichnosti. 2013. Vyp. 75 (1). S. 56–62. (in Russian).
- [5] Gonic E. G., Kibec A. I., Ivanov V. A., Petrov M. V., Fedorova T. G. Jeksperimental'noe issledovanie poteri ustojchivosti podemnoj cisterny dlja perevozki sypuchih materialov pri avarijnom padenii // Materialy VIII Vserossijskoj konferencii po mehanike deformiruemogo tverdogo tela. Cheboksary. 2014. S. 129–131. (in Russian).
- [6] Petrov M. V., Fedorova T. G., Gonic E. G. Jeksperimental'noe issledovanie poteri ustojchivosti tonkostennyh obolochek pri chistom izgibe // Vestnik ChGPU im. I. Ja. Jakovleva. Serija: Mehanika predel'nogo sostojanija. 2015. № 2 (24). S. 119–125. (in Russian).

---

*Petrov Mikhail Vasilyevich*, Doctor of Technical Sciences, Professor, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

*Fedorova Tatyana Georgievna*, Candidate of Technical Sciences, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

*Gonic Ekaterina Grigoryevna*, Senior Lecturer, I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.



- 
- [7] 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, № 5. P. 422–427.
- [8] Vol'mir A. S., Grigor'ev Ju. P., Stankevich A. I. Soprotivlenie materialov. M., 2007. 591 s. (in Russian).
- [9] Mossakovskij V. I., Manevich L. I., Mil'cyn A. M. Modelirovanie nesushhej sposobnosti cilindricheskih obolochek. Kiev: Naukova dumka, 1977. 141 s. (in Russian).
- [10] <http://www.sespel.com>.
- [11] Sedov L. I. Metody podobija i razmernosti v mehanike. 8-e izd., pererab. M.: Nauka, 1977. 440 s. (in Russian).
- [12] Rumshiskij L. Z. Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov jeksperimenta. M.: Nauka, 1971. (in Russian).