

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

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК, ЗАПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ СЫПУЧИМИ МАТЕРИАЛАМИ

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

**Аннотация.** Выполнены эксперименты по исследованию потери устойчивости пустых и заполненных сыпучими материалами цилиндрических образцов при изгибе. Образцы были изготовлены по физическому и геометрическому подобию [10], [11] с большегабаритными автоцистернами для перевозки сыпучих материалов [12]. Образец одним концом жестко закреплялся на испытательном стенде, а на другой, свободный конец образца, прикладывалась поперечная сила. Ее увеличивали до момента, когда происходила потеря устойчивости образца. Испытываемый образец заполнялся железным порошком ПЖ-5, речным песком, медным порошком на 30%, 60% и 90% по объему. Полученные результаты экспериментальных исследований были проанализированы и по этим данным построены графики зависимости критической нагрузки от степени заполнения образцов для испытываемых материалов. Образцы теряют устойчивость в упругой стадии работы. При потере устойчивости образуются ромбовидные вмятины около жесткой заделки в сжатой зоне выпуклостью внутрь.

**Ключевые слова:** железный порошок ПЖ-5, индикатор часового типа, критическая сила, образец, оболочка, устойчивость

УДК: 517.95:515.172.22

---

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

*Петров Михаил Васильевич*

**e-mail:** katty.gonik@mail.ru, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций строительного факультета ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары.

*Гоник Екатерина Григорьевна*

**e-mail:** katty.gonik@mail.ru, старший преподаватель кафедры строительных конструкций строительного факультета ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». г. Чебоксары.

*Федорова Татьяна Георгиевна*

**e-mail:** tanusha2884@mail.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций строительного факультета ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». г. Чебоксары.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований №16-38-60051

Поступила 15.08.2017

Применение тонкостенных металлических конструкций в настоящее время в технике и строительстве весьма целесообразно. В цилиндрических емкостях хранят и перевозят жидкие, сыпучие и газообразные вещества. Сыпучие вещества перевозят цистернами, имеющими вид замкнутой цилиндрической оболочки. Обеспечение ее устойчивости является одной из ключевых задач при эксплуатации. В работах [1],[2],[8],[9] исследованы устойчивость пустых тонкостенных оболочек. Потеря устойчивости и закритическое поведение тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом, исследовано в работах [3]-[7]. Устойчивость при изгибе тонкостенных оболочек, заполненных различными сыпучими материалами, недостаточно исследовано.

Поэтому целью выполнения данного исследования является экспериментальное исследование влияния различных сыпучих материалов на потерю устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек при поперечном изгибе.

В качестве сыпучих материалов были взяты: речной песок, железный порошок ПЖ-5, медный порошок. Насыпная плотность речного песка  $\rho=1,52\text{г/см}^3$ , железного порошка ПЖ-5  $\rho=2,62\text{г/см}^3$ , медного порошка  $\rho=3,54\text{ г/см}^3$ .

Для выполнения испытаний была собрана специально разработанная установка, показанная на рисунке 1.

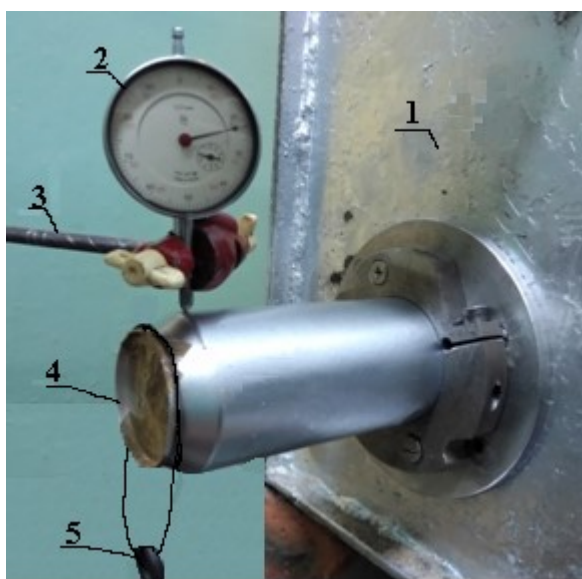


Рис.1. Фотография установки

Экспериментальная установка состояла из: металлического стенда -1, индикатора часового типа -2, штатива -3, модельного образца -4, нагружающего устройства -5.

Жесткий стенд был выполнен из стали. Образцы закреплялись консольно к стенду. Жесткая заделка для испытания образцов выполнялась следующим образом. Металлическая оправка, выточенная по внутреннему диаметру образца, жестко закреплялась на стенде. На оправку насаживался один конец испытываемого образца и на наружную поверхность этого конца образца надевались полукольца, которые стягивались между собой болтами и крепились к металлическому стенду.

С помощью подвески и грузов 5 создавалась нагрузка на образец. Нагрузка возрастала с шагом 1Н и доводилась до критической, при которой происходила полная

потеря устойчивости образца 4. Вертикальное перемещение конца оболочки замерялась с помощью индикатора часового типа 2, установленного на штативе 3.

Образцы были изготовлены из условия геометрического и физического подобия с большегабаритными автоцистернами. Материалом образцов был выбран алюминиевый сплав. Размеры цилиндрических образцов: наружный диаметр 65,5мм, длина 135мм, толщина 0,1мм.

Испытание образцов на устойчивость выполнялось следующим образом. Вначале были испытаны пустые образцы, а затем заполненные с одним видом упругого наполнителя на 30%, 60% и 90% по объему. К свободному концу оболочки прикладывалась нагрузка, и она возрастала с шагом 1Н, пока образец не потеряет устойчивость. При каждом шаге увеличения вертикальной нагрузки, замерялось показания индикатора. Нагрузка доводилась до критической, при которой происходила потеря устойчивости оболочки. Испытав оболочку с одним видом засыпки, вид сыпучего вещества менялся на другой. В процессе данных экспериментов определялась критическая сила и величина перемещения свободного конца.

По завершению экспериментов полученные результаты были проанализированы и статистически обработаны. Была установлена зависимость критической силы от процента загрузки образцов, заполненных речным песком, медным и железным порошками. Результаты представлены в таблице 1,2 и на рисунках 2,3.

Значение критических нагрузок в кН для образцов, заполненных различными сыпучими материалами представлены в таблице 1.

Табл.1

| Вид сыпучего материала | для пустых | для заполненных на: |       |       |
|------------------------|------------|---------------------|-------|-------|
|                        |            | 30%                 | 60%   | 90%   |
| Речной песок           | 0,153      | 0,156               | 0,158 | 0,173 |
| Железный порошок ПЖ-5  |            | 0,159               | 0,165 | 0,215 |
| Медный порошок         |            | 0,165               | 0,18  | 0,219 |

Возрастание критических нагрузок образцов заполненных сыпучими материалами относительно пустых образцов в процентах, представлены в таблице 2.

Табл.2

| Вид сыпучего материала | % заполнения |        |        |
|------------------------|--------------|--------|--------|
|                        | на 30%       | на 60% | на 90% |
| Речной песок           | 2            | 3,27   | 13,1   |
| Железный порошок ПЖ-5  | 4            | 7,84   | 40,5   |
| Медный порошок         | 7,84         | 17,65  | 43,1   |

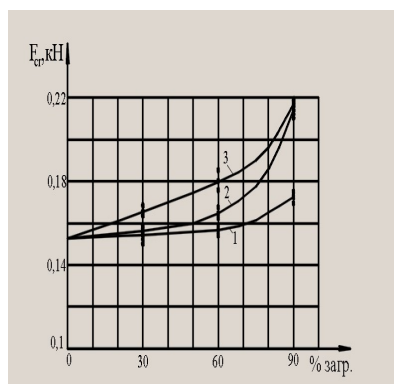


Рис.2. График зависимости критической силы от процента загрузки  
1 - для речного песка; 2 - для железного порошка ПЖ-5; 3 - для медного порошка

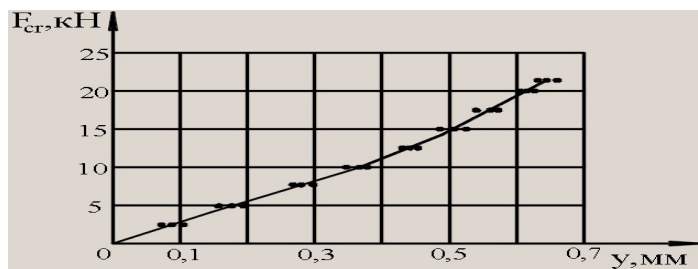


Рис.3. График зависимости прогиба от критической силы



Рис.4. Фотография деформированного образца

На рисунке 3 показана зависимость перемещения свободного конца образца от нагрузки для случая заполнения медным порошком на 90%.

Фотография деформированного образца представлена на рисунке 4. Гофры образовались в сжатой зоне. Они имели ромбовидную форму.

При нагружении поперечной нагрузкой образцов, заполненных сыпучим материалом, устойчивость увеличивается по сравнению с пустыми образцами. Нет опасности потери устойчивости.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
- [2] Ильгамов М. А. Экспериментальное исследование устойчивости консольно закрепленной цилиндрической оболочки под действием поперечной силы и внутреннего давления // Исследования по теории пластин и оболочек. 1964. № 2. С. 186–191.
- [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. 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 критического поведения автоцистерн для транспортировки сыпучих грузов // Проблемы прочности и пластичности. Вып.75(1). 2013. 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] Гоник Е. Г., Кибец А. И., Петров М. В., Федорова Т. Г. Экспериментальное исследование упругопластического деформирования и потери устойчивости подкрепленных цилиндрических оболочек с наполнителем при изгибе // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. Вып.75(3), 2013. С. 215–220.
- [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] 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.
- [9] Баженов В. Г., Гоник Е. Г., Кибец А. И., Шошин Д. В. Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагружениях // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т.55. №1. С. 13–22.
- [10] Моссаковский В. И., Маневич Л. И., Мильцын А. М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. Киев: Наукова думка, 1977. 141 с.
- [11] Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1977. 440 с.
- [12] <http://www.sespe.com/>

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

## FLEXURAL BUCKLING OF THIN SHELLS FILLED WITH DIFFERENT BULK MATERIALS

*Chuvash state University. I. N. Ulyanov, Cheboksary, Russia*

**Abstract.** Experiments were carried out to investigate the loss of stability of empty and filled with bulk materials cylindrical samples during bending. The samples were made in physical and geometric similarity [10,11] with large-sized tankers for transportation of bulk materials [12]. The sample was rigidly fixed at one end on the test bench, and on the other, the free end of the sample, a transverse force was applied. It was increased until the moment when the loss of stability of the sample occurred. The test sample was filled with iron powder PZH-5, river sand, copper powder by 30%, 60% and 90% by volume. The obtained results of experimental studies have been analyzed and the graphs of the dependence of the critical load on the degree of filling of samples for the tested materials lose stability in the elastic stage of operation. When buckling is formed, the diamond-shaped indentations around a rigid fixing in the compressed area bulge inside

**Keywords:** Iron powder PZH-5, indicator of hour type, critical force, sample, shell, stability.

## REFERENCES

- [1] Vol'mir A. S. Ustojchivost' deformiruemyh sistem. M.: Nauka, 1967. 984 s. (in Russian)
- [2] Il'gamov M. A. EHksperimental'noe issledovanie ustojchivosti konsol'no zakreplennoj cilindricheskoj obolochki pod dejstviem poperechnoj sily i vnutrennego davleniya // Issledovaniya po teorii plastin i obolochek. 1964. № 2. S. 186–191. (in Russian)
- [3] Petrov M. V., Fedorova T. G. EHksperimental'noe issledovanie poteri ustojchivosti tonkostennyh obolochek, zapolnennyh sypuchim materialom pri izgibe // Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N.I.Lobachevskogo. Mekhanika. 2011. №4(5). С. 2420–2422. (in Russian)
- [4] Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibec A. I., Kibec YU. I., Pavlenkova E. V., Petrov M. V., Fedorova T. G. Konechno-ehlementnoe reshenie zadachi ustojchivosti i zakriticheskogo povedeniya avtocistern dlya transportirovki sypuchih грузов // Problemy prochnosti i plastichnosti. Vyp.75(1). 2013. S. 56–62. (in Russian)
- [5] Gonik E. G., Kibec A. I., Ivanov V. A., Petrov M. V., Fedorova T. G. EHksperimental'noe issledovanie poteri ustojchivosti pod"emnoj cisterny dlya perevozki sypuchih materialov pri avarijnom padenii. Materialy VIII Vserossijskoj konferencii po mekhanike deformiruemogo tverdogo tela. CHEboksary, 2014. S. 129–131. (in Russian)

---

*Petrov Mikhail Vasilyevich*

e-mail: katya.gonik@mail.ru, Dr. Sci., Professor, I. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

*Gonic Ekaterina Grigoryevna*

e-mail: katya.gonik@mail.ru, Senior lecturer, I. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

*Fedorova Tatyana Georgievna*

e-mail: tanusha2884@mail.ru, Ph. D., Assoc. Professor, I. Yakovlev Chuvash State Pedagogical University, Cheboksary, Russia.

[6] Gonik E. G., Kibec A. I., Petrov M. V., Fedorova T. G. Eksperimental'noe issledovanie uprugoplasticheskogo deformirovaniya i poteri ustojchivosti podkreplennyh cilindricheskikh obolochek s zapolnitelem pri izgibe // Problemy prochnosti i plastichnosti. Mezhvuz. sb. N. Novgorod: Izd-vo NNGU. Vyp.75(3), 2013. S. 215–220. (in Russian)

[7] Petrov M. V., Fedorova T. G., Gonik E. G. Eksperimental'noe issledovanie poteri ustojchivosti tonkostennyh obolochek pri chistom izgibe // Vestnik CHGPU im. I.YA.Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. 2015. №2(24). С. 119–125. (in Russian)

[8] 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.

[9] Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibec A. I., Shoshin D. V. Ustojchivost' i predel'nye sostoyaniya uprugoplasticheskikh sfericheskikh obolochek pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzheniyah // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2014. T.55. №1. S. 13–22. (in Russian)

[10] Mossakovskij V. I., Manevich L. I., Mil'cyn A. M. Modelirovanie nesushchej sposobnosti cilindricheskikh obolochek. Kiev: Naukova dumka, 1977. 141 s. (in Russian)

[11] Sedov L. I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. 8-e izd., pererab. M.: Nauka, 1977. 440 s. (in Russian)

[12] <http://www.sespel.com/>