

В. Г. Баженов, А. И. Кибец, М. В. Петров, Т. Г. Федорова, Е. Г. Гоник

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ВЫПУЧИВАНИЯ ПОДКРЕПЛЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ**

*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний
Новгород, Россия*

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

Аннотация. Приводятся результаты экспериментального исследования деформирования и потери устойчивости заполненных сыпучим материалом замкнутых цилиндрических оболочек. Анализируется влияние продольного ребра жесткости на упругопластическое выпучивание оболочки. Показано, что способ крепления ребра жесткости существенно влияет на величину критической нагрузки и закритическое деформирование оболочки.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, сыпучий наполнитель, подкрепление, упругопластический изгиб, устойчивость, критическая нагрузка, эксперимент.

УДК: 539.3

Цель настоящей работы - экспериментальное исследование влияния продольного ребра жесткости на величину критической нагрузки и закритическое формоизменение замкнутой цилиндрической оболочки с заполнителем при поперечном изгибе для верификации вычислительной модели больше габаритной емкости для транспортировки сыпучих материалов [13], основанной на методе конечных элементов и явной схеме интегрирования по времени типа "крест" [14] - [16]. Экспериментальная установка и методика испытаний. Экспериментальная установка представлена на рис.1 и включает в себя: домкрат (1), динамометр (2), нагружающее устройство (3), испытуемый образец (4) и индикатор часового типа (5). В соответствии с теорией подобия [17] и расчетами по балочной схеме [18] в качестве испытуемых образцов для верификации вычислительной модели [13] были выбраны стальные (Ст3) тонкостенные трубы с наружным диаметром $D = 160$ мм, толщиной стенки $h=0,75$ мм, длиной 2500 мм. Внутри трубы равномерно загружается речной песок массой $m=60$ кг. Труба с песком устанавливается по торцам на две шарнирные опоры. Расстояние между опорами $L = 2400$ мм. Поскольку труба под действием весовой нагрузки в этом случае не теряет устойчивость, к ней прикладываются дополнительные поперечные силы, которые создаются домкратом (отмечен цифрой 1 на рис.1) и передаются на оболочку через нагружающее устройство (3).

© Баженов В. Г., Кибец А. И., Петров М. В., Федорова Т. Г., Гоник Е. Г., 2018

Баженов Валентин Георгиевич

e-mail: bazhenov@mech.unn.ru, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Кибец Александр Иванович

e-mail: kibec@mech.unn.ru, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

Петров Михаил Васильевич

e-mail: gimmapetrova20@gmail.com, доктор технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, профессор ФГБОУ ВО "Чувацкий государственный университет им. И.Н. Ульянова г. Чебоксары, Россия.

Федорова Татьяна Георгиевна

e-mail: tanusha2884@mail.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО "Чувацкий государственный университет им. И.Н. Ульянова г. Чебоксары, Россия.

Гоник Екатерина Григорьевна

e-mail: katya.gonik@mail.ru, старший преподаватель кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО "Чувацкий государственный университет им. И.Н. Ульянова г. Чебоксары, Россия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60051 мол_а_дк («Разработка вычислительных моделей и расчетно-экспериментальное исследование предельных состояний оболочечных конструкций при контактном взаимодействии с сыпучим наполнителем с учетом сложного нагружения, геометрической и физической нелинейности»).

Поступила 01.08.2018

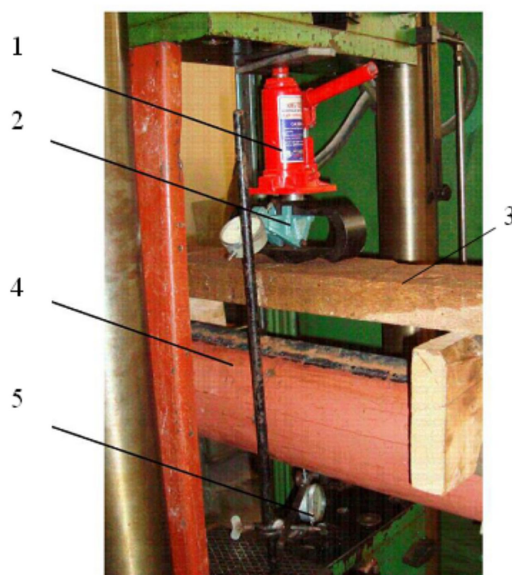


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 - домкрат, 2 - динамометр, 3 - нагружающее устройство, 4 - образец, 5 - индикатор часового типа.

Экспериментальное исследование поперечного изгиба замкнутой цилиндрической оболочки, заполненной песком, производится по следующей программе [19], [20]. После установки на опоры образец нагружается поперечными силами F , величина которых увеличивается с шагом $\Delta F = 0,5$ кН. По мере приближения к критическому значению ΔF уменьшается до 0,1 кН. На каждом шаге нагружения выполняются следующие операции: 1. индикатором часового типа ИЧ-10 измеряется прогиб на середине длины оболочки; 2. с помощью прямоугольной рамки с двумя индикаторами часового типа измеряются диаметры в горизонтальном и вертикальном направлении; 3. двумя тензодатчиками в продольном и окружном направлениях определяются деформации на середине длины образца в верхней и нижней точках; 4. осуществляется фотосъемка гофрообразования. Критическая нагрузка определялась методом точки перегиба [4], [13]. Согласно этому методу анализируется зависимость нагрузка - прогиб оболочки. Нагрузка считается критической, если ее последующее малое приращение приводит к резкому увеличению прогиба оболочки. Проведены 3 серии испытаний, в которых рассматривались: а) гладкая цилиндрическая оболочка, б) оболочка, усиленная продольным ребром жесткости, прикрепленным болтами через 100 мм, в) оболочка, соединенная с продольным ребром жесткости сплошным сварным швом в предполагаемой зоне потери устойчивости и прерывистым швом с шагом 100 мм вне этой зоны. Ребра жесткости выполнялись из стальных (Ст3сп ГОСТ 8509-93) уголков 25x25x4 мм. Ребро закрепляли двумя полочками на нагружаемой наружной поверхности образца. Длина ребра жесткости равнялась длине образца. В каждой серии испытывалось по 5 образцов. Результаты экспериментов. Результаты измерений, полученные после статистической обработки экспериментальных данных [21], приведены в таблице 1, где $F_{\text{крит}}$ - критическая нагрузка, $U_{\text{крит}}$ - прогиб в нижней точке

Номер	Испытуемый образец	$F_{\text{крит}}$, кН	$U_{\text{крит}}$, мм
1	гладкая оболочка	4,9	9,9
2	ребро жесткости прикреплено к оболочке болтами	5,0	7,6
3	ребро жесткости соединено с оболочкой сваркой	12,2	15,3

Таблица 3.

оболочки в ее среднем поперечном сечении, соответствующий критической нагрузке. На рис.2-4 изображены фотографии зон потери устойчивости гладкой оболочки, оболочки с ребром жесткости, прикрепленном болтами и сваркой, соответственно. Для этих же образцов на рис.5 приведены графики зависимости прогиба U в центре нижней поверхности оболочки от нагружающей силы F .

Анализ результатов экспериментов для гладкой оболочки показывает следующее. При смещении нагружающего устройства, примерно, на 10 мм в средней части нагружаемой поверхности цилиндрической оболочки образуется локальная поперечная вмятина. При дальнейшем нагружении длина вмятины увеличивается в окружном направлении, пока не достигнет, приблизительно, половины диаметра оболочки, после чего ее развитие прекращается. Последующее смещение нагружающего устройства приводит к расширению зоны потери устойчивости оболочки в окружном направлении за счет образования новых вмятин, расположенных в шахматном порядке относительно первой. На момент окончания нагружения на оболочке образовалось 5 гофр длиной 70-80 мм в окружном направлении (рис. 2).



Рис. 2. Образец без подкрепления (фрагмент центральной части оболочки после потери устойчивости)

Потеря устойчивости образцов подкрепленных при помощи болтов уголком происходит следующим образом. Сначала в оболочке между закреплениями образуются гофры в верхней части оболочки (рис.3). При последующем увеличении нагрузки происходит общая потеря устойчивости конструкции с захватом подкрепляющего элемента (уголка). Критическая нагрузка при таком креплении ребра жесткости практически не меняется (рис.5), но прогиб оболочки, при котором происходит потеря устойчивости, уменьшается, примерно, на 40 %.



Рис. 3. Форма потери устойчивости образца, усиленного уголком 25х25х4 мм (крепление болтами через 100 мм)

Если уголок приварен к оболочке, критическая нагрузка увеличивается в 2,5 раза и оболочка не испытывает больших формоизменений в рассмотренном диапазоне нагружения (рис.4).



Рис. 4. Образец, усиленный уголком 25х25х4 мм (крепление сваркой) после потери устойчивости/

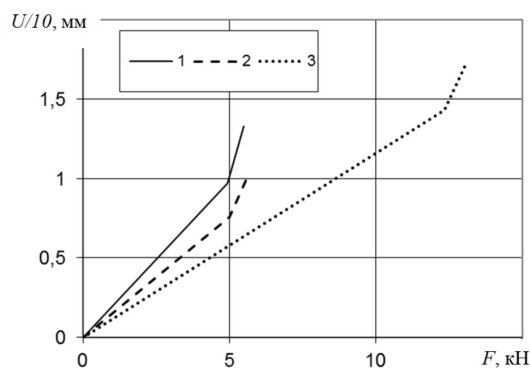


Рис. 5. Зависимость прогиба оболочки от нагрузки: 1 - гладкая оболочка, 2 - ребро жесткости прикреплено к оболочке болтами, 3 - ребро жесткости прикреплено к оболочке сваркой.

Закключение. Проведены экспериментальные исследования потери устойчивости и последующего упругопластического деформирования гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек, заполненных песком. В ходе экспериментов регистрировались формоизменение оболочки, прогиб в характерных точках, значение изгибающей нагрузки. Показано, что условия крепления продольных ребер жесткости существенно влияют на величину критической силы и закритическое деформирование цилиндрической оболочки. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для верификации вычислительной модели большегрузной емкости для автомобильной транспортировки сыпучих грузов [13].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М. : Наука, 1967. 984 с.
- [2] Алфутов Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М. : Машиностроение, 1978. 312 с.
- [3] Григолюк Э. И., Кабанов В. В. Устойчивость оболочек. М. : Наука, 1978. 360 с.
- [4] Абросимов Н. А., Баженов В. Г. Нелинейные задачи динамики композитных конструкций: Монография. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2002. 400 с.
- [5] Simitsen G. J. Buckling and Postbuckling of Imperfect Cylindrical Shell: A review // Applied Mechanics Reviews. 1986. V. 39. № 10. Pp. 1517–1524.
- [6] Теребушко О. И. Устойчивость и закритические деформации оболочек, подкрепленных редко расставленными ребрами // Расчет пространствен. конструкций. М. : Стройиздат, 1964. Вып. 9. С. 131 – 160.
- [7] Рябов В. М. Устойчивость подкрепленных поперечным набором цилиндрических оболочек при внешнем давлении и осевом сжатии // Расчет пространственных конструкций. М. : Стройиздат, 1969. Вып. 12. С. 156–167.
- [8] Выборнов В. Г., Коноплев И. Г., Коноплев Ю. Г. Экспериментальное исследование рационального подкрепления цилиндрических оболочек при действии локальных нагрузок // Исследования по теории пластин и оболочек. 1975. Вып. 11. С. 174–180.
- [9] Теребушко О. И. О влиянии параметров подкрепления на динамическую устойчивость цилиндрической оболочки // Прикладная механика. 1977. Т. 13. № 3. С. 10–16.
- [10] Кабанов В. В., Железнов Л. П., Фадеев В. Т. Исследование прочности и устойчивости подкрепленной круговой цилиндрической оболочки при неоднородном нагружении // Изв. ВУЗ Авиационная техника. 1990. № 2. С. 17–21.
- [11] Шарыпов Д. В. Устойчивость цилиндрической оболочки, подкреплённой шпангоутами // Вестник СПбГУ. 1998. № 4. С. 132–136.
- [12] Постнов В. А., Тумашик Г. А., Москвина И.В. Об устойчивости подкрепленной цилиндрической оболочки // Проблемы прочности и пластичности. 2007. №69. С. 18–23.
- [13] Баженов В. Г., Гоник Е. Г., Кибец А. И., Петров М. В., Федорова Т. Г. Устойчивость и закритическое поведение большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих грузов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 5. С. 34–40.
- [14] 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.

- [15] Баженов В. Г., Кибец А. И., Цветкова И. Н. Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 2. С. 20–26.
- [16] 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.
- [17] Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – 8-е изд., перераб. М. : Наука, 1977. 440 с.
- [18] Прочность. Устойчивость. Колебания // Справочник в трех томах. Том 3. Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М. : Машиностроение, 1968. 567 с.
- [19] 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. V. 28. № 1–2. Pp. 16–20.
- [20] Гоник Е. Г., Кибец А. И., Петров М. В., Федорова Т. Г., Фролова И. А. Влияние аппроксимации диаграммы деформирования на критические нагрузки при поперечном изгибе цилиндрической оболочки // Проблемы прочности и пластичности. 2017. № 79. № 2. С. 169–181.
- [21] Румшиский Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов. М. : Наука, 1971. 192 с.

V. G. Bazhenov, A. I. Kibets, M. V. Petrov, T. G. Fedorova, E. G. Gonik

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ELASTIC PLASTIC EXPANSION OF CIRCLIN LINES WITH COLLECTOR UNDER ACTION OF CROSS-SIDED FORCES

Research Institute of Mechanics, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

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

Abstract. The results of an experimental study of deformation and loss of stability of closed cylindrical shells filled with loose material are presented. The effect of the longitudinal stiffener on elastoplastic buckling of the shell is analyzed. It is shown that the method of fastening the stiffener significantly affects the magnitude of the critical load and the supercritical deformation of the shell.

Keywords: cylindrical shell, loose filler, reinforcement, elastoplastic bending, stability, critical load, experiment.

REFERENCES

-
- Bazhenov Valentin Georgievich*
 e-mail: bazhenov@mech.unn.ru, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Research Institute of Mechanics, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia.
Kibets Alexander Ivanovich

- [1] Vol'mir A. S. Ustojchivost' deformiruemykh sistem. M. : Nauka, 1967. 984 s. (in Russian)
- [2] Alfutov N. A. Osnovy rascheta na ustojchivost' uprugih sistem. M. : Mashinostroyeniye, 1978. 312 s. (in Russian)
- [3] Grigolyuk E.H. I., Kabanov V. V. Ustojchivost' obolochek. M. : Nauka, 1978. 360 s. (in Russian)
- [4] Abrosimov N. A., Bazhenov V. G. Nelinejnye zadachi dinamiki kompozitnykh konstrukcij: Monografiya. N. Novgorod : Izd-vo NNGU, 2002. 400 s. (in Russian)
- [5] Simitsen G. J. Buckling and Postbuckling of Imperfect Cylindrical Shell: A review // Applied Mechanics Reviews. 1986. V. 39. № 10. Pr. 1517–1524.
- [6] Terebushko O. I. Ustojchivost' i zakriticheskie deformacii obolochek, podkreplennykh redko rasstavlennymi rebrami // Raschet prostranstven. konstrukcij. M. : Strojizdat, 1964. Vyp. 9. S. 131 – 160. (in Russian)
- [7] Ryabov V. M. Ustojchivost' podkreplennykh poperechnym naborom cilindricheskikh obolochek pri vneshnem davlenii i osevom szhatii // Raschet prostranstvennykh konstrukcij. M. : Strojizdat, 1969. Vyp. 12. S. 156–167. (in Russian)
- [8] Vybornov V. G., Konoplev I. G., Konoplev YU. G. EHksperimental'noe issledovanie racional'nogo podkrepleniya cilindricheskikh obolochek pri dejstvii lokal'nykh nagruzok // Issledovaniya po teorii plastin i obolochek. 1975. Vyp. 11. S. 174–180. (in Russian)
- [9] Terebushko O. I. O vliyaniy parametrov podkrepleniya na dinamicheskuyu ustojchivost' cilindricheskoj obolochki // Prikladnaya mekhanika. 1977. T. 13. № 3. S. 10–16. (in Russian)
- [10] Kabanov V. V., ZHeleznov L. P., Fadeev V. T. Issledovanie prochnosti i ustojchivosti podkreplennoj krugovoj cilindricheskoj obolochki pri neodnorodnom nagruzhении // Izv. VUZ Aviacionnaya tekhnika. 1990. № 2. S. 17–21. (in Russian)
- [11] SHarypov D. V. Ustojchivost' cilindricheskoj obolochki, podkreplyonnoy shpangoutami // Vestnik SPbGU. 1998. № 4. S. 132–136. (in Russian)
- [12] Postnov V. A., Tumashik G. A., Moskvina I.V. Ob ustojchivosti podkreplennoj cilindricheskoj obolochki // Problemy prochnosti i plastichnosti. 2007. №69. S. 18–23. (in Russian)
- [13] Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibec A. I., Petrov M. V., Fedorova T. G. Ustojchivost' i zakriticheskoe povedenie bol'shegabaritnykh cistern dlya transportirovki sypuchih gruzov // Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin. 2015. № 5. S. 34–40. (in Russian)

e-mail: kibec@mech.unn.ru, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Research Institute of Mechanics, N.I. Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia.

Petrov Mikhail Vasilyevich

e-mail: rimmapetrova20@gmail.com, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Professor of I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

Fedorova Tatyana Georgievna

e-mail: tanusha2884@mail.ru, Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of faculty of building designs I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

Gonik Ekaterina Grigoryevna

e-mail: katya.gonik@mail.ru, Senior Lecturer of the Department of Building Structures I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

- [14] Bazhenov V. G., Gonik E. G., Kibec A. I., Shoshin D. V. Uстойchivost' 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)
- [15] Bazhenov V. G., Kibec A. I., Cvetkova I. N. Chislennoe modelirovanie nestacionarnykh processov udarnogo vzaimodeystviya deformiruemykh ehlementov konstrukcij // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1995. № 2. S. 20–26. (in Russian)
- [16] Bazhenov V. G., Zhestkov M. N., Zamyatin V. A., Kibec A. I. Matematicheskoe modelirovanie razvitiya zaproektnoj avarii vnutri korpusa reaktora na bystrykh nejtronah // Vestnik PNIPU. Mekhanika. 2015. № 3. S. 5–14. (in Russian)
- [17] Sedov L. I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. – 8-e izd., pererab. M. : Nauka, 1977. 440 s. (in Russian)
- [18] Prochnost'. Uстойchivost'. Kolebaniya // Spravochnik v trekh tomah. Tom 3. Pod red. I.A. Birgera i YA.G. Panovko. M. : Mashinostroenie, 1968. 567 s. (in Russian)
- [19] 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. V. 28. № 1–2. Pr. 16–20.
- [20] Gonik E. G., Kibec A. I., Petrov M. V., Fedorova T. G., Frolova I. A. Vliyanie approksimacii diagrammy deformirovaniya na kriticheskie nagruzki pri poperechnom izgibe cilindricheskoj obolochki // Problemy prochnosti i plastichnosti. 2017. № 79. № 2. S. 169–181. (in Russian)
- [21] Rumshiskij L. Z. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov ehksperimentov. M. : Nauka, 1971. 192 s. (in Russian)