

Т. Г. Рытова¹, Л. А. Максимова^{2,3}, М. В. Петров³, Н. Г. Пфаненштиль⁴

АНАЛИЗ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТОНКОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ, ШАРНИРНО ОПЕРТОЙ НА ДВЕ ОПОРЫ, С СЫПУЧИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия*

² *Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*

³ *Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия*

⁴ *Казанский филиал Российского государственного университета правосудия, г. Казань, Россия*

Аннотация. Приводятся результаты экспериментального исследования потери устойчивости заполненных сыпучим материалом тонкостенных замкнутых цилиндрических оболочек, шарнирно опертых на две опоры. Разработан способ приближенного расчета на устойчивость при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом. Показан приближенный расчет автоцистерны от весовой нагрузки.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, автоцистерна, сыпучий наполнитель, упруго-пластический изгиб, устойчивость, критическая нагрузка, эксперимент.

DOI: 10.26293/chgpu.2019.42.4.013

УДК: 539.3

Введение. Потеря устойчивости и закритическое поведение тонкостенных оболочек, заполненных сыпучим материалом, рассмотрены в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6].

© Рытова Т. Г., Максимова Л. А., Петров М. В., Пфаненштиль Н. Г., 2019

Рытова Татьяна Георгиевна

e-mail: tanusha2884@mail.ru, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия.

Максимова Людмила Анатольевна

e-mail: maximova_ng@mail.ru, доктор физико-математических наук, профессор, Российский университет транспорта, г. Москва; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Петров Михаил Васильевич

e-mail: rimmmapetrova20@gmail.com, доктор технических наук, доцент, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Пфаненштиль Надежда Георгиевна

e-mail: nfedorova83@mail.ru, кандидат исторических наук, доцент, Казанский филиал Российского государственного университета правосудия, г. Казань, Россия.

Поступила 01.11.2019

Часть работ была посвящена экспериментальным исследованиям. Так, в работе В. И. Моссаковского [7] рассматривается возможность перенесения результатов модельных исследований в натуру. В работе [7] представлены результаты испытаний и статистической обработки гладких цилиндрических оболочек при различных вариантах нагружений, в том числе при действии поперечной силы. Исследования проводились на моделях с геометрическими параметрами $R/\delta = 300$, $L/R = 2,5$, приемлемых для лабораторных исследований. По результатам обработки экспериментов В. И. Моссаковский сделал выводы: а) закон распределения параметра несущей способности близок к нормальному; б) среднее значение параметра отношения экспериментальной критической нагрузки к теоретической ($Q_{\text{э}}/Q_{\text{т}}$) почти не изменяется с увеличением размеров образцов.

В работе А. В. Саченкова [8] приведена идея совмещения теоретического и экспериментального методов исследования оболочек и пластин, который будет основан на теории подобия и размерностей. Теоретико-экспериментальный метод А. В. Саченкова позволяет по предварительному теоретическому анализу установить определяющие параметры, построить формулы, вывести функциональные зависимости, с помощью которых описываются характерные особенности поведения оболочек, устанавливаемые в последующем на основании экспериментальных данных. Данный метод апробирован при исследовании напряженного состояния круговой цилиндрической оболочки при действии локальной поперечной нагрузки. Результаты изложены в работе Ю. Г. Коноплева [9].

Отметим, что при экспериментальных исследованиях устойчивости цилиндрических оболочек возникают трудности, связанные с качественным изготовлением образцов, правильной передачей нагрузок. По данным ранее проведенных экспериментов [9, 10] расхождение экспериментальных и расчетных данных по величине критической нагрузки достигает более двух раз.

Теоретическому исследованию потери устойчивости цилиндрических оболочек при изгибе посвящены работы А. С. Вольмира, А. С. Ноздрина, Ю. Н. Бердникова [11, 12], основанные на классическом решении линейной задачи потери устойчивости при изгибе, для вычисления критических напряжений цилиндрической оболочки при изгибе за пределами упругости авторы использовали численные методы. Задачу изгиба трубы исследовал Ю. В. Коновалов [13]. Приведен уточняющий коэффициент, больший по значению, чем полученный по приближительным расчетам.

Задача исследования потери устойчивости тонкостенных оболочек является трехмерной, физически и геометрически нелинейной. Но оценочного приближенного метода расчета нет. Поэтому разработка способа приближенного расчета на устойчивость при изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек, заполненных сыпучим материалом, является весьма актуальной, необходимой для производства.

Экспериментальное исследование устойчивости тонкостенной оболочки, шарнирно опертой на две опоры. Натурные испытания устойчивости большегабаритных автомобильных цистерн для транспортировки сыпучих материалов требуют огромных затрат. Для определения характера потери устойчивости были проведены эксперименты на модельных образцах. Рассматривались тонкостенные цилиндрические оболочки.

В работе Федоровой Т. Г. [14] проведен ряд экспериментов на модельных образцах, изготовленных глубокой вытяжкой из алюминиевого сплава 3004 в состоянии

Н19. Экспериментальные исследования устойчивости цилиндрических оболочек с наполнителем при изгибе выполнялись на образцах, имеющих следующие начальные размеры: толщина стенки оболочки $h(t) = 0,10 \pm 0,01$ мм, отношение длины оболочки к толщине $L/h = 1350$, радиусы оболочки $R = 328h$. Было проведено несколько типов испытаний: один торец образца жестко защемлен, к другому прикладывается поперечная нагрузка, направленная вниз, образец без наполнителя; один торец образца жестко защемлен, к другому прикладывается поперечная нагрузка, направленная вниз, образец заполнен железным порошком; один торец образца жестко защемлен, к другому прикладывается поперечная нагрузка, образец заполнен железным порошком. Результаты численного решения задачи были получены на основе вычислительного комплекса “Динамика-3” [15]. Сравнительный анализ результатов численных и экспериментальных исследований показал, что разработанная вычислительная модель качественно правильно и с приемлемой для инженерной практики точностью описывает потерю устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки, заполненной сыпучим материалом, при изгибе.

Размеры образцов подбирались с учетом условий физического и геометрического подобия с большегабаритными автоцистернами, изготавливаемых на заводе ЗАО “Чебоксарское предприятие “Сеспель”.

На основе модельных образцов была создана модель цистерны для транспортировки сыпучих грузов. У рассматриваемой цистерны для транспортировки сыпучих грузов $R = 1275$ мм, $h = 5$ мм. Параметры подобия равны соответственно

$$\alpha_1 = \frac{R}{R'} = 0,02, \quad \alpha_3 = \frac{h}{h'} = 0,02. \quad (1)$$

Таким образом, условие геометрического подобия [7] $\alpha_1 = \alpha_3$ для выбранного образца удовлетворяется.

Цилиндрическую тонкостенную оболочку, шарнирно опертую на две опоры (рис. 1), заполняли железным порошком ПЖ-5 насыпной плотностью $\rho = 2,66$ г/см³. Испытываемая оболочка в местах соединения образцов устанавливается на две неподвижные опоры. Опоры жесткие, устойчивые, выполнены из стали в виде уголков. Испытываемая оболочка собиралась из 9 образцов, ранее описанных в работе Федоровой Т. Г. [14]. Стыковка образцов осуществлялась на специально изготовленной металлической втулке по внутреннему диаметру образца из стали, на металлическую втулку по наружной стороне наносился клей БФ-2 тонким слоем, на втулку с клеем надевались два образца с каждой стороны соответственно. После полного высыхания сверху выполняли обжим хомутами.

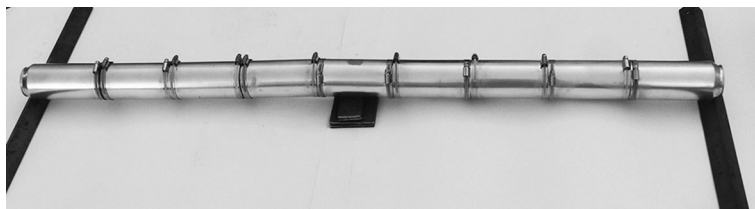


Рис. 1. Схема установки

Испытание оболочки на устойчивость проводили по следующей схеме: при пустой оболочке от собственного веса измеряли диаметры оболочки в осевом и кольцевом направлениях штангенциркулем в пяти сечениях по длине образца (сечение на левой опоре, сечение в середине оболочки между опорами, сечение на правой опоре); поэтапно выполнялась засыпка образца на 30%, 60%, 90%. На каждом этапе измеряли диаметры оболочки в осевом и кольцевом направлениях штангенциркулем, засыпку производили до критического значения, при которой происходит потеря устойчивости оболочки, фиксировали деформированную форму образца с помощью фотоаппарата (рис. 2).

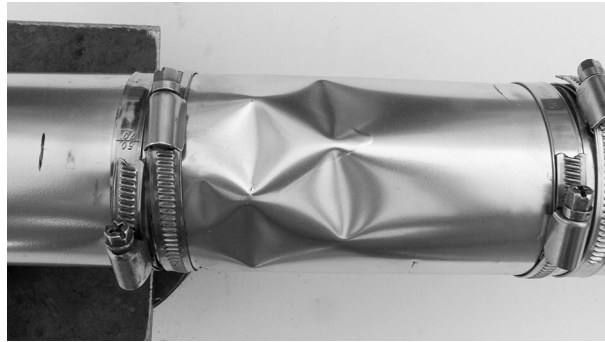


Рис. 2. Потеря устойчивости в центральной части образца

После завершения испытаний всех оболочек, был проведен анализ остаточной формы образцов. Гофры образуются в сжатой зоне и имеют ромбовидную форму. До потери устойчивости оболочки деформировались упруго. Величина критической массы, при которой происходила потеря устойчивости, 0,103 кН при заполнении образца железным порошком на 90%.

Расчет на устойчивость подъемной автоцистерны. В работе Федоровой Т. Г. [14] рассмотрено численное исследование потери устойчивости большегабаритных цистерн для транспортировки сыпучих материалов. В расчетах емкость моделировалась замкнутой цилиндрической оболочкой ($h = 0,5$ см, $R/h = 255$, $L/R = 12,5$), которая на торцах опиралась на неподвижные недеформируемые плиты. Оболочка выполнена из сплава АМг5, имеющего следующие механические характеристики: плотность $\rho = 2,65$ г/см³, модуль упругости $E = 63$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,32$, предел текучести $\sigma_T = 0,146$ ГПа, модуль кинематического упрочнения $g = 0,2088$ ГПа.

Результаты расчета следующие. При достижении весовой нагрузкой значения, равного 4,2 допустимого проектом веса груза, в средней части цилиндрической обечайки образуются две поперечные складки. В последующем увеличение весовой нагрузки приводит к расширению этой зоны и увеличению числа складок. Критическое напряжение по численному расчету получилось $\sigma_{cr} = 116$ МПа.

Приведем упрощенный расчет на устойчивость подъемной автоцистерны. Цистерна подъемная из алюминиевого сплава АМГ-5 имеет размеры: $R = 1,275$ м, $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $l = 16$ м, $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа. Масса загрузки $m = P_0 = 0,4$ МН, $\sigma_T = 146$ МПа — предел текучести материала.

Согласно способу приближенного расчета на устойчивость при поперечном изгибе тонкостенных цилиндрических оболочек средней длины, заполненных сыпучим материалом, приведенному в работах [14, 15, 16], критическое напряжение, при котором оболочка теряет устойчивость, $\sigma'_{cr} = 60,4$ МПа. Критическое напряжение для оболочки, заполненной на 90%, $\sigma_{cr} = 105,8$ МПа.

Расхождение между численным значением и теоретическим значением, рассчитанному по предварительному методу, составляет 8,79%, в пределах допустимой погрешности в 10%. Что подтверждает правильность выбранной методики упрощенного расчета.

Заключение. Проведены экспериментальные исследования потери устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки, шарнирно опертой на двух опорах, получены значения критического напряжения. Показано, что расхождение в значениях критического напряжения, при котором оболочка теряет устойчивость, при компьютерном и ручном расчете по приближенной методике не превышает 10%. Полученные данные могут быть использованы для верификации вычислительной модели большегрузной емкости для автомобильной транспортировки сыпучих грузов [2].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Численный анализ деформирования, потери устойчивости и закритического поведения большегабаритных емкостей для автомобильной транспортировки сыпучих грузов / В. Г. Баженов, А. И. Кибец, М. В. Петров [и др.] // Проблемы прочности и пластичности. 2008. Т. 70. С. 88–96.
- [2] Теоретическое и экспериментальное исследование потери устойчивости и закритического поведения тонкостенной цилиндрической оболочки при изгибе / В. Г. Баженов, А. И. Кибец, М. В. Петров [и др.] // Проблемы прочности и пластичности. 2009. Т. 71. С. 77–83.
- [3] 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.
- [4] Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // Materials Physics and Mechanics. 2016. Vol. 28. P. 16–20.
- [5] Конечно-элементное решение задачи устойчивости и закритического поведения автоцистерн для транспортировки сыпучих грузов / В. Г. Баженов, Е. Г. Гоник, А. И. Кибец [и др.] // Проблемы прочности и пластичности. 2013. Т. 75, № 1. С. 56–62.
- [6] Stability and Supercritical Behavior of Large Size Tankers for Transportation of Loose Goods / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // J. of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44, no. 5. P. 422–427.
- [7] Моссаковский В. И., Маневич Л. И., Мильцын А. М. Моделирование несущей способности цилиндрических оболочек. Киев: Наукова Думка, 1977. 141 с.
- [8] Саченков А. В. Теоретико-экспериментальный метод исследования устойчивости пластин и оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: КГУ, 1970. Т. 617. С. 391–433.
- [9] Коноплев Ю. Г., Саченков А. В. Исследование напряженного состояния круговой цилиндрической оболочки с жесткой площадкой загрузки // Исследования по теории пластин и оболочек. Казань: КГУ, 1966. Т. 4. С. 65–83.
- [10] Григолок Э. И., Кабанов В. В. Устойчивость оболочек. Москва: Наука, 1978. 360 с.
- [11] Бердников Ю. Н., Галиханов Б. К. Об одном приближенном решении задачи устойчивости цилиндрической оболочки при неоднородном поперечном давлении // Прочность конструкций. Уфа, 1980. № 4. С. 58–61.
- [12] Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. Москва: Физматгиз, 1967. 984 с.
- [13] Коновалов Ю. В. Изгиб бесконечной цилиндрической оболочки // Приклад. матем. и механ. 1940. Т. 4, № 5–6. С. 35–54.

- [14] Федорова Т. Г. Экспериментально-теоретическое исследование упругопластического деформирования, потери устойчивости и заkritического поведения цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем при изгибе: монография. Чебоксары: ИД “Среда”, 2018. 184 с.
- [15] Вычислительный комплекс “Динамика-3”. Аттестационный паспорт программного средства. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013.
- [16] Петров М. В., Гоник Е. Г. Расчет предельного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек при изгибе, заполненных сыпучим материалом // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2019. № 2(40). С. 117–127.

T. G. Rytova¹, L. A. Maximova^{2,3}, M. V. Petrov³, N. G. Pfanenshtil⁴

ANALYSIS OF LOSS OF STABILITY OF A CYLINDRICAL THIN-WALLED SHELL, HINGED ON TWO SUPPORTS, WITH A LOOSE FILLER

¹*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

²*Russian University of transport, Moscow, Russia*

³*I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

⁴*Kazan Branch of the Russian State University of Justice, Kazan, Russia*

Abstract. The results of an experimental study of the loss of stability of thin-walled closed cylindrical shells filled with bulk material, hinged on two supports, are presented. A method for approximate calculation of the bending stability of thin-walled cylindrical shells filled with bulk material has been developed. An approximate calculation of the tank truck from the weight load is shown.

Keywords: cylindrical shell, tank truck, bulk filler, elastic-plastic bending, stability, critical load, experiment.

REFERENCES

- [1] Numerical analysis of deformation, loss of stability and supercritical behavior of oversized containers for the automotive transportation of bulk cargo / V. G. Bazhenov, A. I. Kibets, M. V. Petrov et al. // Problems of strength and plasticity. 2008. Vol. 70. P. 88–96. (in Russian).
- [2] Theoretical and experimental study of the loss of stability and supercritical behavior of a thin-walled cylindrical shell under bending / V. G. Bazhenov, A. I. Kibets, M. V. Petrov et al. // Problems of strength and plasticity. 2009. Vol. 71. P. 77–83. (in Russian).
- [3] Petrov M. V., Fedorova T. G., Gonik E. G. Experimental study of the loss of stability of thin-walled shells under pure bending // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named I. Yakovlev. Series: The Mechanics of the Ultimate State. 2015. no. 2(24). P. 119–125. (in Russian).

Rytova Tatyana Georgievna, Candidate of technical Sciences, associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

Maximova Lyudmila Anatolyevna, Doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, Russian University of transport, Moscow; I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.

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

Pfanenshtil Nadezhda Georgievna, Candidate of historical Sciences, Associate Professor, Kazan Branch of the Russian State University of Justice, Kazan, Russia.

-
- [4] Stability and supercritical behaviour of thin-walled cylindrical shell with discrete aggregate in bending / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. P. 16–20.
- [5] Finite element solution to the problem of stability and supercritical behavior of tank trucks for the transport of bulk cargo / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // *Problems of strength and plasticity*. 2013. Vol. 75, no. 1. P. 56–62. (in Russian).
- [6] Stability and Supercritical Behavior of Large Size Tankers for Transportation of Loose Goods / V. G. Bazhenov, E. G. Gonik, A. I. Kibets et al. // *J. of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. Vol. 44, no. 5. P. 422–427.
- [7] Mossakovsky V. I., Manevich L. I., Miltsyn A. M. Modeling of the bearing capacity of cylindrical shells. Kiev: Naukova Dumka, 1977. 141 p. (in Russian).
- [8] Sachenkov A. V. Theoretical and experimental method for studying the stability of plates and shells // *Research on the theory of plates and shells*. Kazan: Kazan University press, 1970. Vol. 617. P. 391–433. (in Russian).
- [9] Konoplev Y. G., Sachenkov A. V. Study of the stress state of a circular cylindrical shell with a rigid loading platform // *Research on the theory of plates and shells*. Kazan: Kazan University press, 1966. Vol. 4. P. 65–83. (in Russian).
- [10] Grigolyuk E. I. Stability of shells. Moscow: Nauka, 1978. 360 p. (in Russian).
- [11] Berdnikov Y. N., Galimkhanov B. K. On one approximate solution of the problem of stability of a cylindrical shell under inhomogeneous transverse pressure // *Strength of structures*. Ufa, 1980. no. 4. P. 58–61. (in Russian).
- [12] Volmir A. S. Stability of deformable systems. Moscow: Fizmatgiz, 1967. 984 p. (in Russian).
- [13] Kononov Y. V. Bending of an infinite cylindrical shell // *Butt. mod. and mechanism*. 1940. Vol. 4, no. 5–6. P. 35–54. (in Russian).
- [14] Fedorova T. G. Experimental and theoretical study of elastic-plastic deformation, loss of stability and supercritical behavior of cylindrical shells with a loose filler during bending: monograph. Cheboksary: Publishing House “Medium”, 2018. 184 p. (in Russian).
- [15] Computer complex “Dynamics-3”. Certification passport of the software. Scientific and technical center for nuclear and radiation safety. Registration passport of certification of PS No. 325 from 18.04.2013. (in Russian).
- [16] Petrov M. V., Gonik E. G. Calculation of the limit state of thin-walled cylindrical shells at bending filled with loose material // *Bulletin of the Chuvash state pedagogical University named I. Yakovlev*. Series: Mechanics of the limit state. 2019. no. 2(40). P. 117–127. (in Russian).