Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева
Серия: Механика предельного состояния. 2019. № 4 (42). С. 111–118

Т. Г. Рытова

К ВОПРОСУ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫХ ТОНОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

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

Аннотация. Разработана программа испытаний потери устойчивости заполненных сыпучим материалом тонкостенных замкнутых предварительно напряженных цилиндрических оболочек. Проработан алгоритм создания предварительного напряжения горизонтальных цилиндрических оболочек.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, автоцистерна, сыпучий заполнитель, устойчивость, предварительное напряжение, программа испытаний.

DOI: 10.26293/chgpu.2019.42.4.012

УДК: 539.3

Введение и обзор. Предварительное напряжение в конструкциях позволяет уменьшить расход материала, стоимость самих конструкций и их изготовления при полном удовлетворении эксплуатационных требований. Способы создания предварительного напряжения в вертикальных цилиндрических резервуарах приведены в работе Белени Е. И. [1]. Технически возможно создание предварительного напряжения в цилиндрической оболочке обмоткой высокопрочной проволокой или лентой с данным напряжением. В работе [1] приводятся единичные примеры обмотки цилиндрических аппаратов высокопрочной проволокой. Но не разработана методика создания предварительного напряжения для горизонтальных цилиндрических резервуарах.

Экспериментальные исследования проводились Беленя Е. И., Астряб С. М., Рамазановым Э. Б., Степкиным С. А., основные результаты изложены в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. В основном испытывались вертикальные цилиндрические оболочки для нефтегазовой отрасли, работающие под давлением.

В работах [8, 9, 10] изложены аналитические, численные и экспериментальные методы исследований динамической потери устойчивости предварительно нагруженных стальных труб.

© Рытова Т. Г., 2019
Рытова Татьяна Георгиевна
e-mail: tanusha2884@mail.ru, кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия.

Поступила 15.09.2019

В работах M. Zeinoddini [11, 12, 13] рассмотрено поведение предварительно загруженных стальных труб, подвергнутых ударным воздействиям. Автором разработана программа испытаний стальных труб длиной до 2 м на комбинацию предварительных статических нагружений и последующих динамических воздействий. Граничные условия назначены так, что образцы ограничены от поворота, но могут свободно перемещаться вдоль своей оси. Груз весом 15–50 кг, свободно перемещающийся по установке в вертикальном направлении, ударяется в середине образца, падение груза происходит со скоростью 7 м/с. В тестовых задачах авторы скорость и массу падающего груза оставляли неизменной, изменяли предварительное нагружение образцов. В испытаниях при первых падениях груза труба восстанавливала первоначальную форму, образец оставался устойчивым. При упругих реакциях при соударении груз отскакивал от образца, поднимаясь на определенную высоту, и снова повторно воздействовал на трубу при падении. Фиксировались остаточные деформации. Отмечается хорошая согласованность численных результатов с экспериментами (расхождение численного и экспериментального значений критической нагрузки составляет 6%). В результате исследований автор доказал применимость расчетной модели трубы для последующего численного исследования образцов с другими геометрическими параметрами.

В статьях [14, 15] разработан новый вариант метода конечных элементов для расчета осесимметричных колебаний упругих ортотропных оболочек вращения, частично заполненных жидкостью, с учетом дискретного подкрепления оболочек шпангоутами и предварительного статического напряжено-деформированного состояния.

В настоящее время наиболее подробно исследованы задачи о напряженно-деформированном состоянии и потери устойчивости цилиндрических оболочек, без учета влияния заполнителя на потерю устойчивости, частично освещен вопрос об устойчивости цилиндрической оболочки с заполнителем. Комплексный экспериментально-теоретический анализ, численные исследования в полном объеме предварительно напряженных горизонтальных тонкостенных цилиндрических оболочек практически отсутствуют.

Развитие автомобильных перевозок сыпучих материалов, обладающих малой плотностью (цемент, мука, зерно и т.д.), требует совершенствования конструкций полуприцепов-цистерн, которые должны стать надежным средствам для транспортировки бестарных грузов по дорогам 1–3 категорий условий эксплуатации. Для повышения эффективности перевозки сыпучих материалов автомобильная промышленность стремится освоить производство опрокидываемых при разгрузке тонкостенных большегабаритных цистерн, представляющих собой комбинацию цилиндрической и полусферических оболочек в стальном или алюминиевом исполнении. Конструкция цистерны должна быть безопасной в эксплуатации, экономичной и по возможности обладать минимальной трудоемкостью в изготовлении.

Планируемый рост объемов транспортировки сыпучих материалов требует увеличения габаритов автоцистерн с соблюдением условия максимальной грузоподъемности при минимальной металлоемкости. Это возможно при создании предварительно-напряженных корпусов автоцистерн. Данный вопрос еще мало изучен и на производстве не имелось аналогов данных цистерн.

При рациональном выборе геометрических параметров цистерны одной из главных задач является расчет конструкции на устойчивость. В настоящее время данная проблема до конца не изучена. Большое влияние на величину критической нагрузки играют возмущающие факторы, такие как начальные несовершенства формы оболочки,

условий нагружения, условия крепления обмотки и т.д., которые трудно поддаются учету.

Для исследования устойчивости предварительно-напряженной замкнутой тонкостенной цилиндрической оболочки, заполненной сыпучим материалом, при изгибе необходимы разработка и верификация на экспериментальных данных математической модели, алгоритма решения и программного обеспечения, которые будут соответствовать современному уровню компьютерного моделирования. Расчет предварительно-напряженных цилиндрических оболочек, наполненных сыпучим материалом, трудоемок и сложен.

1. Практические аспекты создания предварительно-напряженных тонкостенных цилиндрических оболочек. Для повышения надежности несущих конструкций необходимо применять вероятностные методы. Предварительное напряжение цилиндрических тонкостенных оболочек может создаваться различными способами, такими как обмоткой цилиндрической оболочки высокопрочной проволокой или лентой, стягиванием бандажами для повышения несущей способности. При выборе способа создания предварительного напряжения необходимо оценить степень надежности каждого способа.

В работах [16], M. Alrsai et al. [17], S. Gong et al. [18], Z. Jiexin et al. [19], F. Wang [20], F.-C. Wang et al. [21], J. Zheng et al. [22] представлены результаты испытаний конструкций PIP с одинаковыми внутренними и разными наружными трубами. Замечено, что геометрические и деформационные свойства наружной трубы влияют на предельную нагрузку внутренней трубы. Предложены эмпирические выражения для оценки предельной нагрузки внутренней трубы. Используемые в морских платформах колонны, состоящие из двух вложенных друг в друга цилиндрических стальных труб, пространство между которыми заполнено бетоном (Concrete Filled Double Skin Steel Tube — CFDST), обладают определенными преимуществами по сравнению с классическими аналогами — трубой, заполненной бетоном (Concrete Filled Steel Tube — CFST) [23]. Трехслойные композитные оболочки CFDST используются также в подводных трубопроводах [24]. Проведены параметрические исследования влияния прочности внешней и внутренней оболочек, бетона и отношения пустот на характеристики сжатия и изгиба композитных трубопроводов, подвергаемых воздействию давления. Показано, что наличие внутренней трубы повышает устойчивость композитной оболочки.

В строительстве предварительное напряжение используется в инвентарных обсадных трубах при устройстве буронабивных свай. Что также подтверждает актуальность вопроса создания предварительно-напряженных труб с целью увеличения несущей способности и уменьшения массы конструкций.

Проанализировав используемые в морских платформах двойные цилиндрические стальные трубы, а также в обсадных трубах при создании буронабивных свай, можно проработать новый вариант создания предварительного напряжения. При использовании конструкций из двух вложенных друг в друга цилиндрических стальных труб при нагреве диаметр внешней трубы увеличивается, насаживается на внутреннюю трубу, при остывании происходит обжатие внутренней трубы.

2. Метод испытания на устойчивость предварительно-напряженных горизонтальных тонкостенных цилиндрических оболочек с заполнителем. Для опытного образца, описанного в работе Федоровой Т. Г. [25], создается предварительное напряжение нижеизложенными способами.

1. При помощи высокопрочной предварительно растянутой обмотки перераспределяются усилия в конструкции, при этом для разгрузки внутренний более тонкий слоя изготавливаем из менее прочного материала. Для автоцистерны применяем алюминиевый сплав, как и в цистернах без предварительного напряжения. Предварительное напряжение, созданное усилием натяжения проволоки, назначается исходя из условия одновременного достижения напряжениями в стенке и обмотке расчетных сопротивлений при полном заполнении сыпучим материалом оболочки, и из условия создания минимального предварительного напряжения с точки зрения обеспечения устойчивости оболочки без дополнительных средств. Навивка производится в окружном направлении или по спирали под углом к продольной оси оболочки, витки наматываются вплотную друг к другу и размещают с определенным шагом.

2. При помощи кольцевой многослойной обмотки профилированной высокопрочной лентой методом Ширенбека [1]. Производят предварительный нагрев профилированной ленты до 700° с быстрым охлаждением после укладки.

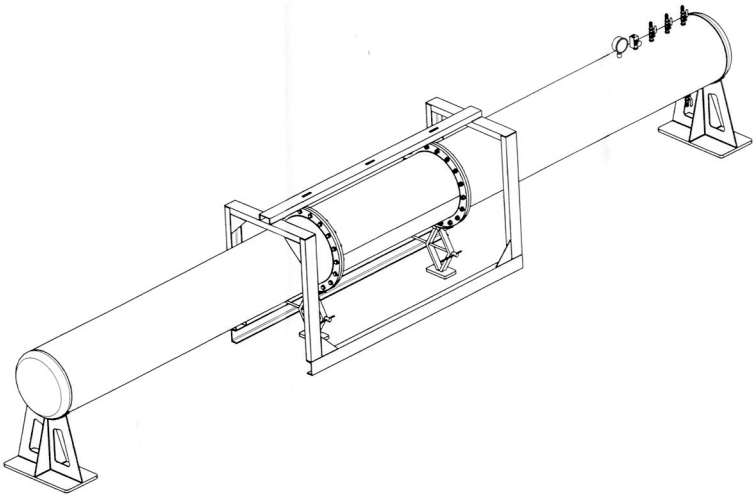

Рис. 1. Экспериментальная установка

Задача экспериментальных исследований — определение форм потери устойчивости, изменение формы поперечного сечения в процессе деформирования, определение величины критической нагрузки и перемещений предварительно-напряженного образца, измерение деформаций.

Программа испытания состоит из следующих этапов:

— выбор образца, визуальный осмотр начальных несовершенств;

— измерение начальных геометрических размеров образца, нанесение рисок на его рабочей поверхности;

— навивка образца с постоянным по длине оболочки контролируемым усилием натяжения и одинаковым шагом витков;

— наклеивание тензорезисторов на наружную поверхность образца в верхней и нижней точке в предполагаемом месте потери устойчивости в осевом и кольцевом направлениях;

— заполнение образца металлическим порошком объемом, заданным экспериментом;

— настройка измерительного оборудования;

— подключение тензорезисторов к измерителю деформаций;

— нагружение образца — первая шаговая нагрузка;

— измерение показаний тензорезисторов прибором ИДЦ-1 и Теремом-4;

— измерение перемещение нагружаемого торца образца индикатором часового типа ИЧ-10;

— измерение диаметров в осевом и кольцевом направлениях электронным штангенциркулем в фиксированных сечениях по длине образца;

— измерение меридиональных и кольцевых деформаций;

— дальнейшее пошаговое увеличение вертикальной нагрузки на образец и повторение всех вышеприведенных измерений; фиксация деформированной формы образца при потери устойчивости;

— дальнейшее нагружение вертикальной силой с целью изучения закритического поведения образца до общей потери устойчивости образца.

После проведения экспериментов выполнить статистическую обработку.

По изложенной выше методике будут проведены следующие испытания:

— опытный образец без заполнителя;

— опытный образец, заполненный железным порошком;

— опытный образец, заполненный железным порошком, подверженный внутреннему давлению.

Заключение. Разработана программа испытаний потери устойчивости тонкостенной предварительно-напряженной цилиндрической оболочки, заполненной сыпучим материалом. Прописаны способы создания предварительного напряжения тонкостенных горизонтальных цилиндрических оболочек. По разработанной программе будут выполнены экспериментальные исследования в научной лаборатории НИУ МГСУ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Беленя Е. И. Предварительно-напряженные металлические листовые конструкции. Москва: Стройиздат, 1979. 192 с.

[2] Астряб С. М. Исследование прочности тонкостенных предварительно-напряженных цилиндрических оболочек, работающих под равномерным внутренним давлением // Тр. III Международной конференции по предварительно-напряженным металлическим конструкциям. Москва, 1971. Т. 1.

[3] Астряб С. М. Экспериментальные исследования устойчивости тонкостенного кольца, усиленного натянутой гибкой нитью // Изв. ВУЗов. Сер. Строительство и архитектура. 1968. № 2.

[4] Беленя Е. И., Сафарян М. К., Рамазанов Э. Б. Экспериментальные исследования предварительно-напряженного стального резервуара // Экспрессинформация Мингазпрома. Москва, 1968. № 23.

[5] Рамазанов Э. Б. Устойчивость предварительно-напряженных цилиндрических металлических оболочек // Тр. III Международной конференции по предварительно-напряженным металлическим конструкциям. Москва, 1971. Т. 1.

[6] Росато Д. В., Грове К. С. Намотка стеклонитью. Развитие метода, производство, области применения и конструирования. Москва, 1969.

[7] Степкин С. А. Устойчивость тонкостенного цилиндра, обжатого гибкой напряженной обмоткой // Сборник трудов ЛИИЖТ. Ленинград, 1964. Т. 229.

[8] Harding J. E., Onoufriou T. Behaviour of ring-stiffened cylindrical members amaged by local denting // J. Construct Steel Res. 1995. no. 33(3). P. 237–257.

[9] Ricles J. M., Bruin M. W. Evaluation of analysis methods for response prediction of ent-damaged tubular steel bracing members // In: 30th International offshore technology Conference. Houston, Texas, 4–7 May 1998. Richardson, Texas, 1998. Vol. 2: Pattern & marine system design. OTC 8735. P. 215–228.
[10] Walker A. C., McCall S. Experimental investigation of damaged stiffened cylindrical shells // J. Thin-Walled Struct. 1998. no. 30(1–4). P. 79–94.
[11] Zeinoddini M., Harding J. E., Parke G. A. R. Dynamic behaviour of axially pre-loaded tubular steel members of offshore structures subjected to impact damage // J. Ocean Eng. 1999. no. 26. P. 963–978.
[12] Zeinoddini M., Harding J. E., Parke G. A. R. Effect of impact damage on the capacity of tubular steel members of offshore structures // J. Mar. Struct. 1998. no. 11(4–5). P. 141–158.
[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. no. 27(6). P. 669–690.
[14] Шклярчук Ф. Н., Рей Ч. Расчет осесимметричных колебаний оболочек вращения с жидкостью методом конечных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 9, № 5. С. 197–204.
[15] Шклярчук Ф. Н., Рей Ч. Расчет неосесимметричных колебаний оболочек вращения с жидкостью методом конечных элементов // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20, № 2. С. 49–58.
[16] Гоник Е. Г. Экспериментальный и теоретический анализ изгиба и упругопластического выпучивания тонкостенных цилиндрических оболочек с сыпучим наполнителем: дисс. ... канд. техн. наук. Н.Новгород, 2019.
[17] Alrsai M., Karampour H., Albermani F. On collapse of the inner pipe of a pipe-in-pipe system under external pressure // Engineering Structures. 2018. Vol. 172. P. 614–628.
[18] Buckle propagation of sandwich pipes under external pressure / S. Gong, X. Wang, T. Zhang et al. // Engineering Structures. 2018. Vol. 175. P. 339–354.
[19] Jiexin Z., Palmer A., Brunning P. Overtrawlability and mechanical damage of pipe-in-pipe // J. of Applied Mechanics, Transactions ASME. 2014. Vol. 81, no. 3. Art. no. 031006.
[20] Wang F. Effective design of submarine pipe-in-pipe using Finite Element Analysis // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 23–32.
[21] Wang F.-C., Li W., Han L.-H. Interaction behavior between outer pipe and liner within offshore lined pipeline under axial compression // Ocean Engineering. 2019. Vol. 175. P. 103–112.
[22] Indentation and external pressure on subsea single wall pipe and pipe-in-pipe / J. Zheng, A. Palmer, P. Brunning et al. // Ocean Engineering. 2014. Vol. 83. P. 125–132.
[23] Ekmekyapar T., Hasan H. G. The influence of the inner steel tube on the compression behaviour of the concrete filled double skin steel tube (CFDST) columns // Marine Structures. 2019. Vol. 66. P. 197–212.
[24] Wang F.-C., Han L.-H. Analytical behavior of carbon steel-concrete-stainless steel double-skin tube (DST) used in submarine pipeline structure // Marine Structures. 2019. Vol. 63. P. 99–116.
[25] Федорова Т. Г. Экспериментально-теоретическое исследование упругопластического деформирования, потери устойчивости и закритического поведения цилиндрических оболочек с сыпучим заполнителем при изгибе: монография. Чебоксары: ИД “Среда”, 2018. 184 с.

T. G. Rytova

ON THE ISSUE OF LOSS OF STABILITY OF PRE-STRESSED THIN-WALLED CYLINDRICAL SHELLS

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

Abstract. A program of stability loss tests for thin-walled closed prestressed cylindrical shells filled with bulk material has been developed. An algorithm for creating a prestress of horizontal cylindrical shells is developed.

Keywords: cylindrical shell, tank truck, bulk filler, stability, pre-stress, test program.

REFERENCES

[1] Belenja E. I. Pre-strained sheet metal design. Moscow: Stroizdat, 1979. 192 p. (in Russian).

[2] Astriab S. M. Study of the strength of thin-walled pre-stressed cylindrical shells working under uniform internal pressure // Proceedings of the III International conference on pre-stressed metal structures. Moscow, 1971. Vol. 1. (in Russian).

[3] Astriab S. M. Experimental studies of the stability of a thin-walled ring reinforced with a stretched flexible thread // Izv. higher educational. Ser. Construction and architecture. 1968. no. 2. (in Russian).

[4] Belena E. I., Safarian M. K., Ramazanov E. B. Experimental study of pre-tensioned steel tank // Expressinform of the Ministry of gas industry. 1968. no. 23. (in Russian).

[5] Ramazanov E. B. Stability of pre-stressed cylindrical metal shells // Proceedings of the III International conference on pre-stressed metal structures. Moscow, 1971. Vol. 1. (in Russian).

[6] Rosato D. V., Grove K. S. Winding the vitreous. Development of the method, production, application and design. Moscow, 1969. (in Russian).

[7] Stepkin S. A. Stability of a thin-walled cylinder compressed by a flexible stressed winding // Proceedings of LIIZHT. Leningrad, 1964. Vol. 229. (in Russian).

[8] Harding J. E., Onoufriou T. Behaviour of ring-stiffened cylindrical members amaged by local denting // J. Construct Steel Res. 1995. no. 33(3). P. 237–257.

[9] Ricles J. M., Bruin M. W. Evaluation of analysis methods for response prediction of ent-damaged tubular steel bracing members // In: 30th International offshore technology Conference. Houston, Texas, 4–7 May 1998. Richardson, Texas, 1998. Vol. 2: Pattern & marine system design. OTC 8735. P. 215–228.

[10] Walker A. C., McCall S. Experimental investigation of damaged stiffened cylindrical shells // J. Thin-Walled Struct. 1998. no. 30(1–4). P. 79–94.

[11] Zeinoddini M., Harding J. E., Parke G. A. R. Dynamic behaviour of axially pre-loaded tubular steel members of offshore structures subjected to impact damage // J. Ocean Eng. 1999. no. 26. P. 963–978.

[12] Zeinoddini M., Harding J. E., Parke G. A. R. Effect of impact damage on the capacity of tubular steel members of offshore structures // J. Mar. Struct. 1998. no. 11(4–5). P. 141–158.

[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. no. 27(6). P. 669–690.

[14] Shklyarchuk F. N., Ray C. Calculation of axisymmetric oscillations of shells of rotation with a liquid by the finite element method // Bulletin of the Moscow aviation Institute. 2012. Vol. 9, no. 5. P. 197–204. (in Russian).

[15] Shklyarchuk F. N., Ray C. Calculation of non-axisymmetric vibrations of shells of revolution with liquid by finite element method // Bulletin of Moscow aviation Institute. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 49–58. (in Russian).

[16] Gonik E. G. Experimental and theoretical analysis of bending and elastic-plastic bulging of thin-walled cylindrical shells with loose filler: Thesis for the title of candidate of technical Sciences. N. Novgorod, 2019. (in Russian).

[17] Alrsai M., Karampour H., Albermani F. On collapse of the inner pipe of a pipe-in-pipe system under external pressure // Engineering Structures. 2018. Vol. 172. P. 614–628.

[18] Buckle propagation of sandwich pipes under external pressure / S. Gong, X. Wang, T. Zhang et al. // Engineering Structures. 2018. Vol. 175. P. 339–354.

[19] Jiexin Z., Palmer A., Brunning P. Overtrawlability and mechanical damage of pipe-in-pipe // J. of Applied Mechanics, Transactions ASME. 2014. Vol. 81, no. 3. Art. no. 031006.

[20] Wang F. Effective design of submarine pipe-in-pipe using Finite Element Analysis // Ocean Engineering. 2018. Vol. 153. P. 23–32.

[21] Wang F.-C., Li W., Han L.-H. Interaction behavior between outer pipe and liner within offshore lined pipeline under axial compression // Ocean Engineering. 2019. Vol. 175. P. 103–112.

[22] Indentation and external pressure on subsea single wall pipe and pipe-in-pipe / J. Zheng, A. Palmer, P. Brunning et al. // Ocean Engineering. 2014. Vol. 83. P. 125–132.

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

[23] Ekmekyapar T., Hasan H. G. The influence of the inner steel tube on the compression behaviour of the concrete filled double skin steel tube (CFDST) columns // Marine Structures. 2019. Vol. 66. P. 197–212.

[24] Wang F.-C., Han L.-H. Analytical behavior of carbon steel-concrete-stainless steel double-skin tube (DST) used in submarine pipeline structure // Marine Structures. 2019. Vol. 63. P. 99–116.

[25] 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).