

Устойчивость стенки цилиндрического зернохранилища сжатого силами трения зерна и нагрузкой от крыши

Т.М. Чапаев, А.Б. Балкизов, А.С. Сасиков, Ж.Х. Шогенова, Е.А. Кушаева

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, Нальчик

Аннотация: В статье рассматривается устойчивость стенки стального цилиндрического предварительно напряженного зернохранилища, сжатого силами трения зерна и оболочки с учетом влияния внутреннего давления зерна, его упругого отпора изнутри и упругого отпора предварительно напряженной оболочки снаружи. При этом начальный и докритический прогиб оболочки принимается осесимметричным, а потеря устойчивости оболочки происходит с образованием несимметричного прогиба. Приведенное решение задачи позволяет определять величину критических усилий с учетом влияния внутреннего давления зерна, его упругого отпора, величины начальных прогибов и соотношения размеров оболочки.

Ключевые слова: расчет устойчивости, устойчивость стенки, предварительное напряжение, внутреннее боковое давление, упругий отпор, цилиндрическое зернохранилище, сила трения зерна, нагрузка от крыши.

Задаче прочности цилиндрических зернохранилищ посвящено много работ, в которых имеются практические рекомендации по расчету на прочность корпусов таких хранилищ.

Решение устойчивости стенки цилиндрического зернохранилища, сжатого силами трения зерна и нагрузкой от крыши, предложенное в [1-3], позволяет определить критическое напряжение с учетом основных влияющих факторов. Однако это решение предназначено для весьма коротких оболочек $L / R \leq 1$.

Решение, учитывающее влияние основных факторов на устойчивость цилиндрической оболочки зернохранилища приведено в работе [4]. Для оценки стабилизирующего влияния засыпки на устойчивость стен зернохранилища постановка задачи в работе [5] дополнена учетом упругого основания, односторонне взаимодействующего с зернохранилищем. В качестве расчетных нагрузок по устойчивости рассматривается оболочка с погибью, обращенной внутрь зернохранилища, по прочности – наружу. В

первом случае, по аналогии с [6], реализуется наименьшая критическая нагрузка, во втором – максимальные фибровые напряжения.

Следует отметить, что в приведенных выше решениях рассмотрена устойчивость стенки спирально навивочного зернохранилища в пределах наиболее нагруженной обечайки.

Экспериментальные исследования на моделях устойчивости спирально-навивных зернохранилищ затруднено трудностями соблюдения подобия между реальным зернохранилищем и моделью в виду наличия реальных зернохранилищах фальцовочного спирального стока.

Поэтому ниже приведены результаты наблюдений за работой натуральных спирально-навивных зернохранилищ.

В работе [7] приведены результаты экспериментального исследования спирально-навивного зернохранилища диаметром 6 м и высотой 11 м выполненного из алюминиевого сплава АМг 2-1/4 Н, фундамент – из железобетона. Толщина стенки – 2,8 мм.

Начальные несовершенства оболочки, измеренные перед испытанием составляли $\pm 1,25t$ (где t – толщина стенки).

Поверхность стенки по вертикали между фальцами имела форму синусоиды с высотой полуволны $1,6t$.

При засыпке зерна в зернохранилище и при его выгрузке потери устойчивости или исчерпание несущей способности в другом виде не наблюдалось.

В работе [6] отмечено, что натурные экспериментальные исследования алюминиевых зернохранилищ спирально-навивного типа, у которых $R/t = 1070$ и величина начального искривления $f_0 \approx t$. Многократно загружались зерном и в процессе испытаний, случаев выпучивания стенки не наблюдалось.

В работе [8] приведены результаты обследования зернохранилищ диаметром 18 м с высотой стенки 15 м и толщиной листа 4 мм в нижней зоне. С внутренней стороны стенка была подкреплена стойками из швеллера №14 высотой 2 и 4 м, располагаемыми с шагом 2 м.

При использовании ленты разной толщины в процессе возведения стен возникает необходимость переналадки профилирующих и фальцеобразующих машин, что снижает качество швов в зонах, примыкающих к месту стыкования ленты разной толщины. Это обуславливает использование в процессе навивки лишь части рулона, что не выполняется, и высота зоны с заданной толщиной не выдерживается. Во многих зернохранилищах обнаружено уменьшение, по сравнению с проектом толщины листа в нижней наиболее напряженной зоне стен. При этом внутренние стойки, являющиеся концентраторами напряжений, устанавливаются различной длины, значительно отличающейся от проектной, что еще более усиливает концентрацию напряжений в отдельных местах оболочки.

Известно несколько видов деформации металлических зернохранилищ, носящих характер местных повреждений, смятие стен в местах опирания их на фундамент наблюдается в случае неравномерных осадок фундаментов, вследствие чего появляется концентрация напряжений в отдельных зонах стен.

Другим примером служит местное выпучивание стенки между фальцевыми ребрами, как правило, на высоте нескольких метров от дна в зоне над внутренними вертикальными подкрепляющими ребрами, имеющими высоту 2÷5 м. Выпучивание происходит при полном загрузении зернохранилища зерном, замедленно – в течение нескольких часов и сопровождается соответствующим уменьшением высоты зернохранилища. Причины этих деформаций, наряду с выше указанными, обусловлены выгибом стенки между фальцами, возникающими при навивке.

Возникающие при этом эксцентриситеты приложения вертикальных сжимающих сил и зоны концентрации напряжений над стойками, приводят к тому, что напряжения в листе в этих зонах существенно превышают средние напряжения сжатия и достигают предела текучести стали. Это приводит к постепенному выпучиванию листа наружу, замедляющемуся по мере обжатия зерна, попавшего в возникшую складку оболочки и препятствующего развитию прогиба. Такое выпучивание условно называют потерей устойчивости.

Случаи потери устойчивости наблюдаются в стальных цилиндрических зернохранилищах. Наиболее существенные причины потери устойчивости – это погиби, возникшие при изготовлении, транспортировании и возведении стен зернохранилищ, а также уменьшение поддерживающего влияния зерна при его истечении при внецентренном выпуске вблизи стенки.

Результаты экспериментальных исследований устойчивости металлических зернохранилищ на моделях приведены в работе [9]. Модели оболочек изготавливались из медной, латунной и стальной лент толщиной $0,05 \div 0,10$ мм, диаметром от 18 до 48 см. В качестве сыпучего материала для заполнения моделей оболочек применялись мелкий песок и манная крупа. Деформативные свойства сыпучих материалов определялись в тонкостенном цилиндре при трехосном напряженном состоянии. По результатам испытаний были получены зависимости модулей деформаций сыпучих материалов от их напряженного состояния.

Испытания моделей зернохранилищ на устойчивость проводились в следующей последовательности. В оболочку 1 (см. рис. 1), жестко соединенную с металлическим диском 2, на определенную высоту H , засыпался песок или манная крупа. На поверхность сыпучего материала укладывался диск или резиновая камера и через них на сыпучий материал прикладывалась нагрузка p . В результате действия сил трения сыпучего

материала о стенку оболочки в ней возникали сжимающие продольные усилия, которые с увеличением нагрузки на сыпучий материал достигали критической величины и приводили к потере устойчивости. Пригрузка сыпучего материала производилась ступенями. Кольцевые и продольные напряжения в моделях определялись по деформациям с помощью тензорезисторов прибором ЦТМ-3. Всего было испытано 50 оболочек с различным $R/t = 1150 \div 3000$ при различных уровнях засыпки модели. С увеличением высоты засыпки величина пригрузки, при которой происходила потеря устойчивости оболочки, уменьшалась. Изменение величины пригрузки оказывало существенное влияние на величину модуля сыпучего материала.

Поэтому изменение высоты засыпки оболочки позволило исследовать влияние деформативных свойств сыпучего материала на величину критических напряжений и на форму потери устойчивости оболочки.

Результаты экспериментальных исследований оболочек на устойчивость показали, что упругий отпор сыпучего материала оказывает существенное влияние на повышение критических напряжений и на форму потери устойчивости оболочки. Величины критических напряжений в оболочках с сыпучим материалом могут быть в 5 и более раз больше критических напряжений в оболочках без сыпучего материала.

В работе [9] отмечается, что чем выше модуль деформации сыпучего материала и отношение R/t , тем лучше экспериментальные данные совпадают с имеющимися теоретическими данными, полученными для оболочек с упругим наполнителем. С увеличением модуля деформации сыпучего материала увеличивается значение критических напряжений, а неосесимметричная форма потери устойчивости сменяется осесимметричной.

В результате в работе [9] делается вывод о необходимости учета внутреннего давления зерна и его упругого отпора при расчете устойчивости

металлических зернохранилищ. Следует отметить, что верхние кромки экспериментальных моделей не закреплены, поэтому это должно было приводить к тому, что происходит изгибная форма потери устойчивости без изменений и сдвигов в середине поверхности оболочки. Поэтому можно сделать вывод, о том, что параметры моделей не соответствовали оболочке реального зернохранилища, у которой верхняя часть кромки стенки закреплена опорным контуром.

На рис. 1 кривые (3) получены по результатам работы [1-2] при $\xi_0 = f_0/t = 1,0$ и $\xi_0 = 2,0$ оказываются значительно ниже кривых 1, полученных по действующим нормативам (СП 16.13330.2011). Кривые 2, построенные по результатам работы [5] при $\xi_0 = 0,5$ и $\xi_0 = 1,0$, несколько выше, чем кривые 1. Однако при больших значениях ξ_0 результаты будут ниже этой кривой, что обусловлено той же причиной.

Сравнение имеющихся экспериментальных и теоретических данных полученных в работах указанных выше приведено на рис. 1.

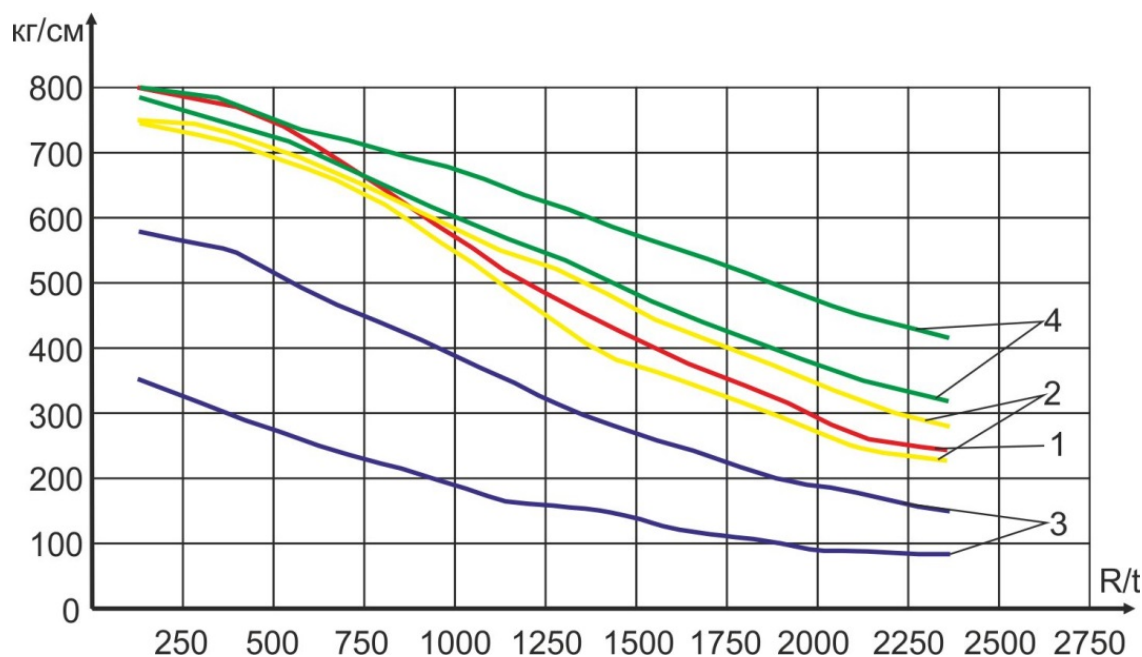


Рисунок 1 – Зависимость критических напряжений от гибкости оболочки R/t и величины относительного начального прогиба $\xi_0 = f_0/t$.

Работа [6] дает результаты, кривые 4, при $\xi_0 = 1,0$ и $\xi_0 = 2,0$ выше, чем действующие нормы. Учет упругого отпора зерна наряду с внутренним давлением в работе [6] дает более высокие результаты, чем действующие нормы. Однако, это решение пригодно только для весьма коротких оболочек.

Анализ результатов исследований приведенных показывает необходимость дополнительных экспериментальных исследований устойчивости стенки цилиндрического зернохранилища сжатого силами трения зерна и нагрузкой от крыши.

Литература

1. Хасанов М.М., Чапаев Т.М., Амшоков Б.Х. Устойчивость стенки стального силоса при осесимметричном выпучивании и начальном искривлении оболочки, направленном внутрь // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4944.
2. Чапаев Т.М., Хасанов М.М., Амшоков Б.Х. Устойчивость стенки стального силоса при осесимметричном выпучивании и начальном искривлении оболочки, направленном наружу // Инженерный вестник Дона, 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5056.
3. Чапаев Т.М., Балкизов А.Б., Сасиков А.С., Шогенова Ж.Х., Кушаева Е.А. Анализ известных теоретических и экспериментальных исследований устойчивости стенки цилиндрического зернохранилища // Инженерный вестник Дона, 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5292.
4. Гейзен Р.Е., Игудисман О.С. О методах расчета местной устойчивости и напряженно деформированного состояния спирально навивных силосов // Проблемы строительства зернохранилищ резервуарного типа. М., 1985, №11, с. 40-43.
5. Гейзен Р.Е. Местная устойчивость и прочность спирально навивных

- силосов // Строительная механика и расчет сооружений. М., 1986, №2. с. 34-37.
6. Гольденберг Л.И. Устойчивость круговых цилиндрических оболочек силосов // Строительная механика и расчет сооружений. М., 1985, №1, с. 60-64.
7. Шендеров А.Р. Об учете податливости наружных стен круговых концентрических силосов // Строительная механика и расчет сооружений. М., 1988, №2, с. 15-18.
8. Таран З.Д., Стулов Т.Т., Афанасьев В.А. Стальные резервуары с предварительно напряженной стенкой // Нефтяное хозяйство. М., 1967, №6, с. 50-54.
9. Еремин А.П. Экспериментальное исследование устойчивости металлических силосов на моделях // Проблемы строительства зернохранилищ резервуарного типа. М., 1991, с. 47-52.
10. Беленя Е.И., Сафарян М.К., Рамазанов Э.Б. Экспериментальные исследования предварительно напряженного стального резервуара // Экспресс-информация Мингазпрома, М., 1968, №23, 8 с.
11. Литвинов В.В., Языев Б.М., Бескопыльный А.Н. Устойчивость круговой цилиндрической оболочки при равномерном внешнем давлении // Инженерный вестник Дона, 2011, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704.
12. Fung Y., Sechler E. Buckling of thin walled circular cylinders under axial compression and internal pressure. Aeronaut. Sci. 1957, №5, pp. 24-30.
13. Massolani F., Ramasanov E. Ricerca sperimentale sulla stabilita dei recipienti con avvolgimento sotto pressione esterna // Costruzioni Metalliche, 1980, №4, pp. 187-199.

References

1. Khasanov M.M., Chapaev T.M., Amshokov B.Kh. Inženernyj vestnik Dona
-



- (Rus), 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4944.
2. Chapaev T.M., Khasanov M.M., Amshokov B.Kh. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5056.
 3. Chapaev T.M., Balkizov A.B., Sasikov A.S., Shogenova Zh.Kh., Kushaeva E.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5292.
 4. Geyjzen R.E., Igudisman O.S. Problemih stroiteljstva zernokhranilith rezervuarnogo tipa. M., 1985, №11, pp. 40-43.
 5. Geyjzen R.E. Stroiteljnaya mekhanika i raschet sooruzheniyj. M., 1986, №2, pp. 34-37.
 6. Goljdenberg L.I. Stroiteljnaya mekhanika i raschet sooruzheniyj. M., 1985, №1, pp. 60-64.
 7. Shenderov A.R. Stroiteljnaya mekhanika i raschet sooruzheniyj. M., 1988, №2, pp. 15-18.
 8. Taran Z.D., Stulov T.T., Afanasjev V.A. Neftyanoe khozyayjstvo. M., 1967, №6, pp. 50-54.
 9. Eremin A.P. Problemih stroiteljstva zernokhranilith rezervuarnogo tipa. M., 1991, pp. 47-52.
 10. Belenya E.I., Safaryan M.K., Ramazanov Eh.B. Ehkspress-informaciya Mingazproma, M., 1968, №23, 8 p.
 11. Litvinov V.V., Yazihev B.M., Beskopihljnihyj A.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2011, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704.
 12. Fung Y., Sechler E. Aeronaut. Sci. 1957, №5, pp. 24-30.
 13. Massolani F., Ramasanov E. Costruzioni Metalliche, 1980, №4, pp. 187-199.
-