

## Устойчивость стенки стального силоса при осесимметричном выпучивании и начальном искривлении оболочки, направленном наружу

*Т.М. Чапаев, М.М. Хасанов, Б.Х. Амиоков*

*Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет, Нальчик*

**Аннотация:** Рассматривается способ расчета на устойчивость стенки стального спирально-навивного силоса при осесимметричном выпучивании под действием внутреннего давления зерна. Конструкция силоса состоит из сглаженных через фальцы коротких цилиндрических оболочек, имеющих начальные искривления, направленные наружу. Получено решение для определения критических напряжений коротких оболочек. **Ключевые слова:** стальной силос, стенка спирально-навивного силоса, осесимметричное выпучивание, начальное искривление оболочки, внутреннее боковое давление, упругий отпор зерна, сила трения зерна.

При расчете на устойчивость стенки силоса учитывается как внутреннее давление зерна, так и его упругий отпор. Рассмотрим способ расчета на устойчивость стенки спирально-навивного силоса, которая состоит сочлененных через фальцы коротких цилиндрических оболочек. Исследуем одну из наиболее нагруженных оболочек, представляющих собой цилиндрическую оболочку с длиной равной шагу фальцевых ребер.

Принимается осесимметричная форма потери устойчивости оболочки, совпадающая с формой начальных прогибов.

Рассматриваются два варианта:

- 1) выпучивание, при котором искривление оболочки направлено внутрь[1];
- 2) выпучивание, при котором искривление оболочки направлено наружу.

С точки зрения потери устойчивости оба варианта, в данном случае, опасны. В первом случае (прогибы внутрь) начальные искривления вызывают окружные сжимающие усилия, которые ускоряют потерю устойчивости оболочки. При этом условия работы оболочки улучшаются

---

вследствие ее совместной работы с заполнителем, который изнутри оказывает на оболочку стабилизирующее воздействие.

Во втором случае, при прогибах наружу (бочкообразность) в оболочке возникают растягивающие кольцевые напряжения, обусловленные прогибом оболочки и внутренним давлением, которые повышают устойчивость оболочки. Однако, в данной расчетной системе, отсутствует влияние упругого заполнителя. Из приведенных рассуждений делается вывод о необходимости расчета устойчивости по двум вариантам.

В данной статье рассматривается вопрос устойчивости стенки стального силоса при осесимметричном выпучивании и начальном искривлении оболочки, направленном наружу.

### **Осесимметричное выпучивание и начальное искривление оболочки стального силоса, направленное наружу**

Предполагая, что упругий заполнитель не оказывает на оболочку подкрепляющего воздействия, считается потеря устойчивости будет происходить в результате осевого сжатия и сжимающих продольных напряжений изгиба, появляющихся в следствие наличия начальной погиби под действием сжимающих сил. Осевое критическое напряжение находится из условия, что в крайних волокнах оболочки возникнут пластические деформации:

$$\sigma_{\epsilon} + \sigma_0 = \sigma_y, \quad (1)$$

где:  $\sigma_{\epsilon}$  – изгибные напряжения в оболочке, вызванные ее прогибом под нагрузкой;  
 $\sigma_0$  – осевое критическое напряжение оболочки без учета стабилизирующего действия окружного растягивающего напряжения;  
 $\sigma_y$  – предел текучести материала оболочки.

Изгибные напряжения в оболочке равны:

$$\sigma_{\epsilon} = \left( \frac{tE}{2(1-\mu_c^2)} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где:  $t$  – толщина оболочки;  
 $E$  – модуль деформации металла;  
 $\mu_c$  – коэффициент Пуассона сыпучей массы.

Принимая  $w$  и  $w_0$  по формуле (2), из уравнения (1) [1] получаем:

$$w = \frac{w_0 \sin \pi x}{l \left( \frac{\sigma_*}{\sigma_0} - 1 \right)^{-1}}, \quad (3)$$

где:  $w$  – радиальное перемещение оболочки;  
 $w_0$  – начальное искривление;  
 $\sigma_0$  – кольцевые сжимающие напряжения;  
 $\sigma_* = \frac{0,605Et}{R}$  – критическое напряжение осевого сжатия идеальной оболочки;  
 $R$  – радиус оболочки.

Подставляя (3) в (2) при  $\nu=0,3$  получаем

$$\sigma_{\epsilon} = \frac{0,5\lambda^2 w_0 t E}{\frac{\sigma_*}{\sigma_0} - 1}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  определяется из формулы (4) [1] при  $K = 0$ .

Подставляя (4) в (1), получаем квадратное уравнение

$$\sigma_0^2 - \sigma_0 (0,5\lambda^2 w_0 t E + \sigma_* + \sigma_y) + \sigma_y \sigma_* = 0, \quad (5)$$

решение которого имеет вид:

$$\sigma_0 = \sigma_y \sigma_* \left\{ \left( 0,25\lambda^2 w_0 t E + 0,5\sigma_* + 0,5\sigma_y \right) + \left[ \left( 0,25\lambda^2 w_0 t E + 0,5\sigma_* + 0,5\sigma_y \right)^2 - \sigma_y \sigma_* \right]^{0,5} \right\}^{-1}. \quad (6)$$

Затем, учитывается стабилизирующее воздействие кольцевых растягивающих напряжений  $\sigma_0^p$ .

Согласно [2] повышение устойчивости в этом случае составляет  $0,19\sigma_0^p$ ,

то есть:

$$\sigma_{кр}^{наруж.} = \sigma_0 + 0,19\sigma_0^p = \sigma_0 + \frac{0,19qR}{t} \text{ или } \sigma_{кр}^{наруж.} = \sigma_0 + \frac{0,229Et}{R}, \quad (7)$$

где:  $q$  – внутреннее давление сыпучего материала.

За расчетное критическое напряжение принимается меньшее из напряжений, определенных по формулам (12) [1] и (7).

Полученное решение позволяет определять критическое напряжение с учетом основных влияющих факторов для коротких оболочек при  $L / R \leq 1$ .

### 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. Y. C. Fung. Buckling of Thin-Walled Circular Cylinders Under Axial Compression and Internal Pressure, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 24, No. 5 (1957), pp. 351-356.
3. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1962, 431 с.
4. Папкович П.Ф. Теория упругости. М.: Оборонгиз, 1939. 640 с.
5. Алфутов Н.А., Балабух Л.И. Энергетический критерий устойчивости упругих тел, не требующий определения начального состояния. «ПММ», 1968, Т. XXXII, вып. I, с. 703-707.
6. Ахтямов А.В. Приближенный метод расчета на устойчивость цилиндрической оболочки силоса // Строительная механика и расчет сооружений. 1989. №1. с.40-43.
7. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М., «Наука», 1967, 984 с.
8. Чапаев Т.М. Определение критических напряжений в оболочках малых гибкостей // Научно-практический журнал «Известия Кабардино-

- Балкарского государственного аграрного университета имени В.М. Кокова». № 1(15), Нальчик, 2017, с.81-90.
9. 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](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704).
10. Литвинов В.В., Языев Б.М., Энергетический метод в форме Тимошенко-Ритца для определения критических сил осевого сжатия круговой цилиндрической оболочки // Инженерный вестник Дона, 2012, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/722](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/722).
11. Karman Th. Tsien H.S. The buckling of thin cylindrical shells under axial compression, J. of the Aeron. Sci 8, №8 (1941), pp.303-312.

### References

1. Khasanov M.M., Chapaev T.M., Amshokov A.Kh. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4944](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4944).
2. Y. C. Fung. Buckling of Thin-Walled Circular Cylinders Under Axial Compression and Internal Pressure, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 24, No. 5 (1957), pp.351-356.
3. Novozhilov V.V. Teoriya tonkikh oboloček [Theory of thin shells]. L.: Sudpromgiz, 1962, 431 p.
4. Papkovich P.F. Teoriya uprugosti [Theory of elastic strength]. M.: Oborongiz, 1939. 640 p.
5. Alfutov N.A., Balabukh L.I. Ehnergeticheskiyj kriteriyj ustojchivosti uprugikh tel, ne trebuyuthiyj opredeleniya nachaljnogo sostoyaniya. «PMM», 1968, Т. KhKhKhII, vihp. I, pp.703-707.
6. Akhtyamov A.V. Stroiteljnaya mekhanika i raschet sooruzheniyj. 1989. №1. pp.40-43.



7. Voljmir A.S. Ustoyjchivostj deformiruemihkh system [Stability of deformable systems]. M., «Nauka», 1967, 984 p.
8. Chapaev T.M. Nauchno-prakticheskiyj zhurnal «Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta imeni V.M. Kokova». № 1(15), Naljchik, 2017, pp.81-90.
9. Litvinov V.V., Yazihev B.M., Beskopihljnihyj A.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704).
10. Litvinov V.V., Yazihev B.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/722](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/722).
11. Karman Th. Tsien H.S. J. of the Aeron. Sci 8, №8 (1941), pp.303-312.