

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ СТЕН СИЛОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

А.С. МАРКОВИЧ, аспирант

Г.Е. ПАНКРАТОВА, канд. техн. наук, проф.

Московский Государственный Строительный Университет

141090, гор. Королев, мкр. Первомайский, ул. Суворова, д.5, madden-06@mail.ru

Повторяющиеся аварии и разрушения силосных сооружений, указывают на несостоятельность существующих методов расчета. В настоящей статье приводится критический анализ известных расчетных моделей стен силосов (расчет как плоской системы, расчет с приближенным учетом пространственной работы, расчет пространственной системы силосных оболочек по методу В.З. Власова). Авторы отмечают необходимость дальнейших экспериментально-теоретических исследований распределения нагрузки в силосах, а также учета в расчетах изменчивости нагрузок и пространственной работы стенок силоса при помощи современных систем компьютерного моделирования.

Ключевые слова: методы расчета силосных сооружений, проектирование силосных сооружений, долговечность конструкций силосных сооружений, аварии и разрушения силосных сооружений

Одними из главных причин преждевременного разрушения конструкций стен железобетонных силосных сооружений являются превышение расчетных величин давлений при загрузке и выгрузке зерна, а также неравномерное распределение нагрузки по высоте и периметру поперечного сечения силоса, приводящее к возникновению малоцикловых деформаций, носящих пульсирующий характер [1].

Долгое время у исследователей и проектировщиков преобладало мнение, что нагрузка от сыпучих материалов на стенки круглых силосов распределяется равномерно по высоте и периметру поперечного сечения силоса. Это обстоятельство давало повод считать, что силосные оболочки находятся в безмоментном напряженно-деформированном состоянии.

В действительности же стенки силосных сооружений испытывают действие изгибающих моментов при загрузке и выгрузке сыпучего материала из силоса вследствие неравномерного распределения давления по периметру стен силосной оболочки и перепадов температур. Для установления характера изменения изгибающих моментов и их влияние на напряженное состояние стенки силоса проводились экспериментальные и теоретические исследования. В первых расчетах [2-6] за расчетную схему стен силосов силосного корпуса принималась система плоских колец, причем уже в этих расчетах делалась попытка учитывать пространственную работу сооружения с теми или иными допущениями. Начиная с 1935 года, производились расчеты силосного корпуса как системы цилиндрических оболочек по теории В. З. Власова.

Расчеты силосных корпусов элеваторов проводились ЦНИИ «Промзерно-проект» совместно с другими институтами.

Исследуя материалы, относящиеся к расчету железобетонных силосных сооружений, можно отметить следующие этапы развития расчетов:

1. расчет силосов как плоской системы колец;
2. расчеты с приближенным учетом пространственной работы;
3. расчеты силосов как системы цилиндрических оболочек (пространственная система) по теории В.З. Власова.

Расчет силосов как плоской системы арок был предложен А.М. Курочкиным в работе [2]. Основные усилия растяжения и сжатия определялись для схемы загрузки круглых силосов. Дополнительные усилия определялись от изгибающих моментов в наружных стенках силосов и стенках звездочки для схемы загрузки только звездочки. При расчете звездочки рассматривалась симметричная группа в четыре силоса. За расчетную схему принималась система плоских четырех колец, жестко соединенных между собой при помощи стыкового элемента. Усилия в наружных и внутренних дугах определялись, как для заземленных арок, методом сил.

Эпюры изгибающих моментов (m) при расчете силосов как системы плоских четырех колец при загрузке звездочки приведены на рисунке 1 для трех случаев сопряжения силосов (a – без влияния стыкового элемента; b – с учетом стыкового элемента, шириной $2m$; b – при шарнирном опирании стенки звездочки). Стоит отметить, что при учете ширины стыкового элемента изгибающие моменты уменьшаются как в наружной, так и во внутренней арках в $2 \dots 2,5$ раза.

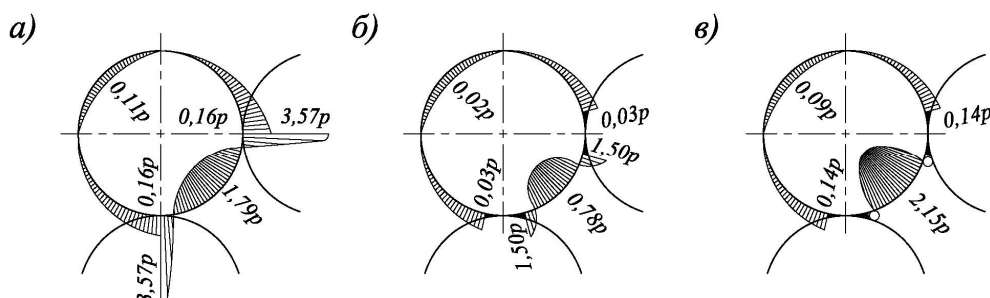


Рис. 1. Эпюры изгибающих моментов (m) при расчете силосов как системы плоских колец (для случая загрузки звездочки)

a – касание смежных колец принято в одной точке; b – с учетом стыкового элемента, шириной $2m$; v – при шарнирном опирании дуг звездочки; p – давление, определяемое по формуле Янсена.

После проведения в 30-х годах XX века опытов в г. Баку, было установлено наличие неравномерности давления зерна в горизонтальной плоскости, особенно резко проявлявшееся при выгрузке сыпучего материала из силоса, на основании этих опытов была предложена эпюра неравномерного давления (рис. 2, a) и приняты следующие аналитические зависимости:

$$p'_s = 0,66 p_s ; \quad p_0 = 0,76 p_s ;$$

где p_s – горизонтальное давление, определяемое по формуле Янсена; p'_s – равномерное давление; p_0 – максимальное неравномерное давление.

В последствие начали появляться исследования, в которых авторы тем или иным способом пытались учитывать в расчетах стен силосных сооружений неравномерный характер распределения давления.

А.М. Курочкин в работе [4] рассматривал плоское кольцо, выделенное двумя горизонтальными сечениями, при этом кольцо делилось на систему арок, заземленных по концам (рис. 2, b). Влияние смещение опор арок, а также влияние пространственной работы оболочки силоса в расчете не учитывалось.

Вследствие недостаточно изученного вопроса распределения давления, неравномерность распределения нагрузки по периметру поперечного сечения силоса исследователи учитывали интуитивно, так в работе [4] нагрузка, действующая на арку, принималась симметричной и изменяющейся по закону

$$p_\alpha = p_0 \sin \alpha .$$

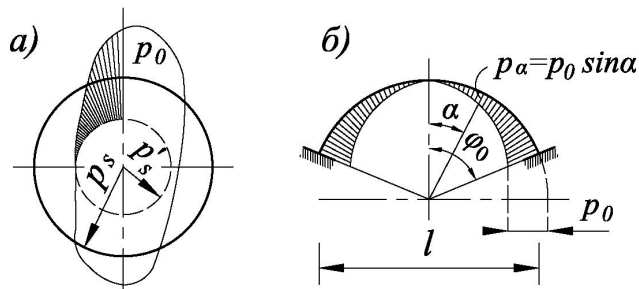


Рис. 2. К расчету силоса как защемленной арки на переменную нагрузку
 а – эпюра неравномерного давления; б – расчетная схема

Усилия в арках определялись методом сил. На рис. 3 показаны эпюры изгибающих моментов в арке для разных значений центрального угла арки:

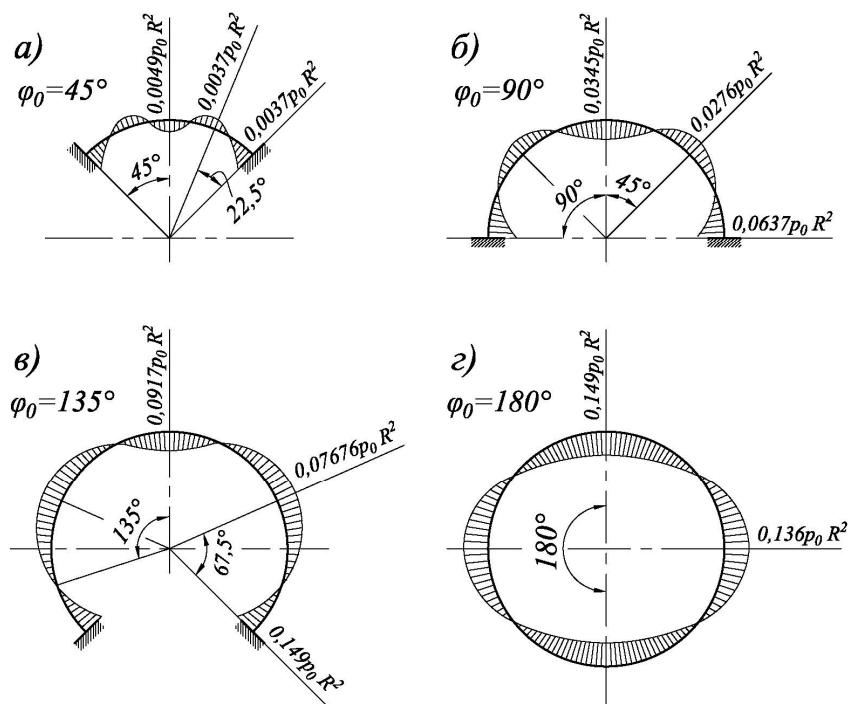


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов
 а – для центрального угла арки $\varphi_0=45^\circ$; б – то же $\varphi_0=90^\circ$;
 в – то же $\varphi_0=135^\circ$; г – то же $\varphi_0=180^\circ$

Пользуясь этими эпюрами можно определить значения изгибающих моментов для любого силоса (углового, наружного, среднего и т.д.), если каждую дугу силоса рассматривать как арку, защемленную в местах пересечения с соседними емкостями.

С приближенным учетом пространственной работы стенок силоса А.М. Курочкиным был выполнен расчет по определению усилий в стенках круглого силоса при его загрузке зерном [3]. Рассматривался средний наружный силос многоярусного корпуса в предположении неподвижности точек соединения соседних силосов между собой. Считалось, что деформации стенок силосов происходили частью за счет деформации дуг AD_1 и D_2B (как в плоской системе) и частью за счет изгиба силоса как вертикальной криволинейной балки (рис. 4, а). Балка предполагалась свободно опертой на концах. Решение задачи сводилось к

определению величины реакции P стыка D_1D_2 , причем считалось, что реакция распределялась равномерно по всей высоте стыка. После нахождения реакции P , определялись изгибающие моменты в стенках силосов.

Для силоса с внутренним диаметром 5,6 м, высотой 25 м и толщиной стенки 16 см эпюра изгибающих моментов показана на рисунке 4, б (в скобках даны величины изгибающих моментов для силоса диаметром 8 м, высотой 30 м и толщиной стенки 18 см).

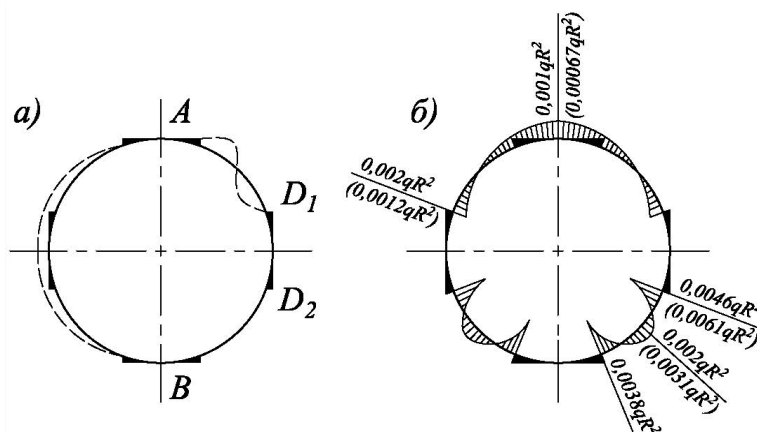


Рис. 4. К расчету силоса с приближенным учетом пространственности
а – схема деформации дуг; б – эпюра изгибающих моментов

В.З. Власовым и сотрудниками было предложено рассматривать силосные корпуса как систему замкнутых тонких цилиндрических оболочек [7, 8]. Расчет такой системы производился с допущением равномерного распределения горизонтального давления по поперечному сечению оболочки, при этом влиянием крутящих и изгибающих моментов в вертикальной плоскости пренебрегали.

В случае загрузки рядового силоса с учетом оговоренных выше допущений, в стенках силоса возникали значительные по величине кольцевые растягивающие усилия при незначительном влиянии остальных силовых факторов.

А.М. Трухловым и сотрудниками разработана методика расчета силосных сооружений на основе модели ортотропной цилиндрической оболочки В.З. Власова [9-11]. В методике А.М. Трухлова система четырех силосов рассматривалась состоящей из незамкнутых цилиндрических оболочек и стыковых элементов. Решение пространственной системы оболочек сводилось к решению плоской системы методом деформаций.

Эпюры изгибающих моментов составлены (рис. 5, б) для случая загрузки силоса в предположении, что горизонтальная нагрузка равномерно распределена по периметру силосной оболочки, а вдоль вертикальной образующей изменяется по закону синуса:

$$p = q \sin \frac{\pi\alpha}{\alpha_0};$$

где $q = \frac{4}{\pi} \frac{\gamma\rho}{f}$; γ – объемный вес зерна; ρ – гидравлический радиус; f – коэффициент трения зерна о стенку силоса; $\alpha_0 = H/R$; H и R – высота и радиус силосной оболочки.

Возникновение изгибающих моментов в данной расчетной модели можно объяснить учетом в расчете жесткости стыковых элементов, отличных от жесткости самих силосных оболочек.

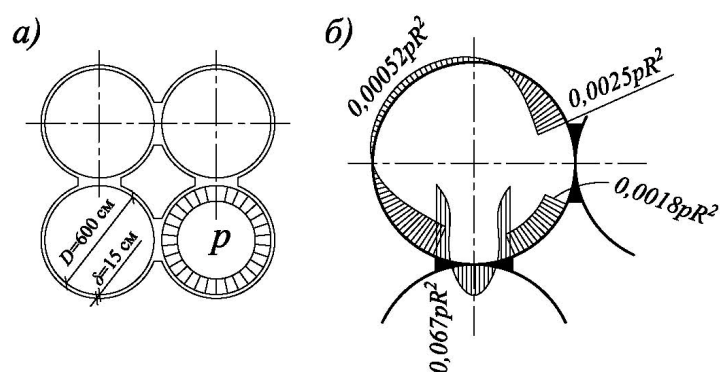


Рис. 5. К расчету силоса на основе модели цилиндрической оболочки согласно теории В.З. Власова

a – схема загрузки силоса; *б* – эпюра изгибающих моментов

Также В.В. Новожилов, С.П. Тимошенко отмечали, что неравномерность нагружения, жесткое сопряжение с соседними силосными оболочками, а также наличие жестких диафрагм в горизонтальной плоскости может стать причиной возникновения значительных по величине изгибающих моментов [12, 13].

В работе [11] А.М. Трухловым был выполнен расчет на неравномерную нагрузку системы четырех силосных сооружений элеватора пониженной высоты. Расчеты производилось для силосных оболочек высотой 14 м и 24,5 м на симметричную неравномерную нагрузку по методу В.З. Власова без учета ширины стыковых элементов.

Нагрузка в продольном направлении принималась меняющейся по закону синуса:

$$q = p \sin \frac{\pi x}{l};$$

а в поперечном направлении – по закону косинуса:

$$p = \frac{p_0}{2}(1 + \cos 2\Theta);$$

где p_0 – давление, вычисленное по формуле Янсена; Θ – центральный угол.

Эпюра изгибающих моментов для случая загрузки всех четырех силосов, показана на рисунке 6, *б*, пунктиром нанесена эпюра изгибающих моментов, полученная при расчете на неравномерную симметричную нагрузку групп четырех силосов как плоской системы без учета ширины стыковых элементов.

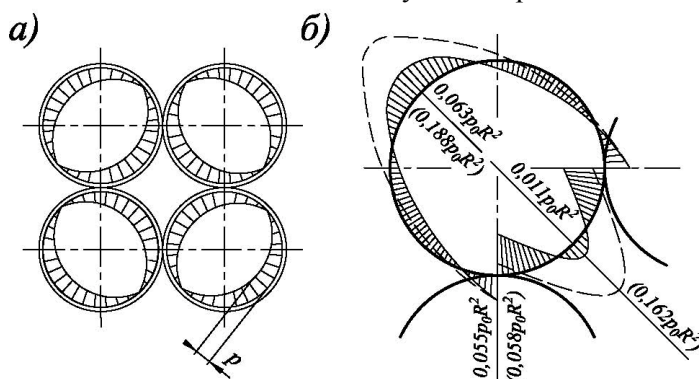


Рис. 6. К расчету силосов на неравномерную симметричную нагрузку согласно теории В.З. Власова

a – расчетная схема; *б* – эпюра изгибающих моментов

В работе [14] система четырех силосов рассчитывалась как ортотропные оболочки методом деформаций, подобно стержневым системам. Изменение нагрузки по периметру стенки принималось по закону косинуса

$$p = p_0 \cos \mu\beta ;$$

где $\mu = \frac{\pi}{2\beta_0} = 0,77897$; β – центральный угол.

При этом нагрузка по высоте силоса изменялась по закону

$$q = p_0 \cos \mu\beta \cdot \chi(\alpha) ;$$

где $\mu = \frac{\pi}{2\beta_0} = 0,77897$; $\chi(\alpha) = \sin \frac{\pi R}{H} \cdot \alpha$.

На рис. 7, б показана эпюра изгибающих моментов при загрузке диаметрально противоположенных оболочек.

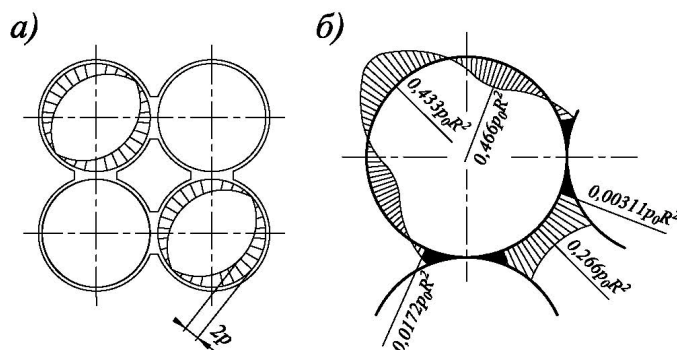


Рис. 7. К расчету силосов на неравномерную симметричную нагрузку согласно теории В.З. Власова при загрузке противоположенных оболочек
а – расчетная схема; б – эпюра изгибающих моментов

Нормы проектирования [15] предлагают учитывать неравномерный характер горизонтального давления по высоте стенки и периметру поперечного сечения круглого силоса дополнительными кольцевыми и локальными давлениями, которые рассматриваются совместно с давлением, определяемым по формуле Янсена. Учет изменчивости горизонтального давления по высоте силосного сооружения производится делением высоты силоса на четыре зоны h_1 , h_2 , h_m и h_3 . При определении горизонтального давления сыпучих материалов на стенки круглых силосов во время заполнения и разгрузки емкостей, а также и в процессе хранения сыпучего неравномерное горизонтальное давление принимается равным сумме равномерно распределенного давления, определяемого по формуле Янсена совместно с дополнительными кольцевыми и локальными давлениями:

$$P_h^n + P_{h1}^n + P_{h2}^n = P_h^n + a_1 P_h^n + a_2 P_h^n ;$$

где P_h^n - равномерно распределенное давление, определяемое по формуле Янсена; P_{h1}^n и P_{h2}^n - дополнительные кольцевое и локальное давления; a_1 и a_2 – коэффициенты местного повышения давления, принимаемые по таблице 1 норм [15].

Кольцевое горизонтальное давление сыпучих материалов на стены круглых силосов принимается равномерно распределенным по всему периметру попе-

речного сечения силоса с высотой зоны кольцевой нагрузки, равной $1/4$ диаметра силоса, при этом локальное горизонтальное давление считается распределенным по двум диаметрально противоположенным площадкам, равным $\pi d/12 \times \pi d/12$ (d – внутренний диаметр силоса).

Нормы проектирования [15] не ограничивают положение зоны кольцевой нагрузки и площадок локального давления по высоте и периметру силосной оболочки, отражая, тем самым, хаотичный характер нагрузки (рис. 8).

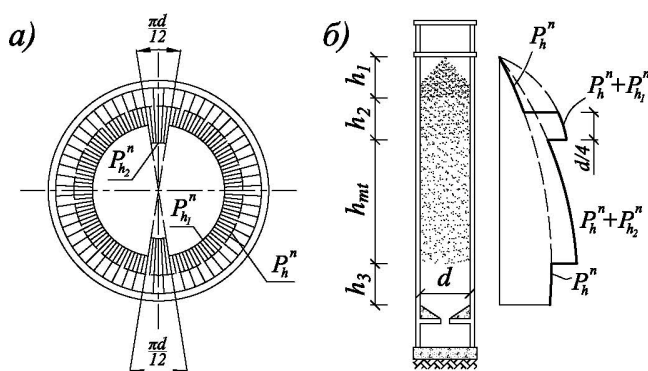


Рис. 8. Расчетная модель силосной оболочки согласно нормам [8]

a – схема распределения давлений по поперечному сечению; *б* – то же по высоте оболочки

Стоит отметить, что нормы [15] предлагают расчет стен силосов на горизонтальную нагрузку от сыпучих материалов выполнять в пределах зон на высотах h_1 , h_2 и h_3 на центральную кольцевую растягивающую силу N , а в пределах зоны h_{mt} – на растягивающую силу N и изгибающий момент M со случайным эксцентриситетом $e_0 = M/N$.

Схема, отражающая изменение во времени неравномерного горизонтального давления сыпучих материалов на стены силосов предполагает, что кратковременная часть горизонтального неравномерного давления составляет 0,7 соответствующих местных повышений давления (кольцевых и локальных), остальная часть неравномерного давления, а также равномерное давление, определяемое по формуле Янсена, рассматривается как длительное.

Выводы:

Представленные в настоящей статье теоретические исследования расчетных моделей стен силосных сооружений позволили сделать следующие выводы.

1. К настоящему времени не известен точный характер распределения давления на стенки силосного сооружения при загрузке и выгрузке сыпучего материала из силоса, причиной этому является хаотический характер поведения сыпучей массы, трудно поддающейся математическому описанию.
2. В теоретических расчетах характер распределения нагрузки на стенки сооружения исследователями и проектировщиками учитывается, в большей степени, интуитивно вследствие ограниченного количества полезных экспериментальных данных. В работах разных авторов распределение горизонтального давления по высоте и периметру поперечного сечения силоса принимается равномерно распределенным, а также изменяющемся по закону синуса или косинуса.
3. Неравномерный характер нагрузки, жесткое сопряжение с соседними силосами, а также наличие жестких горизонтальных диафрагм (надсилосные и подсилосные плиты) являются причиной возникновения значительных изгибающих

моментов, существенно влияющих на напряженно деформированное состояние силосной оболочки.

4. Применяемые к настоящему времени расчетные модели не позволяют полностью учитывать динамический характер нагрузки от сыпучей массы на стенки силоса, а ограничиваются только расчетом стен на выносливость с коэффициентом асимметрии цикла $\rho_s = \rho_b = 0,7 \dots 0,85$.

5. Учет ширины стыкового элемента при расчете силосного корпуса, как системы плоских колец существенно влияет на величину изгибающих моментов в стенках звездочки, при этом моменты, полученные для угловых звездочек, мало отличаются по величине от моментов, полученных для средних наружных звездочек.

6. Сравнение результатов расчета силосов как цилиндрических оболочек с расчетом плоских систем показывает, что значения изгибающих моментов в оболочке высотой 24,5 м составляют примерно 65% от моментов плоской системы, а при высоте оболочки 14 м, – примерно 10%. Таким образом, уменьшение высоты силоса существенно влияет на величину изгибающих моментов. Следовательно, силосы с большим отношением высоты к диаметру, в запас прочности, целесообразно рассматривать как плоские системы.

Не смотря на большое количество экспериментальных и теоретических исследований, до сих пор не существует общепризнанной универсальной расчетной модели стен силосных сооружений.

Различные проектные организации и отдельные исследователи по-разному учитывают динамический характер нагрузки сыпучей массы на стенки силоса. Это факт указывает на необходимость дальнейших экспериментально-теоретических исследований распределения нагрузки на стены сооружения, а также учета в расчетах изменчивости нагрузок и пространственной работы стенок силоса при помощи современных систем компьютерного моделирования.

Л и т е р а т у р а

1. Ковалев А.О., Панкратова Г.Е. Долговечность инженерных силосных сооружений и причины их разрушения: Монография. – М.: МГСУ, 2009. – 178 с.
2. Курочкин. А.М. К расчету железобетонного силосного корпуса / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект». – М., 1935.
3. Курочкин. А.М. К расчету железобетонного силосного корпуса / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект». – М., 1937.
4. Курочкин А.М. Расчет стен силосного корпуса. Влияние внецентренного выпуска зерна на работу стен железобетонных силосов / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект» // Арх. №4925/1. – М., 1939.
5. Пресняков Г.Е., Курочкин А.М. Расчет силосных стен силосного корпуса в г. Рыбинске / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект» // Арх. №121-1-С.
6. Петровский П.М., Курочкин А.М. Расчет силосных стен расширения силосного корпуса в г. Рыбинске / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект» // Арх. №129-1-С-33. – М, 1937.
7. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.–Л.: ГИТЛ, 1949.
8. Власов В.З., Гольденвейзер А.Л., Мроцинский А.К. Исследование работы силосного корпуса как системы цилиндрических тонких оболочек. Тома I, II / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект». – М., 1937
9. Трухлов А.М. Распределение усилий и моментов в стенках железобетонного силосного корпуса зернового элеватора: дис. ... докт. техн. наук. – Саратов, 1957.
10. Осипов М.М., Трухлов А.М. О расчете стенок силосов зернового элеватора // Строительная механика и расчет сооружений, №1, 1963.

11. *Трухлов А.М., Курочкин А.М.* Расчеты системы силосных оболочек (К проекту элеватора пониженной высоты) / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект» // Арх. №5694/12. – М., 1942.

12. *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. – М: Физматгиз, 1963.

13. *Новожилов В.В.* Теория тонких оболочек. – Л: Судпромгиз, 1962.

14. *Трухлов А.М., Гамаюнов В.П., Фомин Г.А., Климов В.В.* Расчет системы цилиндрических оболочек применительно к силосному корпусу элеватора с применением электронно-счетных машин / Библиотека ЦНИИ «Промзернопроект». – Саратов, 1964.

15. *СНиП 2.10.05-85.* Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна. – М. ЦНТП Госстроя СССР 1985. – 23 с.

RESEARCHING OF CALCULATING MODELS OF THE WALLS OF SILO BUILDINGS

A.S. Markovich, G.E. Pankratova

Repeating failures and destructions of silo constructions are the result of inconsistency of existing methods of calculation. The present article gives the critical analysis of known calculated models of silo walls: flat system, system with the approached account of spatial work, spatial system of silo covers on V. Vlasov 's method. Authors mark necessity of further experimentally-theoretical researches of distribution of loading for silos, and also the account in calculations of variability of loadings and spatial work of walls of a silo by means of modern systems of computer modeling.

KEY WORDS: methods of calculation of silo buildings, designing, durability, failures and destructions of silo.

