

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ БУНКЕРОВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Чемодуров В. Т., Литвинова Э. В.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,
Институт «Академия строительства и архитектуры»
295493, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181
Chens_mu1@mail.ru, EllaLit@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен расчет бункера сыпучих материалов при динамических нагрузках. Этот расчет является опорным для оценки прочности конструкции в условиях возможного землетрясения. Показано, что в условиях землетрясений такие конструкции не выдерживают нагрузки, возникающие в процессе колебаний. Применение математических методов дает возможность подобрать как толщину обечайки бункера, так и параметры ребер подкрепления, которые, в совокупности, дают значительный экономический эффект, заключающийся в том, что конструкция выдержит любые колебания, свойственные заданной бальности движения грунта. В настоящее время все большее применение находят методы математического моделирования для выбора таких значений параметров устройств, которые в состоянии обеспечить прочность, устойчивость и долговечность конструкции для самых неблагоприятных условий ее эксплуатации. Необходимо отметить, что расчеты на прочность цилиндрических бункеров сыпучих материалов от воздействия возможных землетрясений (что характерно для Крыма) не проводились. В статье предложен алгоритм расчета на прочность цилиндрического бункера с учетом действия сейсмической нагрузки. Рассматриваются сдвиговые деформации и колебания конструкции для возможных землетрясений вплоть до 9 баллов.

Предмет исследования. Изучение напряженно-деформируемого состояния оболочки бункера при нестационарном динамическом воздействии.

Материалы и методы. Разработка моделей колебательного процесса цилиндрических тонкостенных объектов и их исследование в плане обеспечения прочности и устойчивости. Моделирование колебательных процессов опирается на известные методы, принятые на практике.

Результаты. В результате анализа различных математических моделей колебания баков с сыпучим материалом мы получили перемещения точек системы. Имея эти данные легко определяются внутренние усилия в цилиндрической обечайке при динамических нагрузках.

Выводы. При анализе реакции конструкций, заполненных сыпучим материалом, следует кроме расчета по формам их изгиба как балки с бесконечным числом степеней свободы также учитывать и расчет их местной деформации стенок, влияющей на образование присоединенных масс вмещающей в них жидкости.

Ключевые слова: динамическая прочность цилиндрических бункеров, сейсмические нагрузки, формы колебаний, цилиндрическая обечайка бункера, материальный стержень с бесконечным числом степеней свободы.

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей при проектировании сооружения, конструкции или механизма является выбор его параметров и характеристик, которые должны обеспечить наилучшие показатели его качества (надежность, долговечность, минимальные затраты как на создание, так и в процессе эксплуатации). Сочетание требований по качеству сооружения, его эксплуатационных показателей и, в тоже время, неизбежных ограничений на ресурсы приводит к решению многочисленных вариантов проектируемой конструкции. В настоящее время неизменным инструментом в процессе проектирования сооружений и механизмов выступают методы системного анализа, которые позволяют, в зависимости от потребностей, применять те или иные методы оптимизации для получения «идеального» облика создаваемой конструкции [1].

Как правило в условиях ограниченных ресурсов целевой функцией в процессе исследования выступает масса конструкции, которая практически напрямую влечет за собой стоимость объекта. Добиться минимизации массы конструкции

позволяет строгий инженерный подход к выбору варьируемых (как правило конструктивных) параметров.

Важным при разработке математической модели функционирования любого объекта является выбор функциональных ограничений, как правило, прочностных. При этом прочностные характеристики и их ограничивающие функции впервые будут связаны с возможными сейсмическими нагрузками. Стойкость цилиндрических бункеров к сейсмическим воздействиям в руководящих документах по проектированию таких сооружений отсутствует.

При разработке бункеров для хранения сыпучих веществ и материалов методы оптимизации их параметров не используются [2]. Расчеты проводятся согласно расписанным инструкциям только на статическую нагрузку, в которой фиксируются возможные ее значения. В настоящее время все большее применение находят методы математического моделирования для выбора таких значений параметров устройств, которые в состоянии обеспечить прочность, устойчивость и долговечность конструкции для самых неблагоприятных условий ее эксплуатации.

Необходимо отметить, что расчеты на прочность цилиндрических бункеров сыпучих материалов от воздействия возможных землетрясений (что характерно для Крыма) не проводились.

В статье предложен алгоритм расчета на прочность цилиндрического бункера с учетом действия сейсмической нагрузки. Рассматриваются сдвиговые деформации и колебания заполненной конструкции при возможных землетрясениях вплоть до 9 баллов.

Цель исследования – разработка математического аппарата для выбора оптимальных параметров конструкции бункера сыпучих материалов, отвечающего требованиям прочности и устойчивости при наличии динамических нагрузок. При этом анализу подлежит только цилиндрическая обечайка бункера.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

В [2] при проектировании строительной части силосов для расчета прочности и жесткости конструкции, а также для определения необходимости расчета стен на выносивость и многократное повторение нагрузок, на температурные воздействия, для учета абразивности и агрессивности сыпучего материала следует указывать:

а) удельный вес (плотность), угол внутреннего трения и коэффициент трения сыпучего материала о материал стены; вместимость силосов;

б) характеристику режима эксплуатации силосов (число, частоту и продолжительность циклов загрузки и разгрузки);

в) температуру сыпучего материала во время его загрузки и выгрузки из силоса, а также коэффициент теплопроводности и теплоемкость;

г) модуль сжатия и коэффициент Пуассона сыпучего материала;

д) степень абразивности и агрессивности сыпучего материала.

Свод правил [3] устанавливает правила проектирования и распространяется на стальные вертикальные цилиндрические силосы для хранения сыпучих продуктов объемом до 30000 м³ с плоским днищем на фундаменте и до 2000 м³ с плоским и коническим днищем на опорной конструкции, не устанавливает требований к проектированию стальных вертикальных цилиндрических силосов для районов с повышенной сейсмической активностью.

В [4] проведен анализ известных теоретических и экспериментальных исследований задачи устойчивости тонколистовых оболочек цилиндрических бункер. Рассмотрены вопросы: устойчивости стенки спирально-навивного зернобункера и цилиндрического зернобункера с гладкой стенкой, сжатой силами трения зерна и нагрузкой от крыши; устойчивости стенки цилиндрической оболочки емкостей для жидких и сыпучих материалов при создании в них предварительного напряжения.

В [5] отражены основные понятия процесса функционирования емкостей стационарного типа. Рассматриваемым вопросам посвящены работы таких специалистов, как Богомяких В.А., Боуманс Г., Буренин П.Д., Варламов А.В., Горюшинский В.С., Гячев Л.В., Дженике Э.В., Зенков Р.Л., Рогинский Г.А., Степанов А.Л., Третьяков Г.М. и др.

Для различных конструктивных элементов и моделей методы могут быть различными. Правильный выбор модели и метода оптимизации являются залогом эффективности получения оптимального решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из всего многообразия принятых в теории колебаний математических моделей для изучения динамики сдвиговых процессов выберем классический способ, основанный на колебании стержня с распределенной по его массе. Сопrotивляемость сдвиговым деформациям определяется прочностными характеристиками материала и моментом инерции сечения бункера (то есть его формы в плане).

Из всего многообразия возможных динамических нагрузок, действующих на строительные конструкции, в данной статье основной упор сделан на нагрузки, которые могут возникнуть в результате сдвиговых деформаций поверхности земли в процессе землетрясения.

Любое сооружение нужно рассматривать как связанный с грунтом физический объект, который во время землетрясения находится в неинерциальной системе координат под воздействием всей совокупности внешних и внутренних сил и сил инерции, появляющихся в этой системе. Реакция сооружения на воздействия определяется реальными геофизическими условиями и свойствами конкретного объекта. Они и определяют фактическую сейсмостойкость сооружения [7-8].

Наиболее важным при динамических расчетах в условиях сейсмике является определение возмущающей нагрузки. В настоящее время широкое распространение получили нагрузки в виде импульсов, которыми аппроксимируют записи реальных колебаний грунта [9]. Примем в качестве внешнего воздействия на исследуемый объект импульс Берлаге, который описывается уравнением

$$J = Ft = A_b t e^{-ct} \sin(2\pi\omega t). \quad (1)$$

Здесь: A_b , c и ω – коэффициенты, определяемые характером и интенсивностью землетрясения. Исходя из принятого импульса внешнего воздействия, определим поперечную силу, приложенную к изучаемому объекту

$$F = A_b e^{-ct} \sin(2\pi\omega t) = m_s \frac{d^2 y_0}{dt^2} = Q. \quad (2)$$

Здесь m_s – суммарная масса бака с сыпучим наполнителем, y_0 –перемещение грунта вместе с объектом.

Коэффициент A_b зависит от ряда переменных факторов. Его можно подобрать, руководствуясь выражением (1), интегрируя горизонтальные перемещения основания рассматриваемой конструкции

$$\frac{d^2 y_0}{dt^2} = \frac{A_b}{m_s} e^{-ct} \text{Sin}(2\pi\omega t). \quad (3)$$

При решении уравнения (3) необходимо руководствоваться данными таблицы 1.

Таблица 1. Максимумы колебаний поверхности земли, соответствующие интенсивности землетрясений
Table 1. Ground surface vibration maxima corresponding to earthquake intensity

Интенсивность в баллах	Ускорение грунта (м/с ²)	Скорость колебаний грунта (м/с)	Смещение маятника сейсмографа (мм)
6	0,3 – 0,6	0,03 – 0,06	1,5 – 3,0
7	0,6 – 1,2	0,06 – 0,12	3,0 – 6,0
8	1,2 – 2,4	0,12 – 0,24	6,0 – 12,0
9	2,4 – 4,8	0,24 – 0,48	12,0 – 24,0

Считаем, что вместе с грунтом происходит движение основания конструкции. При этом (за счет инерционных сил) возникают колебания объекта исследования. При определении колебательного движения конструкции по ее высоте целесообразно принять ее модель в виде стержня с распределенной массой. Такая система имеет бесконечное число степеней свободы.

Рассмотрим модель потери устойчивости оболочки цилиндрического резервуара в упругой области его деформаций [10-11].

Из практики известно, что наиболее точное решения задачи о колебании упругих систем можно получить, если рассматривать сооружение с непрерывно распределенными по длине конструкции массами. Бункера сыпучих грузов неплохо вписываются в данную категорию сооружений, которые не имеют по своей длине точечных нагрузок. В этом случае бункер (в виде цилиндрического бака) рассматривается как система, нагруженная бесконечно малыми массами, равномерно распределенными по высоте резервуара. В соответствие с этим примем конструкцию цилиндрического бункера в виде материального стержня с бесконечным числом степеней свободы. Действительно, такая схема наиболее удачно имитирует бак с полностью нагруженным объемом сыпучим наполнителем. Его сопротивляемость на изгиб определяется моментом инерции поперечного сечения. Естественно, чем больше радиус обечайки бункера, тем меньше оказываются напряжения в его оболочке.

Известно, что, упругое тело с распределенными массами по его длине имеет неограниченное число степеней свободы, то есть неограниченное число перемещений точек конструкции. Следовательно, колебание конструкции такого тела представляет собой сумму неограниченного числа простых гармонических колебаний (главных колебаний). При этом, каждое главное колебание характеризуется своей формой, периодом колебаний и наличием узлов, то есть таких точек, которые остаются неподвижными в процессе колебаний.

Форма колебания с наименьшим числом узлов соответствует колебанию первого тона и имеет наименьшую частоту. Последующие формы колебаний тела с распределенной массой характерны тем, что увеличивается частота их колебаний, а влияние на общие перемещения точек тела резко снижается. Поэтому часто при практических расчетах ограничиваются тремя формами главных колебаний.

Форму главного колебания представляют в виде функции координат точек тела. Эту функцию представляют таким образом, чтобы перемещение какой-либо точки равнялось единице. Эту точку называют точкой приведения. Ее перемещение принимают в качестве обобщенной координаты. С этой точкой связывают приведенные массы, жесткости и силы.

Общий порядок динамического расчета тел, моделируемых в виде балок [6, 13].

1. Устанавливается степень точности принятия решения для заданной конструкции.

2. Выбирается вид перемещения точек балки: поперечные, продольные или крутильные. На практике эти колебания рассматриваются раздельно.

3. Определяются функции форм колебаний f_n и соответствующих им частот и периодов λ_n, τ_n . Необходимо удостовериться в отсутствие резонанса.

4. Вычисляются вынужденные колебания при каждой форме f_n .

5. Находят максимальные значения суммарных вынужденных колебаний.

Пусть f_n известны. Одну из точек на балке принимают за точку приведения. Перемещение этой точки равно единице и является обобщенной координатой. Для нее находят приведенные параметры: массы, жесткости и приведенной силы:

$$m_{np} = \int_0^l m_0 f_n^2 dx,$$

$$C_{\text{прп}} = EJ \int_0^l (f_n^{II})^2 dx,$$

$$\Phi_{\text{прп}} = F \int_0^l f_n dx.$$

Частота колебаний и период каждой формы колебаний определяются по формулам:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{C_{\text{прп}}}{m_{\text{пр}}}}, \quad \tau_n = 2\pi \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{C_{\text{прп}}}}.$$

Для точного решения задачи о колебаниях упругих систем необходимо рассматривать сооружение с непрерывно распределенными по длине сооружения массами [6, 12].

Представим цилиндрический бак с сыпучим наполнителем в виде стержня с равномерно распределенной массой по его длине и жестким креплением на одном конце (рисунок 1).

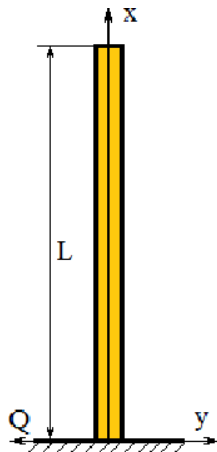


Рис. 1. Схема модели цилиндрической обечайки бункера с распределенной по ее высоте массой

Fig. 1. Diagram of the model of the cylindrical shell of the bunker with the mass distributed over its height

Дифференциальное уравнение равновесия стержня постоянного сечения имеет вид

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x). \quad (4)$$

Здесь: E – модуль упругости материала цилиндрического бака; J – его момент инерции. Ось x является вертикальной осью цилиндрического бака; ось y – поперечная ось; $F(x)$ – интенсивность внешней нагрузки по длине бака. Рассматривается нагрузка, меняющаяся во времени. В этом случае учтем силу инерции $m_0 \ddot{y}$ (m_0 – погонная масса). Тогда уравнение (4) примет вид

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = F(x) - m_0 \ddot{y}.$$

При свободных колебаниях бака $F(x) = 0$, тогда

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) дополним граничными условиями конкретной конструктивной схемы:

$$\left. \begin{aligned} \text{При } x = 0: \quad & y = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0; \\ \text{при } x = l: \quad & \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Начальные условия обычно принимаются нулевыми. Уравнение (5) решается методом разделения переменных. Представим

$$y(x, t) = q(t) \cdot f(x). \quad (7)$$

Подстановка (7) в (5) дает следующий результат

$$\frac{EJ}{m_0} \frac{f^{IV}}{f} = -\frac{\ddot{q}}{q} = \lambda^2 \quad (8)$$

Левая часть равенства (8) зависит только от координаты x , правая – от времени. λ^2 – постоянная величина. Уравнение (8) запишем в виде двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{q} + \lambda^2 q &= 0, \\ \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} - \frac{\lambda^2 m_0}{EJ} f &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Первое уравнение (9) – уравнение свободных колебаний системы с одной степенью свободы, определяющее простые гармонические колебания с частотой λ . Второе уравнение (9) определяет форму свободных колебаний f , соответствующую частоте λ .

Обозначим множитель

$$\frac{\lambda^2 m_0}{EJ} = \beta^4,$$

тогда будем иметь

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} - \beta^4 f = 0. \quad (10)$$

Решение уравнения (10) имеет вид

$$f(x) = C_1 \cdot \sin(\beta x) + C_2 \cdot \cos(\beta x) + C_3 \cdot \text{sh}(\beta x) + C_4 \cdot \text{ch}(\beta x). \quad (11)$$

Так как упругие тела с распределенной массой имеют неограниченное число степеней свободы, то есть неограниченное число возможных перемещений точек системы, то в этом случае колебательное движение упругого тела представляет собой неограниченную сумму простых гармонических (главных) колебаний

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} (q_n \cdot f_n).$$

Каждое главное колебание характеризуется своей формой и периодом колебаний. Как показывает практика, с ростом числа n влияние главных колебаний на общее состояние упругой

системы резко уменьшается. Иногда даже ограничиваются одной первой формой колебания.

Запишем уравнение (11) для n -ой формы

$$f_n(x) = \sin(\beta_n x) + C_2 \cos(\beta_n x) + C_3 \operatorname{sh}(\beta_n x) + C_4 \operatorname{ch}(\beta_n x).$$

Для определения постоянных коэффициентов используем граничные условия (6). Получим следующую зависимость:

$$f_n(x) = \left. \begin{aligned} & \frac{(\operatorname{sh}(\beta_n l) + \sin(\beta_n l))(\operatorname{ch}(\beta_n x) - \cos(\beta_n x))}{\operatorname{ch}(\beta_n x) + \cos(\beta_n x)} - \\ & - \frac{(\operatorname{ch}(\beta_n l) + \cos(\beta_n l))(\operatorname{sh}(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))}{\operatorname{ch}(\beta_n x) + \cos(\beta_n x)}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Выберем точку приведения на свободном конце стержня. В этой точке $f_n(x) = 1$. Для этого разделим уравнение (12) на $f_n(\beta_n l)$. Получим:

$$f_n(x) = \left. \begin{aligned} & \frac{(\operatorname{sh}(\beta_n l) + \sin(\beta_n l))(\operatorname{ch}(\beta_n x) - \cos(\beta_n x))}{2(\operatorname{ch}(\beta_n l) \cdot \sin(\beta_n l) - \operatorname{sh}(\beta_n l) \cdot \cos(\beta_n l))} - \\ & - \frac{(\operatorname{ch}(\beta_n l) + \cos(\beta_n l))(\operatorname{sh}(\beta_n x) - \sin(\beta_n x))}{2(\operatorname{ch}(\beta_n l) \cdot \sin(\beta_n l) - \operatorname{sh}(\beta_n l) \cdot \cos(\beta_n l))}. \end{aligned} \right\}$$

Уравнение частоты рассматриваемой схемы имеет вид

$$\operatorname{ch}(\beta_n l) \cdot \cos(\beta_n l) = -1.$$

Корни этого уравнения (для первых трех форм колебаний):

$$\beta_1 l = a_1 = 1,88; \beta_2 l = a_2 = 4,69; \beta_3 l = a_3 = 7,85.$$

Теперь легко получить основные параметры колебаний: частоты собственных колебаний, приведенные массы, жесткости и внешнее воздействие. В дальнейшем ограничимся первыми тремя формами колебаний системы.

Теперь вообще решение колебания упругой системы с распределенной массой можно записать в виде

$$y = \sum_{n=1}^3 y_n(x, t) = \sum_{n=1}^3 q_n(t) f_n(x).$$

Перемещения $q_n(t)$ находятся из решения уравнения

$$m_{\text{пр}} \cdot \ddot{q}_n + C_{\text{пр}n} \cdot q_n = \Phi_{\text{пр}n}.$$

Рассмотрим бункер, имеющий высоту $H = 10$ м, диаметр $D = 5$ м, площадь основания $A = 19,6$ м², внутренний объем $W = 196$ м³. Осевой момент инерции бункера зависит от толщины его стенки (δ) и определяется по формуле:

$$J = 0,05D^4 \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right), \quad \text{где } d = D - 2,0 * \delta.$$

Определимся с массовыми характеристиками бункера. Удельная плотность корпуса бункера $\rho_k = 7870$ кг/м³, плотность насыпного материала $\rho_n = 700$ кг/м³. В этом случае погонная масса внутреннего наполнителя бункера $m_{\text{но}} = \rho_n * A =$

колебаний. При этом первый коэффициент приведем к единице

13720 кг/м. Погонная масса обечайки бункера будет существенно зависеть от ее толщины. Площадь поперечного сечения кольца

$$A_k = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \approx \pi D \delta.$$

Поэтому $m_{k0} = \rho_k A_k \approx \rho_k \pi D \delta$ кг/м. Суммарная погонная масса системы $m_{s0} = m_{k0} + m_{\text{но}}$.

Для первых трех форм колебаний:

$$\Phi_{\text{пр}1} = 0,412Fl; \Phi_{\text{пр}2} = 0,173Fl; \Phi_{\text{пр}3} = 0,142Fl.$$

Рассмотрим задачу анализа прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки. При изгибе цилиндрической оболочки в ней возникают:

– радиальные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{M}{\pi r^2 \delta_0}. \quad (13)$$

– кольцевые напряжения

$$\sigma_2 = \frac{g \rho l r}{\delta_0}.$$

Доминирующими являются радиальные напряжения.

При динамическом расчете определяется максимальное поперечное перемещение выбранной модели бака с материалом u_{max} и рассчитывается изгибающий момент

$$M = \frac{3EJ u_{\text{max}}}{l^2}. \quad (14)$$

После подстановки выражения (14) в (13) получим условие прочности цилиндрической обечайки

$$\sigma_1 = \frac{3EJy_{max}}{\pi l^2 r^2 \delta_0} \leq [\sigma].$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Результат расчета реакции цилиндрического бака с сыпучим наполнителем, с равномерно распределенными по длине сооружения массами, на сейсмическое воздействие показан на рисунке 2. На данном рисунке представлена тенденция изгиба оболочки цилиндрического бака при его колебании

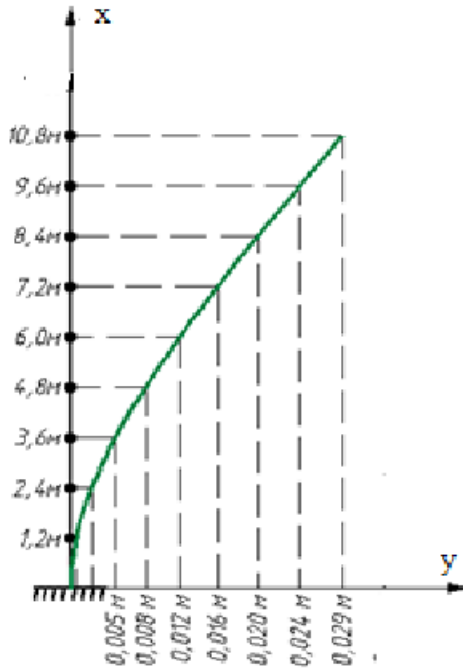


Рис. 2. Реакция цилиндрического бака с сыпучим наполнителем на сейсмическое воздействие
Fig. 2. Reaction of cylindrical tank with loose filler to seismic impact

На рисунке 3 графически показано изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины. Как видно, что внешнее воздействие движения земной поверхности приводят к внутренним усилиям, которые не превышают критические значения для стальных оболочек, у которых допускаемые напряжения равны $[\sigma] = 160$ (МПа).

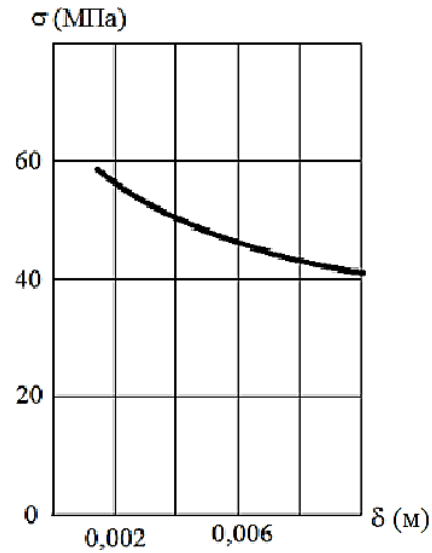


Рис. 3. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (6 баллов)
Fig. 3. Variation of internal stress in the shell depending on its thickness (6 points)

Таблица 2. Параметры прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки 6 баллов при $A_b = 88500$ Н, $\ddot{y} = 0,45$ м/с².

Table 2. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 6 points at $A_b = 88500$ Н, $\ddot{y} = 0,45$ м/с².

δ (м)	J (м ⁴)	ms_0 (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,001	0,05	13800	29	183	513	0,00431	66,0
0,002	0,10	14000	41	259	726	0,00365	55,8
0,003	0,15	14100	51	317	889	0,00335	51,2
0,004	0,20	14200	58	366	1030	0,00317	48,5
0,005	0,25	14300	66	409	1150	0,00304	46,4
0,006	0,30	14500	72	448	1260	0,00294	44,8
0,007	0,35	14600	77	483	1350	0,00284	43,3
0,008	0,40	14700	83	517	1450	0,00276	42,1
0,009	0,45	14800	88	548	1540	0,00269	41,0
0,010	0,50	15000	92	578	1620	0,00262	39,9

Таблица 3. Параметры прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки 7 баллов при $A_b = 177000$ Н, $\ddot{y} = 0,9$ м/с².

Table 3. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 7 points at $A_b = 177000$ Н, $\ddot{y} = 0,9$ м/с².

δ (м)	J (м ⁴)	ms_0 (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,001	0,05	13800	29	183	513	0,00863	132,0
0,002	0,10	14000	41	259	726	0,00729	112,0
0,003	0,15	14100	51	317	889	0,00670	102,0
0,004	0,20	14200	58	366	1030	0,00634	97,0
0,005	0,25	14300	66	409	1150	0,00609	92,7
0,006	0,30	14500	72	448	1260	0,00587	89,5
0,007	0,35	14600	77	483	1350	0,00569	86,6
0,008	0,40	14700	83	517	1450	0,00553	84,1
0,009	0,45	14800	88	548	1540	0,00538	81,9
0,010	0,50	15000	92	578	1620	0,00525	79,8

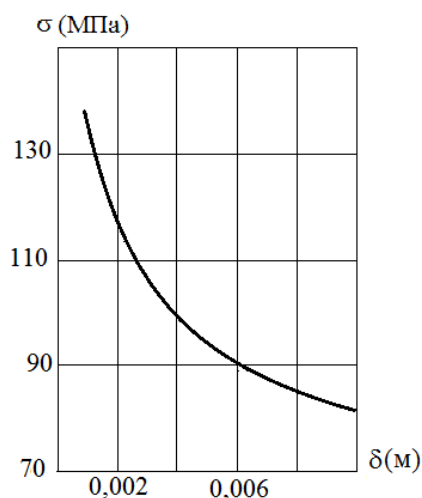


Рис. 4. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (7 баллов)

Fig. 4. Change of internal stress in the shell depending on its thickness (7 points)

Как видно, для перечисленных толщин обечайки бака напряжения в ней не превосходят допустимые значения.

Таблица 4. Параметры прочности цилиндрической обечайки под действием сейсмической нагрузки 8 баллов при $A_b = 354000$ Н, $\ddot{y} = 1,8$ м/с².

Table 4. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 7 points at $A_b = 354000$ Н, $\ddot{y} = 1,8$ м/с².

δ (м)	J (м ⁴)	ms_0 (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,005	0,25	14300	66	409	1150	0,0122	186
0,006	0,30	14500	72	448	1260	0,0117	179
0,007	0,35	14600	77	483	1350	0,0114	174
0,008	0,40	14700	83	517	1450	0,0110	169
0,009	0,45	14800	88	548	1540	0,0108	164
0,010	0,50	15000	92	578	1620	0,0105	160
0,011	0,55	15100	98	608	1700	0,0102	157
0,012	0,60	15200	101	631	1770	0,0099	152
0,013	0,65	15300	104	652	1830	0,0096	147
0,014	0,70	15400	108	676	1900	0,0094	144
0,015	0,75	15600	112	696	1950	0,0092	140

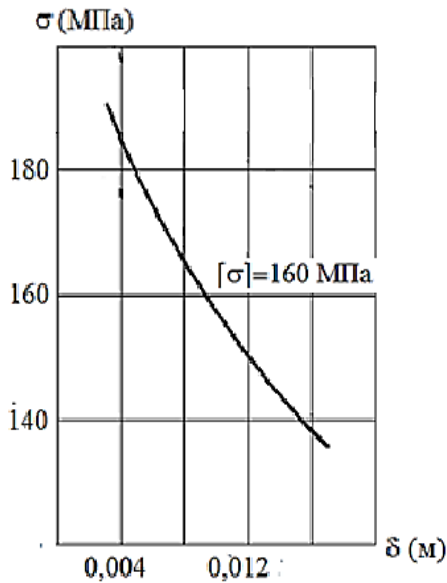


Рис. 5. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (8 баллов)
Fig. 5. Change of internal stress in the shell depending on its thickness (8 points)

Анализ прочности оболочки при восьмибалльном землетрясении показывает, что в ее конструкции напряжения превышают допустимые значения. Это говорит о том, что в данных условиях силосы для хранения сыпучих материалов (обычно изготавливаемых толщиной в 4 мм) однозначно

будут разрушены. Как видно из таблицы 4 и рисунка 5, минимальная безопасная толщина оболочки должна составлять не менее 10 мм.

Рассматриваем ситуацию, когда землетрясение достигает значения в 9 баллов (это практически экстремальный вариант). Все результаты представлены в таблице 5 и на рисунке 12.

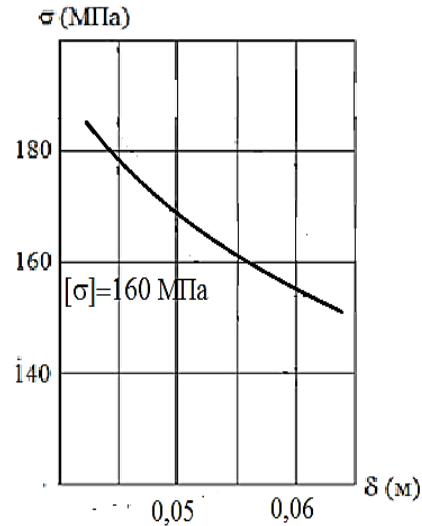


Рис. 6. Изменение внутреннего напряжения в оболочке в зависимости от ее толщины (9 баллов)
Fig. 6. Change of internal stress in the shell depending on its thickness (9 points)

Таблица 5. Параметры прочности цилиндрической оболочки под действием сейсмической нагрузки 8 баллов при $A_b = 700000 \text{ Н}$, $\ddot{y} = 3,6 \text{ м/с}^2$.
Table 5. Parameters of strength of cylindrical shell under seismic load 7 points at $A_b = 700000 \text{ Н}$, $\ddot{y} = 3,6 \text{ м/с}^2$.

δ (м)	J (м ⁴)	m_{s0} (кг)	λ_1 (р/с)	λ_2	λ_3	y_{max} (м)	σ (МПа)
0,045	2,19	19300	168	1050	2940	0,0119	177
0,046	2,24	19400	169	1060	2960	0,0118	176
0,047	2,28	19500	171	1060	2980	0,0117	174
0,048	2,33	19600	172	1070	3000	0,0116	173
0,049	2,38	19800	173	1080	3020	0,0115	171
0,050	2,42	19900	174	1080	3040	0,0114	169
0,055	2,66	20500	180	1120	3140	0,0110	162
0,056	2,71	20600	181	1130	3160	0,0109	161
0,057	2,75	20800	182	1130	3170	0,0108	159
0,058	2,80	20900	183	1140	3190	0,0107	158
0,059	2,85	21000	184	1140	3210	0,0106	157
0,060	2,89	21100	185	1150	3220	0,0102	155
0,005	0,25	14300	66	411	1150	0,0242	370

Таблица 6. Сравнение прогибов в зависимости от бальности землетрясения (толщина оболочки 0,005 м)
Table 6. Comparison of deflections depending on earthquake score (shell thickness 0.005 m)

Бальности	\ddot{y} (м/с ²)	$x = 2$ (м)	$x = 4$	$x = 6$	$x = 8$	$x = 10$
6	0,45	0,0004	0,0010	0,0014	0,0018	0,0031
7	0,90	0,0009	0,0020	0,0028	0,0036	0,0061
8	1,80	0,0018	0,0038	0,0054	0,0070	0,0119
9	3,60	0,0036	0,0077	0,0109	0,0145	0,0242

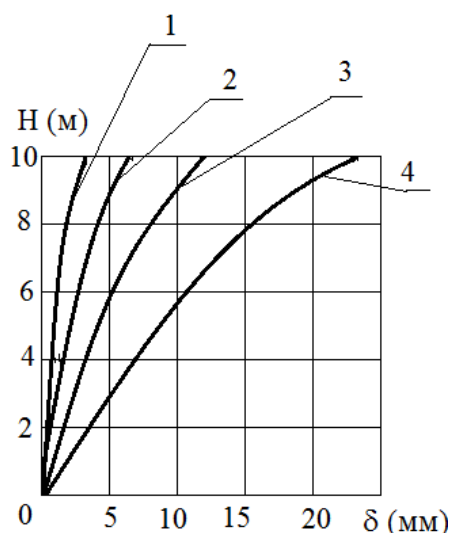


Рис. 7. Сравнение прогибов в зависимости от бальности землетрясения (толщина оболочки 0,005 м):

кривая 1 соответствует 6 баллам, 2 – 7 баллам, 3 – 8 баллам, 4 – 9 баллам

Fig. 7. Comparison of deflections depending on earthquake score (shell thickness 0.005 m): curve 1 corresponds to 6 points, 2 - 7 points, 3 - 8 points, 4 - 9 points

Необходимо отметить, что в условиях сильных землетрясений (8 и 9 баллов) в оболочках бункера возникают усилия значительно превышающие допустимые. Этот факт однозначно указывает на то, что конструкция бункера будет разрушена. В настоящее время оболочки бункеров выполнены толщиной всего 4 мм. Таким образом, анализ прочности конструкции на нагрузки, возникающие при землетрясениях, имеют актуальное значение. Укрепить прочность оболочек бункеров можно самым простым способом – увеличить толщину оболочки. Однако такой способ ведет к росту расхода материала, а, следовательно, и стоимости конструкции. Другой способ укрепления конструкции связан с укреплением оболочки с помощью продольных стрингеров, которые возьмут на себя часть продольной нагрузки. В этом случае, несмотря на дополнительный расход материала, необходимо разумно сочетать и рост толщины оболочки и параметров используемых стрингеров, то есть необходимо переходить к постановке и решению оптимизационных задач.

В результате анализа различных математических моделей колебания баков с сыпучим материалом мы получили перемещения точек системы. Имея эти данные легко определяются внутренние усилия в цилиндрической обечайке при динамических нагрузках.

ВЫВОДЫ

Безопасность и долговечность эксплуатации строительных объектов стационарного типа напрямую зависит от их надежности в любых

экстремальных условиях эксплуатации. В этой связи еще на этапе проектирования конструкции необходимо тщательным образом проанализировать сценарии возникновения опасных для данной системы ситуаций.

В сейсмически опасных районах просто необходимо использовать данные по динамическим нагрузкам, исходя из возможно опасных их воздействий.

При анализе реакции конструкций, заполненных сыпучим материалом, следует кроме расчета по формам их изгиба как балки с бесконечным числом степеней свободы также учитывать и расчет их местной деформации стенок, влияющей на образование присоединенных масс вмещаемой в них жидкости.

При проектировании любой системы основной целью является получения такого облика ее конструкции (оптимального), который позволяет получить заданные прочностные характеристики при минимальных затратах необходимого материала. В этом случае целесообразно рассмотреть различные варианты комбинаций конструктивных элементов, составляющих данный объект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чемодуров, В.Т. Моделирование систем: монография / В. Т. Чемодуров, Э. В. Литвинова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. – 236 с.
2. Пособие по проектированию предприятий, зданий и сооружений по хранению и переработке зерна (к СНиП 2.10.05-85 «Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна») / ЦНИИ промзернопроект. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 144 с.
3. СП 359.1325800.2017 Силосы стальные вертикальные цилиндрические для хранения сыпучих продуктов. Правила проектирования. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
4. Чапаев Т.М., Балкизов А.Б., Сасиков А.С., Шогенова Ж.Х., Кушаева Е.А. Анализ известных теоретических и экспериментальных исследований устойчивости стенки цилиндрического зернобункера // ИВД. 2018. № 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izvestnyh-teoreticheskikh-i-eksperimentalnyh-issledovaniy-ustoychivosti-stenki-tsilindricheskogo-zernohranilischa>.
5. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах / И.В. Горюшинский, И.И. Кононов, В.В. Денисов, Е.В. Горюшинская, Н.В. Петрушкин. Под общей редакцией И.В. Горюшинского: Учебное пособие. – Самара: СамГАПС, 2003. – 232 с.
6. Безухов, Н.И. Устойчивость и динамика сооружений в примерах и задачах: Учебное пособие для строительных специальностей вузов / Н.И. Безухов, О.В. Лужин, Н.В. Колкунов. 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1987. – 264 с.: ил.

7. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменением №1). – Москва: Стандартинформ, 2018. – 114 с.

8. Немчинов, Ю.И. Сейсмостойкость зданий и сооружений / Ю.И. Немчинов. – Киев: НИИСК Минрегионстроя Украины, 2008. – 480 с.: ил.

9. Назаров Ю.П., Позняк Е.В., Симбиркин В.Н., Курнавин В.В. Расчет конструкций линейно-спектральным методом при дифференцированном сейсмическом движении грунта, заданном акселерограммами. Вестник НИЦ «Строительство». 2021; 28(1):92-101. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-92-101](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-92-101).

10. Перцев, А.К. Динамика оболочек и пластин (Нестационарные задачи) / А.К. Перцев, Э.Г. Платонов. – Л.: Судостроение, 1987. – 316 с.

11. Погорелов, В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций / В. И. Погорелов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2007. – 528 с.

12. Назаров, Ю. П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия / Ю. П. Назаров. – М.: Наука, 2010. – 468 с.

13. Шакирзянов, Р.А. Динамика и устойчивость сооружений: Учебное пособие. – 2-е перераб. изд. / Р.А. Шакирзянов, Ф.Р. Шакирзянов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2015. – 120 с.

REFERENCES

1. CHemodurov V. T. System modeling: Monograph / V. T. CHemodurov, E. V. Litvinova. – Simferopol': IT «ARIAL», 2016. – 236 p.

2. Manual for the design of enterprises, buildings and structures for the storage and processing of grain (to SNiP 2.10.05-85 «Enterprises, buildings and structures for the storage and processing of grain») / Central Research Institute of Industrial Grain Project. – M.: CИTP Gosstroy USSR, 1989. – 144 p.

3. SP 359.1325800.2017 Steel vertical cylindrical silos for bulk product storage. Design rules. – Moscow: Standartinform, 2018. – 20 p.

4. Chapaev T.M., Balkizov A.B., Sasikov A.S., Shogenova Zh.Kh., Kushaeva E.A. Analysis of well-

known theoretical and experimental studies of cylindrical grain hopper wall stability // IVD. 2018. № 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izvestnyh-teoreticheskikh-i-eksperimentalnyh-issledovaniy-ustoychivosti-stenki-tsilindricheskogo-zernohranilisha>.

5. Containers for bulk cargo in transport and cargo systems / I.V. Goryushinsky, I.I. Kononov, V.V. Denisov, E.V. Goryushinskaya, N.V. Petrushkin. Edited by I.V. Goryushinsky: Textbook. – Samara: SamGAPS, 2003. – 232 p.

6. Bezukhov, N.I. Stability and dynamics of structures in examples and tasks: Textbook for construction specialties of universities/N.I. Bezukhov, O.V. Luzhin, N.V. Kolkunov // 3rd ed., Revised. – M.: Higher. shk., 1987. – 264 p.: Ill.

7. SP 14.13330.2018 Construction in seismic areas. Actualized edition SNiP II-7-81* (with a change №1). – Moscow: Standartinform, 2018. – 114 p.

8. Nemchinov, Yu.I. Seismic resistance of buildings and structures/Yu.I. Nemchinov. - Kyiv: NIISK of the Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2008. - 480 p.: Ill.

9. Nazarov Y., Poznyak E., Simbirkin V., Kurnavin V. Structural analysis by response spectrum method for differential seismic ground motion given by accelerograms. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021; 28(1):92-101. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-92-101](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-92-101).

10. Pertsev, A.K. Dynamics of shells and plates (Non-stationary tasks) / A.K. Pertsev, E.G. Platonov – L.: Shipbuilding, 1987. – 316 p.

11. Pogorelov, V.I. Construction mechanics of thin-walled structures/V.I. Pogorelov – St. Petersburg: BHV – Petersburg, 2007. – 528 p.

12. Nazarov, Y. P. The analytical foundations of calculating structures on seismic influences / YU. P. Nazarov. – M.: Nauka, 2010. – 468 p.

13. Shakirzyanov, R.A. Dynamics and stability of structures: Textbook. – 2nd revision. ed. /R.A. Shakirzyanov, F.R. Shakirzyanov. – Kazan: Publishing House Kazansk. state. architecture-construction. University, 2015. – 120 p.

DYNAMIC STRENGTH STUDY OF CYLINDRICAL BULK SILOS UNDER SEISMIC LOAD CONDITIONS

¹Chemodurov V. T., ²Litvinova E. V.

V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
Institute « Academy of Construction and Architecture»
Simferopol, Republic of Crimea, Russian Federation
E-mail: ¹Chens_mu1@mail.ru, ²EllaLit@mail.ru

Abstract. The article calculation of bulk material hopper at dynamic loads is considered. This calculation is a reference for assessing the strength of the structure under possible earthquake conditions. It is shown that in earthquake conditions such structures do not withstand loads arising during vibrations. The use of mathematical methods makes it possible to select both the thickness of the hopper shell and the parameters of the reinforcement ribs, which, together, give a significant economic effect, which means that the structure will withstand any fluctuations inherent in a given point of ground movement. Mathematical modeling methods are now increasingly being used to select device parameter values that are able to provide strength, stability and durability to the structure for the most adverse operating conditions. It should be noted that calculations for the strength of cylindrical bunkers of bulk materials from the impact of possible earthquakes (which is typical for the Crimea) were not carried out. The article proposes an algorithm for calculating the strength of a cylindrical bunker taking into account the effect of seismic load. Shear deformations and structure vibrations for possible earthquakes up to 9 points are considered.

Research subject. Study of the stress-strain state of the hopper shell under unsteady dynamic impact.

Materials and methods. Development of models of oscillation process of cylindrical thin-walled objects and their study in terms of ensuring strength and stability. Simulation of oscillatory processes relies on well-known methods adopted in practice.

Results. As a result of the analysis of various mathematical models of vibrations of tanks with bulk material, we obtained movements of system points. Having these data, the internal forces in the cylindrical shell under dynamic loads are easily determined.

Conclusions. When analyzing the reaction of structures filled with loose material, in addition to calculating their bending as beams with an infinite number of degrees of freedom, one should also take into account the calculation of their local deformation of the walls, which affects the formation of the attached masses of the liquid contained in them.

Key words: dynamic strength of cylindrical hoppers, seismic loads, vibration forms, cylindrical shell of the hopper, material rod with an infinite number of degrees of freedom.