

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМИРОВАННОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ СИЛОСА

Некрашевич Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Механизация животноводства» заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации

Антоненко Надежда Александровна, старший преподаватель, соискатель ФГОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени профессора П.А. Костычева»

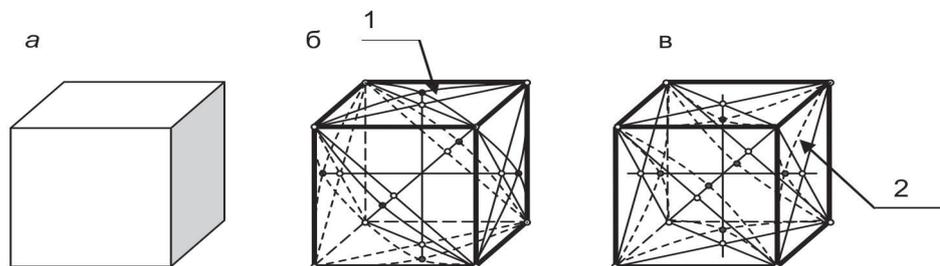
390044, г. Рязань, ул. Ветеринарная, д.17, кв. 50; тел. 8 (952)1288453,
e-mail: nadegdaantonenko@yandex.ru

Ключевые слова: контейнер, силос, дифференциальное уравнение, вакуум, деформация, поля напряжений, часовой индикатор, генерации элементов.

Задачей данной работы является исследование деформаций, возникающих в стенках металлического контейнера в нагруженном состоянии при обычных условиях силосования и при использовании в процессе силосования вакуума. Изменения в конструкции контейнера были изучены на основе сравнения эпюр полей напряжений, суммарных деформаций, полученных с использованием метода конечных элементов проектно-вычислительного комплекса Structure CAD, а также при проведении теоретических и производственных исследований.

Введение. Известно, что силос для кормления сельскохозяйственных животных хранится в буртах, силосных траншеях или башнях. В последние годы для силосования применяют процесс вакуумирования [1]. Однако существующие хранилища имеют ряд существенных недостатков: не имеют необходимой герметизации; в них отсутствует устройство для уплотнения зеленой массы, вследствие этого во время молочно-кислого брожения присутствует большое количество кислорода, что инициирует де-

ятельность аэробных бактерий и тормозит процесс брожения; в них нет возможности для удаления излишков клеточного сока, образующегося при приготовлении силоса. Все это приводит к тому, что вакуум в траншее сохраняется лишь небольшое время после отключения вакуумного насоса, что приводит к снижению качества получаемого силоса. Поэтому требуются контейнеры для хранения, транспортировки и переработки продукции сельскохозяйственного назначения, которые, однако, испытывают



а – ёмкость в нерабочем состоянии; б – ёмкость в состоянии брожения силосной массы; в – ёмкость в состоянии хранения силосной массы
1. - деформация стенок конструкции путем выгиба наружу;
2. - деформация стенок конструкции путем выгиба внутрь.

Рис. 1 - Деформации стенок емкостей для силосования

значительные знакопеременные нагрузки. Деформации внешних элементов конструкции могут достигать значительных величин как по линейным размерам, так и по углам поворота [2, 3].

Материалы и методы исследований.

Геометрические параметры ёмкости для силосной массы могут являться датчиком технологического процесса её приготовления и хранения, так как молочнокислое брожение при приготовлении силосной массы идёт с повышенной температурой, а процесс ее хранения – с пониженной. На рис. 1 эти процессы представлены геометрически.

Одной из таких конструкций, предназначенной для приготовления и хранения кукурузного силоса, является металлическая ёмкость, разработанная в Рязанском ГАТУ. Она представляет собой герметически закрытый контейнер, в который помещают силосуемую культуру для приготовления и дальнейшего хранения ее с использованием вакуума.

Основными конструктивными элементами контейнера являются: герметично деформируемая ёмкость, выполненная с использованием антикоррозионного покрытия, устройство для вакуумирования с электрическим приводом, устройство для удаления избыточного клеточного сока гравитационного типа.

Исследования металлического контейнера проводили в несколько этапов. Первый этап включал в себя загрузку зеленой массы с предварительным плющением зерна слоями с последовательным уплотнением каждого слоя. После этого посредством уплотняющей пластины или прессы уплотняли всю силосную массу, загруженную в ёмкость. Длительность 1-го этапа в контейнерах составляет 600...900 с, после этого в результате релаксации напряжений в силосуемой массе и без доступа внешнего воздуха происходит процесс молочнокислого брожения.

Во время второго этапа в контейнере с заложенной в него кормовой культурой, прошедшей процесс молочнокислого брожения, с помощью вакуумного насоса создавали вакуум.



Рис. 2 – Конструкция контейнера

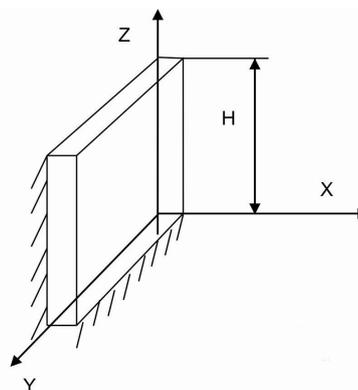


Рис. 3 – Расчетная схема стенки ёмкости

Характеристики металлического контейнера, конструкция которого представлена на рисунке 2, следующие: размеры дна в основании – 1,2 x 1,2 м; высота стенок – 1,2 м; крышка размером – 1,27 x 1,27 м; размеры уплотнительной пластины (прессы) – 1,18 x 1,18 м. В качестве кормовой культуры использовали кукурузу.

Проведем теоретическое исследование по расчету толщины стенки ёмкости для приготовления и хранения кукурузного силоса.

Представим расчетную схему деформируемой ёмкости в виде цилиндрического изгиба тонкостенной пластины, показанной на рис. 3. Пусть стенки ёмкости, имеющие размер a по оси X , и размер b по оси Y , под-

вергаются действию нагрузки. $q = q(x)$ – распределенной реакции сжатия силосной массы.

Стенку представим в виде тонкостенной пластины, заземленной по оси Z с обеих сторон, а по оси Y с одной стороны - снизу (рис. 3). Тогда срединная плоскость будет искривляться по цилиндрической поверхности, и для определения внутренних силовых факторов необходимо решить систему уравнений изгибающих моментов:

$$M_x = \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_x z dz = -D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right);$$

$$M_y = \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_y z dz = -D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right);$$

$$M_{zy} = \int_{-H/2}^{H/2} \tau_{zy} x dz = -D(1 - \mu) \frac{\partial^2 W}{\partial z \partial y}.$$

(1)

Определим прогиб стенки, который будет являться функцией ординаты Z:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial z^4} = \frac{q_1}{D} = \frac{12(1 - \mu^2)}{Eh^3} \cdot q_1.$$

(2)

Для данной расчетной схемы пластины (рисунок 3) дифференциальное уравнение можно решить как дифференциальное уравнение изогнутой простой консольной балки. Решая дифференциальное уравнение (2) с учетом метода начальных параметров, получим уравнение прогиба для схемы а) (рисунок 4).

$$W(z) = \frac{\gamma H g}{D} \left(\frac{H^2}{6} \cdot \frac{z^2}{2} - \frac{H}{2} \cdot \frac{z^3}{6} + \frac{z^4}{8!} \right).$$

(3)

Преобразуем уравнение (3), считая, что $x^4/8! = 0$:

$$W(z) = \frac{\gamma g H^2}{12D} (HZ^2 - Z^3).$$

(4)

Определим вторые производные функции (4):

$$\frac{\partial W^2}{\partial z^2} = \frac{\gamma H^2 g}{12D} (2H - 6z) = \frac{\gamma H^2 g}{6D} (H - 3Z).$$

(5)

Используя граничные условия и закон

Гука для плоской задачи $\partial W / \partial y = 0$, $M_{zy} = 0$, определим напряжения в стенке [5]:

$$\sigma_z = -\frac{E \cdot X}{1 - \mu^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2};$$

(6)

$$\sigma_y = -\frac{E \cdot X}{1 - \mu^2} \cdot \mu \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2};$$

(7)

Так как максимальный прогиб будет при $z = 0,5H$, то из уравнения (4) получим:

$$X = W(z)_{\max} = \gamma g H^5 / (96D).$$

(8)

Определим значение второй производной прогиба в уравнении (5):

$$\left(\frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right)_{\max} = -\frac{\gamma H^3 g}{12D};$$

(9)

Подставив полученные значения $W(z)_{\max}$ и $(\partial^2 W / \partial z^2)_{\max}$ в уравнения (6) и (7), получим максимальные напряжения, возникающие в стенках емкости:

$$\sigma_{\max} = \frac{\gamma^2 H^8 g^2}{8h^6 E} \cdot (1 - \mu^2);$$

(10)

$$\sigma_{y\max} = \frac{\gamma^2 H^8 g^2}{8h^6 E} \cdot \mu(1 - \mu^2);$$

(11)

Так как $t_{xy} = 0$ и $M_{xy} = 0$ имеем, с учетом уравнения

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_{x\max}^2 + \sigma_{y\max}^2 - \sigma_{x\max} \sigma_{y\max}};$$

(12)

напряжения Мизеса [4]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{\gamma^2 H^8 g^2}{8h^6 E} \cdot (1 - \mu^2) \sqrt{1 + \mu^2 - \mu};$$

(13)

С учетом условия прочности

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \gamma_c R \leq \gamma_c \frac{R_B}{\gamma_m},$$

(14)

где R – расчетное сопротивление материала пластины; R_B – предел прочности материала пластины; g_c – коэффициент условий работы конструкции; g_m – коэффициент надежности работы по материалу.

Получим требуемую толщину стенки емкости без учета вакуумирования:

$$h \geq \sqrt[6]{\frac{(\gamma \cdot g)^2 \cdot H^8 (1 - \mu^2) \sqrt{(1 + \mu^2 - \mu)} \cdot \gamma_m}{8E \cdot R_B \gamma_c}};$$

(15)

Решив дифференциальное уравнение (2) с учетом метода начальных параметров

и принципа независимости действия сил для схемы б) (рисунок 4), получим уравнение прогиба:

$$W(z) = W_1(z) - W_2(z); \quad (16)$$

где $W_1(z)$ – уравнение прогиба (4) без учета вакуума; $W_2(z)$ – уравнение прогиба (4) с учетом вакуума;

$$W_2(z) = \frac{P_B}{D} \left(\frac{H^2}{4} Z^2 - \frac{H}{6} Z^3 + \frac{1}{24} Z^4 \right); \quad (17)$$

$$W_2(z) = \frac{\gamma H^2 g}{12D} (HZ^2 - Z^3) - \frac{P_B}{D} \left(\frac{H^2}{4} Z^2 - \frac{H}{6} Z^3 + \frac{1}{24} Z^4 \right); \quad (18)$$

Определим вторые производные функции (16):

$$\frac{\partial W^2}{\partial z^2} = \frac{\gamma H^2 g}{6D} (H - 3Z) - \frac{P_B}{D} \left(\frac{H^2}{2} - H \cdot Z + \frac{Z^2}{2} \right); \quad (19)$$

Так как максимальный прогиб будет при $z = 0,5H$, то из уравнения (18) получим:

$$X = W(z)_{\max} = \frac{\gamma H^5 g}{96D} - \frac{17H^4 P_B}{384D} = \frac{H^4 (4\gamma \cdot H \cdot g - 17P_B)}{384D} \quad (20)$$

Определим максимальное значение второй производной при $z = 0,5H$ из уравнения (19):

$$\left(\frac{\partial W^2}{\partial z^2} \right)_{\max} = -\frac{\gamma H^3 g}{12D} - \frac{P_B H^2}{D8} = -\frac{(2\gamma Hg + 3P_B) H^2}{24D}; \quad (21)$$

Подставив полученные значения $W(z)_{\max}$ и $(\partial^2 W/\partial z^2)_{\max}$ в уравнения (6) и (7), получим значения максимальных напряжений, возникающих в стенках:

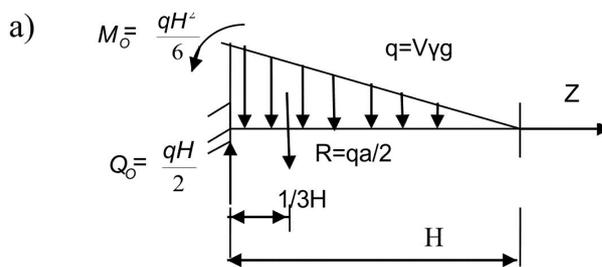
$$\sigma_{z \max} = \frac{[8(\gamma Hg)^2 - 22P_B \cdot \gamma \cdot H \cdot g - 5P_B^2] H^6}{64Eh^6} \cdot (1 - \mu^2); \quad (22)$$

$$\sigma_{y \max} = \frac{[8(\gamma Hg)^2 - 22P_B \cdot \gamma \cdot H \cdot g - 5P_B^2] H^6}{64Eh^6} \cdot \mu(1 - \mu^2); \quad (23)$$

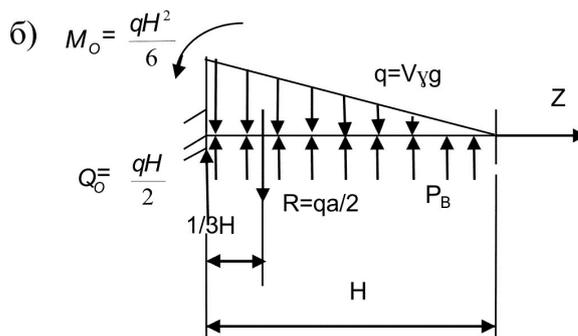
Тогда с учетом уравнения (12) получим напряжения Мизеса [4]:

$$\sigma_{\text{экс}} = \frac{[8(\gamma Hg)^2 - 22P_B \cdot \gamma \cdot H \cdot g - 5P_B^2] H^6}{64Eh^6} \cdot (1 - \mu^2) \sqrt{1 + \mu^2 - \mu}; \quad (24)$$

С учетом уравнения 14 получим требуемую толщину стенки вакуумированной емкости:



- без использования вакуумирования



- с использованием вакуумирования

Рис. 4 - Расчетная схема к решению дифференциального уравнения

$$h \geq \sqrt{\frac{[8(\gamma \cdot H \cdot g)^2 - 22P_B \cdot \gamma \cdot H \cdot g - 5P_B^2] H^6 \cdot \gamma_m (1 - \mu) \sqrt{1 + \mu^2 - \mu}}{64E \cdot R_B \gamma_c}} \quad (25)$$

Дальнейшие исследования выполняли с использованием программного комплекса (ПК) Structure CAD. На рисунке 5 представлен общий вид мозаики полей напряжений МХ металлического контейнера. Полученные данные заложили в расчетную схему с необходимыми начальными параметрами. Затем создали расчетную модель контейнера в ПК Форум. На основе укрупненной модели с помощью генерации элементов выполнили автоматическое построение конечно-элементной расчетной схемы, которую и трансплантировали в ПК SCAD. Элементам схемы задали необходимые назначения, жесткость, типы конечных элементов, связи в узлах контейнера, направления действия усилий. Расчеты изменений в конструкции контейнера выполнили в двух вариантах: 1 - без использования вакуумирования; 2 - с использованием вакуумирования.

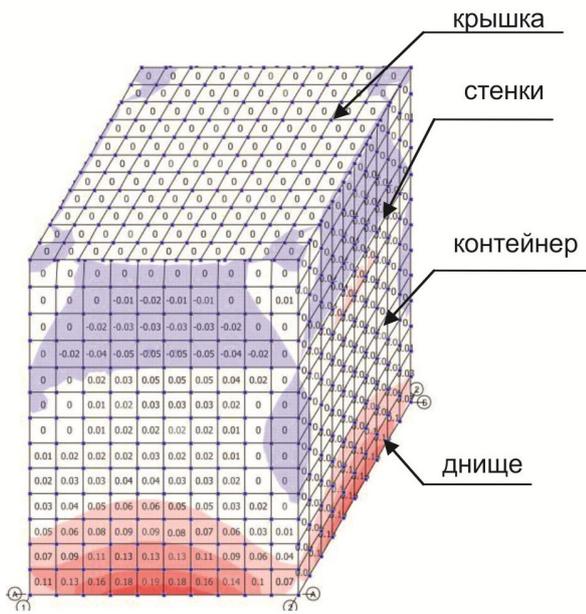


Рис. 5 - Поля напряжений МХ

ПК Structure CAD реализован как интегрированная система прочностного анализа и проектирования конструкций на основе метода конечных элементов и позволяет определить напряженно-деформированное состояние конструкций от статических и динамических воздействий, а также выполнить ряд функций проектирования элементов конструкций [6, 7].

Результаты исследований. На рисунке 6 представлены суммарные перемещения в узлах стенок контейнера без использования вакуумирования и с учетом его создания, на рисунке 7 - поля напряжений в стенках емкости. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Далее были выполнены модельные исследования с использованием часового индикатора ИЧ-50М, с пределом измерений – 0...50 мм, который предназначен для относительных и абсолютных измерений линейных размеров и контроля отклонений от заданной геометрической формы, а также взаимного расположения поверхностей. Результаты модельных исследований, выполненных с помощью часового индикатора, близки по значениям с результатами теоретических исследований, полученными при использовании метода конечных элементов в ПК SCAD 11.3.

Общие результаты исследований сведены в таблицу 2.

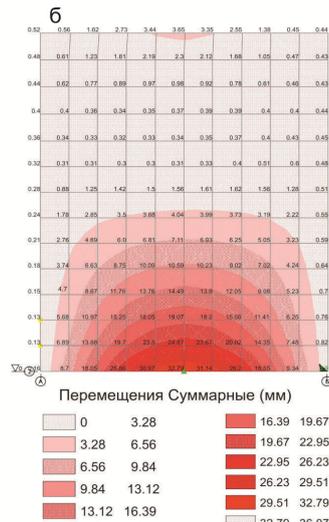
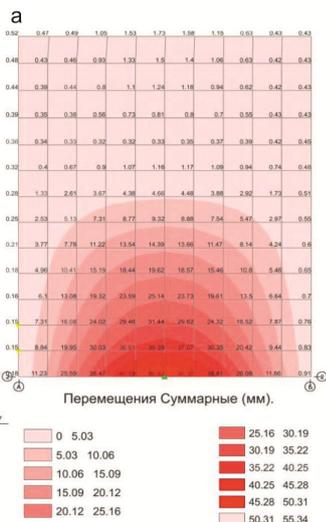
Выводы. Стенки контейнера для хранения силоса можно рассчитывать как тонкостенные пластины, защемленные со всех сторон. Теоретически установлено, что толщину стенок контейнера

Суммарные перемещения, мм, поля напряжений МХ Т*, м/м

м/м

| Перемещения, поля напряжений | Место определения перемещения в узлах | Значения | Контейнер без использования вакуумирования | Вакуумированный контейнер |
|------------------------------|---------------------------------------|----------|--|---------------------------|
| Δ, мм | стенки | min | 0,15 | 0,13 |
| | | max | 50,31 | 32,79 |
| МХ Т*, м/м | стенки | min | -0,17 | -0,24 |
| | | max | 0,02 | 0,82 |

Таблица 1



а – контейнер без использования вакуумирования; б - контейнер с использованием вакуумирования.

Рис. 6 - Суммарные перемещения в узлах стенки контейнера, мм

Таблица 2

Сравнительные результаты исследования контейнера МКЭ и модельных исследований на примере конструкции стенки

| Перемещение, поля напряжений | min, max | Модельные исследования | | МКЭ | |
|------------------------------|----------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| | | Контейнер без использования вакуумирования | Вакуумированный контейнер | Контейнер без использования вакуумирования | Вакуумированный контейнер |
| Δ_r , мм, стенки | min | 0,10 | 0,11 | 0,15 | 0,13 |
| | max | 49,50 | 32,75 | 50,31 | 32,79 |
| МХ, T^* м/м, стенки | min | -0,15 | -0,15 | -0,17 | -0,24 |
| | max | 0,015 | 0,80 | 0,02 | 0,82 |

Δ_r - суммарные перемещения, мм; T^* , м/м - момент, действующий на сечение, ортогональное соответствующей оси, м/м.

следует выбирать в зависимости от прочностных характеристик материала, из которого он изготовлен, и действующих на боковые стенки бокового распора уплотненной силосной массы.

Также установлено, что при вакуумировании металлического контейнера нагрузка на его боковые стенки снижается, а значения испытываемых перемещений уменьшаются приблизительно на 32 %.

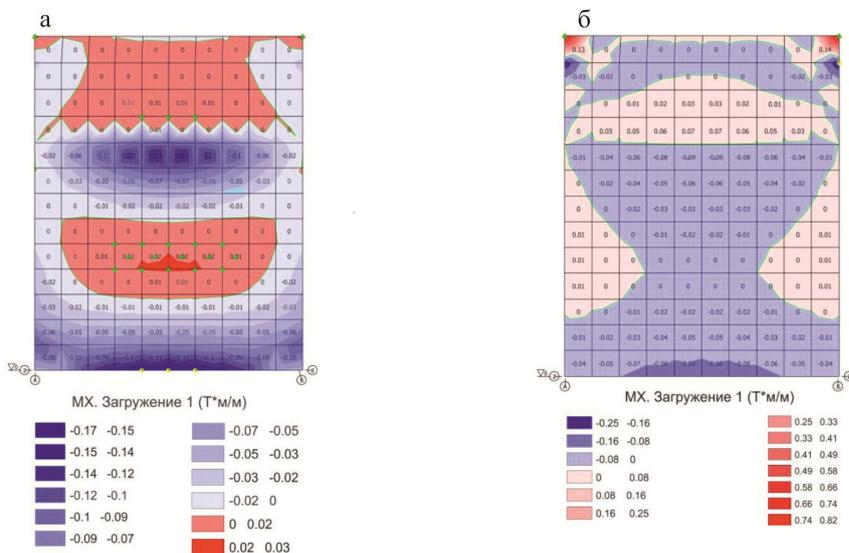


Рис. 7 - Поля напряжений в стенках контейнера МХ (T^* м/м)

Библиографический список

1. Пат. Беларуси № 7417, МПК А23К3/02. Устройство для приготовления силосованных кормов / Основин С.В. и др.; заявка № 20101049; опубл. 30.08.2011.
2. Некрашевич, В.Ф. Анализ конструкций и материалов траншейных силосохранилищ / В.Ф. Некрашевич, Я.Л. Ревич // Сборник научных трудов преподавателей и аспирантов РГАТУ имени П.А. Костычева: Мат. научно-практической конференции 2012 г. – Рязань: Издательство РГАТУ, 2012. – С. 93-99.
3. Устройство траншейного типа для силосования кормов с использованием вакуумирования: заявка на патент от 14.01.2014 / Некрашевич В.Ф, Антоненко Н.А. и др. - № 2013101376.
4. Варданян, Г.С. Сопротивление мате-

- риалов с основами строительной механики / Г.В. Варданян, Н.М. Атаров, А.А. Горшков; под ред. Г.С. Варданяна – М.: ИНФА - М.: Высшая школа, 2004. - 462 с.
5. Саргсян, А.Е. Строительная механика. Механика инженерных конструкций - М.: Высшая школа, 2004. – 462 с.
6. Карпиловский, В.С. SCAD Office. Реализация СНиП в проектирующих программах / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко и др. - М.: Изд-во ООО «НПФ СКАД СОФТ», 2010. - 368с.
7. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М.: Мир, 1977. – 350 с.