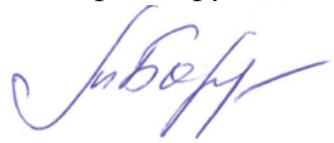


На правах рукописи



БОРОНТОВА МАРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ СИЛОСОВАНИЯ
КОРМОВ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань, 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (ФГБОУ ВО РГАТУ)

Научный руководитель:

Ульянов Вячеслав Михайлович

доктор технических наук, профессор

Дринча Василий Михайлович,

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Арктический

государственный агротехнологический

университет», профессор кафедры

«Технологические системы АПК»

Фролов Владимир Юрьевич,

доктор технических наук, профессор,

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный

аграрный университет имени И.Т.

Трубилина», заведующий кафедрой

механизации животноводства и БЖД

федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего

образования "Донской государственный

аграрный университет" (ФГБОУ ВО

Донской ГАУ)

Ведущая организация:

Защита состоится «24» марта 2026 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.031.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» по адресу 390044, Рязанская область, г. Рязань, ул. Костычева, д.1, зал заседаний диссертационного совета

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГАТУ, на сайте: <http://rgatu.ru/>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.gisnauka.ru/>

Автореферат разослан «___» 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Юхин

Юхин Иван Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Дальнейшее развитие животноводства невозможно без создания прочной кормовой базы. Значительная доля в этом отводится консервированным кормам. Силос является одной из важнейшей составляющей рациона животных в молочном скотоводстве. Основным недостатком при приготовлении и дальнейшем хранении силоса являются его потери от 10% и выше при существующих технологиях силосования. При силосовании кормов в условиях повышенной влажности, особенно, в дождливую погоду в измельчаемый зеленый корм попадает свободная вода, которая снижает качественные показатели при силосовании кормов (брожении), а также хранении силосованного корма в наземных траншеях. В этой связи совершенствование приготовления силоса в неблагоприятные погодные условия с обеспечением качества получаемого силоса является важным и актуальным вопросом АПК.

В диссертации изложены научные положения по совершенствованию технологии приготовления и хранения силоса в мягких вакуумированных контейнерах с устройством для отвода жидкости.

Исследования проводились в соответствии с планом НИОКР ФГБОУ ВО РГАТУ, тема «Совершенствование энергосберегающих технологий, средств механизации и электрификации в животноводстве» подраздел «Разработка технологии приготовления силоса в мягких вакуумированных контейнерах» (№ гос. регистрации AAAA-A16-116060910025-5).

Степень разработанности темы. Решениями вопросов по усовершенствованию технологий приготовления и хранения силосованных кормов, использованию современных средств герметизации хранилищ, повышения сроков хранения корма занимались такие исследователи, как В.И. Авраменко, Л.Г. Боярский, В.М. Дринча, А. А. Зубрилин, Д.В. Иванов, В.Г. Коба, В.И. Курдюмов, Р.А. Мамонов, В.Ф. Некрашевич, Г.К. Ремболович, Я.Л. Ревич, В.М. Ульянов, В.Ю. Фролов, С.Н. Хохрин и многие другие. Большой вклад в научные разработки внесли ученые Республики Беларусь и Германии.

Несмотря на значительное количество исследований, остаются в настоящее время не решенными вопросы приготовления и хранения силосуемых кормов в неблагоприятных погодных условиях, из переувлажненного сырья. Также требуют дальнейших исследований использование вакуума при приготовлении силоса в полимерных мягких контейнерах с удалением свободной влаги с целью снижения энергетических затрат и повышения качества получаемого силоса.

Вышеизложенные вопросы предопределили выбор темы, цели и задач диссертационного исследования.

Цель исследования - повышение эффективности приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягких вакуумированных контейнерах.

Задачи исследования:

- на основе анализа существующих технологий приготовления силосованных кормов, предложить усовершенствованный способ приготовления

силоса из переувлажненного сырья в мягком вакуумированном контейнере, и разработать его конструктивно-технологическую схему;

- исследовать физико-механические свойства силосуемой массы кукурузы;
- теоретически и экспериментально обосновать параметры и режимы приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягком вакуумированном контейнере;
- провести проверку предложенных решений в условиях производства и определить экономический эффект от его применения.

Объект исследования – технологический процесс приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягких вакуумированных контейнерах.

Предмет исследования – закономерности технологического процесса приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягких вакуумированных контейнерах.

Научную новизну составляют:

- усовершенствованный процесс приготовления силоса в мягком контейнере с осушением силосной массы до герметизации и последующего вакуумирования путем просасывания через нее воздуха с попутным отводом свободной влаги;
- конструктивно-технологическая схема с обоснованием параметров мягкого вакуумированного контейнера и режимов для приготовления в нём силосованного корма из переувлажненного сырья;
- результаты экспериментальных исследований приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягких вакуумированных контейнерах.

Теоретическая значимость заключается в теоретически обоснованном технологическом процессе приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягком контейнере для приготовления и хранения силоса.

Практическую значимость работы составляют конструкция контейнера для приготовления силоса, практические рекомендации по приготовлению и хранению силосованного корма в контейнере для приготовления силоса. Новизна технических решений подтверждена патентами РФ на полезную модель №183627 «Контейнер из воздухонепроницаемой плёнки для силосования кормов»; полезную модель №193970 «Контейнер для приготовления и хранения силосованного корма» и изобретение №2683521 «Способ приготовления и хранения силосованного корма».

Результаты теоретических и экспериментальных исследований имеют практическую значимость для конструкторских организаций и предприятий АПК.

Методология исследования. Методологическую основу исследований составили методы системного и структурного анализа, математической статистики и сравнительного эксперимента. Аналитическое описание технологических процессов выполнялось с использованием методов гидравлики и гидротехники, теоретической механики, математического и компьютерного моделирования.

Обработка результатов экспериментальных данных проводилась с использованием методов математической статистики с использованием программ Statistica, MS Excel, MathCad. Экономическая эффективность предлагаемых разработок определялась по стандартной методике для научно-исследовательских работ и новой техники.

Положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованный процесс приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягком вакуумированном контейнере с дальнейшим хранением с получением качественного силоса;
- конструктивно-технологическая схема вакуумированного мягкого контейнера;
- результаты теоретического и экспериментального обоснования параметров и режимов приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягком вакуумированном контейнере;
- результаты исследований в производственных условиях экономических расчетов приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягком вакуумированном контейнере с последующим хранением с получением качественного силоса.

Достоверность результатов исследований. При проведении экспериментальных исследований использовались современные методики, приборы, установки. Результаты теоретических исследований в достаточной мере согласуются с полученными экспериментальными данными. Сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований составляет 95%. Результаты, полученные в ходе выполнения работы, согласуются с результатами, опубликованными в независимых источниках по тематике исследования прошли широкую апробацию в печати, на международных и всероссийских научно-практических конференциях.

Реализация результатов исследования. Контейнер для приготовления силоса с устройством отвода жидкости применялся в хозяйстве ООО «Разбердеевское», Спасского района, Рязанской области.

Вклад автора заключается в постановке задач исследований, в разработке способа приготовления и хранения силоса из переувлажненного сырья, конструкции мягких вакуумированных контейнерах с устройством для отвода жидкости, проведении теоретических и экспериментальных исследований, обработке и интерпретации полученных результатов, написании статей и оформлении патентных заявок.

Апробация результатов. Основные положения диссертации докладывались и одобрены на научных и научно-практических конференциях ФГБОУ ВО РГАТУ (2015-2024 гг.). Теоретические и экспериментальные положения научно-квалификационной работы обсуждались и докладывались автором на заседаниях кафедры «Технические системы в АПК» инженерного факультета ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Костычева (2019 г.)

Публикации результатов исследований. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ объемом 9,88 п. л., в том числе авторских – 3,41

п. л., из которых 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК; 1 в международной глобальной базе Scopus; три патента РФ на 1 изобретение и 2 полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 100 наименований и приложений. Работа изложена на 189 страницах, содержит 83 рисунка, 17 таблиц, 13 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования» рассмотрена характеристика силосуемых кормов, выполнен анализ средств механизации приготовления и хранения силоса, проанализированы выполняемые исследования по приготовлению и хранению силоса с использованием вакуума, проведен анализ теоретических исследований в областях приготовления и хранения силоса, сформулированы цель и задачи исследования.

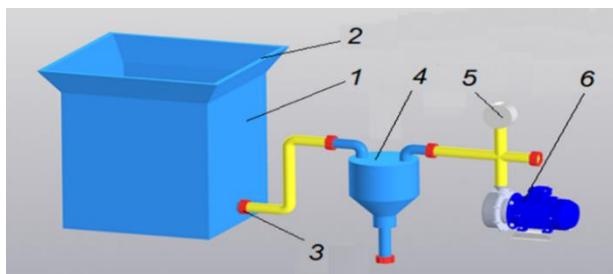
Во второй главе «Физико-механические свойства и размерные характеристики кукурузного сырья для силоса» представлены программа, методика и результаты исследований массово-размерных характеристик силосуемой массы кукурузы разной спелости. Дано описание используемых для проведения опытов приборов и измерительной аппаратуры.

Определены физико-механические свойства и размерные характеристики измельченной кукурузы с початками молочно-восковой и восковой спелости при влажности 60...73% для приготовления силоса в мягких контейнерах.

При изменении частиц гранулометрического состава измельченной кукурузной массы от 7,5 до 22,5 мм её насыпная плотность уменьшается с 456 до 376 кг/м³, при этом пористость и коэффициент фильтрации увеличиваются соответственно с 45 до 61% и с $1,24 \cdot 10^{-4}$ до $1,593 \cdot 10^{-4}$ м/с. При исходной влажности кукурузной массы в пределах 70%, длина резки стеблей должна быть 10...15 мм, при этом насыпная плотность растительной массы составит около 400 кг/м³, пористость 49...53%, коэффициент фильтрации $1,18 \cdot 10^{-4} \dots 1,68 \cdot 10^{-4}$ м/с.

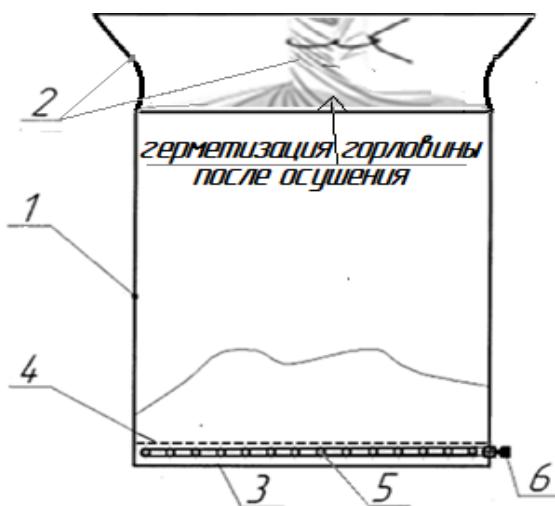
В третьей главе «Теоретическое обоснование параметров и режимов приготовления силосованного корма из переувлажненного сырья в мягком контейнере» на основании изучения и анализа существующих процессов приготовления и хранения силосуемых кормов был предложен процесс приготовления силоса в мягких полимерных контейнерах (патент РФ №2683521). Схема оборудования для приготовления кукурузного силоса в мягких контейнерах представлена на рисунке 1.

На рисунке 2 приведена схема контейнера из воздухонепроницаемой пленки с раскрытым горловиной (внутри показана загерметизирована горловина скруткой после осушения измельченной массы). Стенки контейнера 1 выполнены из воздухонепроницаемой плёнки.



1 – контейнер; 2 – горловина; 3 – клапан; 4 – вакуумный баллон; 5 – вакуумметр с регулятором; 6 – вакуумный насос.

Рисунок 1 – Схема оборудования для приготовления силоса.



1 – контейнер; 2 – горловина; 3 – дно; 4 – перегородка;

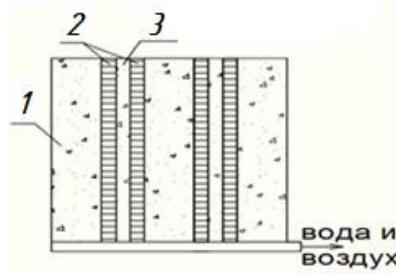
5 – коллектор; 6 – клапан

Рисунок 2 – Схема контейнера

В верхней части имеется загрузочная горловина 2, а у дна 3 контейнера расположен трубчатый коллектор 5, через вставку в боковой стенке контейнера герметично соединен с клапаном 6, установленном снаружи. Сверху над коллектором, по размеру всей площади дна контейнера, установлена перфорированная перегородка из не коррозионно-стойкого материала.

Размеры отверстий в перегородке должны быть меньше размера частиц силосуемой массы. Коллектор 5 охватывает площадь дна и выполнен из труб, в боковой поверхности которых имеются отверстия для захода жидкости и воздуха. Техническая новизна контейнера для приготовления и хранения силосованного корма подтверждена патентами РФ на полезную модель №183627 и №193970.

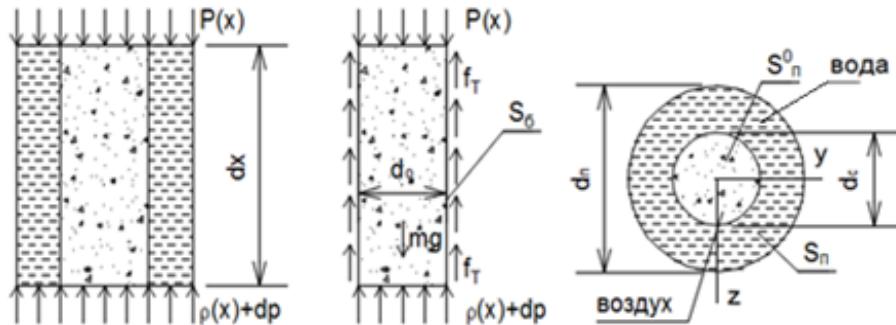
Измельченная масса кукурузы является пористой средой. В этой среде находится свободная вода, которую необходимо удалить. Для осушки измельченной массы, упакованной в мягкий контейнер, снизу производится откачка воздуха из него. В результате этого образуется вертикальный поток воздуха сверху вниз через измельченную массу. Воздушный поток увлекает за собой частицы жидкости и удаляет её из мягкого контейнера. При решении данного вопроса пользуемся упрощенными моделями строения пористой среды. Одной из таких моделей является «идеальная пористая среда», у которой капиллярные каналы, составленные из пор, образующихся частицами среды, принимаются цилиндрическими и параллельными между собой (рис.3). Диаметры этих трубок малы, поэтому движение воздуха по трубкам будем считать одномерным со средней скоростью v_x . Кроме этого, движение воздуха в трубке будем считать ламинарным, адиабатическим и изотермическим, а сам воздух баротропным.



1 – силосуемая масса; 2 – вода; 3 – воздух.

Рисунок 3 – Схема осушения измельченной кукурузной массы.

Вода в ненасыщенном состоянии обволакивает частицы измельченной кукурузы, образуя просвет, в котором находится воздух. Будем считать, что просветы образуют вертикальные трубы, по которым движется воздух. Рассмотрим бесконечно малый столб воды и воздуха высотой dx в одной трубке (рис. 4).



d_p – диаметр поры, м; d_o – диаметр столба воздуха, м; S_p, S_n^0, S_n – площади соответственно поперечного сечения поры, просвета и боковой поверхности столба воздуха, м^2

Рисунок 4 – Бесконечно малый элемент столба

Используя метод кинетостатики, придем к уравнению движения воздуха

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} + f_t \frac{2}{r_0} - \rho g = 0 \quad (1)$$

где P – давление, Па; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; v – скорость движения частицы воздуха, $\text{м}/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; t – время, мин.; f_t – сила трения по боковой поверхности столба воздуха о воду, на единицу площади боковой поверхности, Н; $r_0 = d_0/2$ – радиус трубы, зависящий от количества воды в измельченной массе, м; x – координата частицы по вертикали.

Уравнение состояния для воздуха примем в виде.

$$P(\rho) = P_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (2)$$

где P_0 и ρ_0 – давление (Па) и плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) воздуха в естественном состоянии вверху контейнера; показатель степени γ (объемный вес, $\text{кг}/\text{м}^3$) для воздуха находится в пределах $1 \leq \gamma \leq 1,4$.

Движение будем считать установившимся, тогда уравнение (1) будет

$$\rho \mathcal{V} \frac{d\rho}{dx} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g - f_t \frac{2}{r_0} \quad (3)$$

а уравнение неразрывности принимает вид

$$\frac{\partial (\rho \mathcal{V})}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

где ρ, \mathcal{V}, P зависят только от x .

К уравнениям (3), (4) необходимо добавить граничные условия:

при $x=0, P=P_0, \rho=\rho_0$, при $x=h, P=P_s, V = V_B$ (5)

где P_s, V_s – давление (Па) и скорость (м/с) воздуха внизу контейнера; h – высота силосуемой массы, м.

Выражая скорость через давление из уравнения состояния (2) и неразрывности (4), придем к уравнению

$$\left(-\frac{\rho_0 V_0^2 P_0^{1/\gamma} P^{-\frac{1}{\gamma+1}}}{\gamma} + 1 \right) \frac{dP}{dx} = \rho_0 P_0^{-1/\gamma} P^{\frac{1}{\gamma}} \cdot g - \frac{2f_t}{r_0} \quad (6)$$

где $V_0 = \left(\frac{P_B}{P_0}\right)^{1/\gamma} V_B$ – скорость воздуха в начале трубы, м/с.

Расход жидкости через сечение контейнера с измельченной силосуемой массой будет

$$Q = \frac{SF}{\rho g} k U \left(\frac{r_0}{r_k} \right) \quad (7)$$

где k – коэффициент фильтрации насыщенной среды; S – площадь поперечного сечения контейнера, м^2 ; $F = \frac{P_0 - P_B}{h} + \rho_B g$; r_k - радиус активных (эффективных) пор, м.

После преобразований решение уравнения (6) с учетом (7) для откаченного объема за время t принимает вид

$$V_{\text{отк}}(t) = -\frac{t_k}{G} \frac{k S F}{\rho g} \int_G^{u(t)} U(u) du, \quad (8)$$

где t_k – время откачивания жидкости, мин; $G = \frac{V_{\text{вп}}}{V_{\text{пп}}}$; $V_{\text{вп}}$ – объем жидкости до откачивания, м^3 ; $V_{\text{пп}}$ – объем активных пор в силосуемой массе, м^3 .

Интеграл в (8) от функции $U(u)$ имеет следующее выражение

$$\int_G^u U(u) du = \frac{1}{18} (u^3 - G^3) - \frac{1}{12} \left(1 + \frac{q_0}{F} \right) \left[(1-u)^3 \ln \sqrt{1-u} - (1-G)^3 \ln \sqrt{1-G} - \frac{1}{24} [(1-u)^3 - (1-G)^3] \right] + \frac{1}{16} (u^2 - G^2) \quad (9)$$

Теоретическая зависимость позволяет определить объем удаляемой свободной жидкости из зеленой массы кукурузы при её силосовании в контейнере от времени откачивания воздушно-жидкостной фазы.

Из равенства (8) можно определить время откачивания жидкости

$$t_k = \frac{(V_{\text{вп}} - V_{\text{пп}}) \cdot G \cdot \gamma_B}{k \cdot S \cdot F \cdot I(t_k)}, \quad (10)$$

где $V_{\text{пп}}$ – объем жидкости оставшейся в силосуемой массе, м^3 ; γ_B – объемная масса жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$$I(t_k) = \frac{1}{18} ((G - G1)^3 - G^3) - \frac{1}{12} \left(1 + \frac{q_0}{F} \right) \left[(1 - (G - G1)^3) \ln \sqrt{1 - G + G1} - (1 - G)^3 \ln \sqrt{1 - G} - \frac{1}{24} [(1 - G + G1)^3 - (1 - G)^3] \right] + \frac{1}{16} [(G - G1)^2 - G^2], \quad (11)$$

где $G1 = \frac{V_a}{V_{\text{пп}}}$; V_a - активный объем жидкости – объем жидкости поддающийся откачиванию, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Математическую зависимость (10, 11) проще решить численным методом с использованием опытных данных. Решение в комплексе Mathcad, полученных выражений (8), (9) показано на рис. 5.

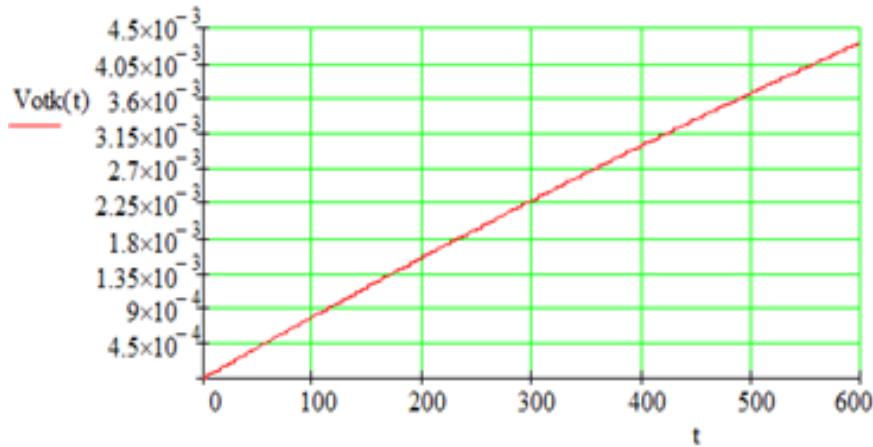


Рисунок 5 – Графическая зависимость объема удаленной жидкости из зеленой массы V_0 от времени t

Анализ зависимости показал, что за 600 секунд возможно удалить объем жидкости $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ из переувлажненной измельченной массы. Осушение измельченной кукурузной массы от свободной воды прокачкой воздуха при заготовке силоса в контейнере значительно сократит время по сравнению с естественными условиями, которые зависят от погоды.

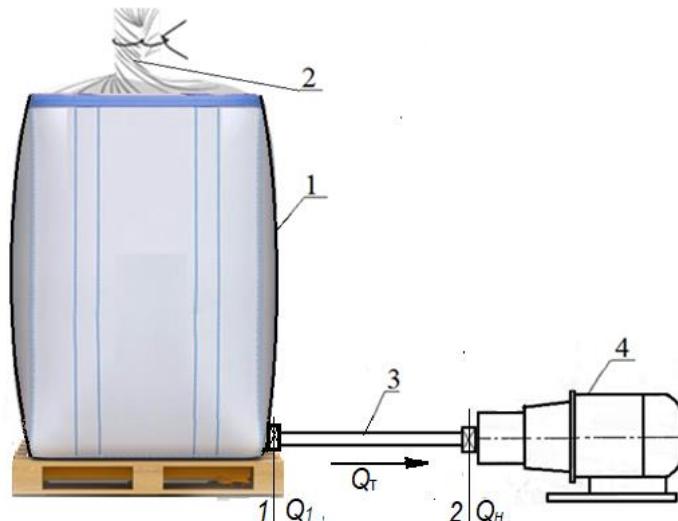
Диаметр выходной трубы коллектора в мягком контейнере будет

$$d_k = \sqrt{\frac{4kSFI(t_k)}{\pi G \gamma_B \mu v_t}} \quad (12)$$

где v_t – скорость движения воздушно-жидкостной смеси, м/с; μ – коэффициент расхода трубы.

После воздушного осушения силосуемой массы от свободной жидкости проводится герметизация полиэтиленового мягкого контейнера. Она производится вручную, путем обвязывания шнуром, либо термосклейванием.

После герметизации мягкого контейнера силосуемую массу уплотняют (рис. 6).



1 – контейнер; 2 – горловина; 3 – трубопровод; 4 – вакуумный насос.

Рисунок 6 – Схема к вакуумированию контейнера

В результате создаваемого рабочего вакуума $p_h = p_a - p_o$ внутри контейнера он подвергается сжатию. В виду того, что на дне вкладыша контейнера расположен сборный коллектор, а над ним перфорированная

перегородка, несмотря на объёмное уплотнение, контейнер в большей степени будет уменьшаться в вертикальном направлении, оставляя форму своего основания неизменной. Происходит усадка мягкого контейнера за счет удаления воздуха и сближения частиц резки силосуемой массы, которая удерживается от воздействия вакуума в уплотнённом, сжатом состоянии. Определим время откачки вакуумной установкой воздуха для обеспечения вакуумирования мягкого контейнера при подготовлении в нём силоса с конечной плотностью ρ_c . За это время с помощью вакуумного насоса (рис. 5) с отсасывающей способностью Q_1 в контейнере объемом V давление понижается от начального p_a до конечного p_o . Рассмотрим в какой-то промежуточный момент времени t , когда текущее давление в контейнере p уже ниже p_a , но не достигло p_o . Выберем в качестве пространственного контура сам контейнер и запишем баланс газа по объему для элементарного времени dt . В целом будет

$$0 - Q_1 dt = dV \quad \text{или} \quad dt = -\frac{dV}{Q_1} \quad (13)$$

Проинтегрируем время в пределах от 0 до t_0 и соответственно объем от V_0 до V_k , учитывая, что при откачивании воздуха из контейнера он деформируется и своей оболочкой сжимает силосуемую массу, используя формулу $V = \frac{m}{\rho}$ произведем замену объема, имеем

$$t_{01} = \frac{Sh_0\rho_0}{Q_1\rho_c} \left(\frac{\rho_c - \rho_0}{\rho_0} \right) = \frac{Sh_0\rho_0}{Q_1\rho_c} \left(\frac{p_a}{p_0} - 1 \right) \quad (14)$$

где V_0 , V_k – соответственно начальный и конечный (после сжатия) объем контейнера, m^3 m – масса силосуемого корма, кг или $m = V_0\rho_0$, а первоначальный объем контейнера $V_0 = Sh_0$; ρ_0, ρ_c – соответственно плотность силосуемой массы начальная и конечная (после уплотнения), кг/м³, Q_1 – отсасывающей способностью насоса, м³/с.

Теоретическая зависимость (14) позволяет определить продолжительность откачивания воздуха (вакуумирования) из мягкого контейнера до достижения плотности (ρ_c) зеленой массы кукурузы при ее силосовании. Продолжительность откачивания воздуха вакуумной установкой зависит от безразмерного силового фактора ($\frac{P_a}{P_0}$), плотностей исходной (ρ_0) и уплотненной (ρ_c) зеленой массы, габаритных размеров мягкого контейнера (Sh_0) и производительности насоса по откачиваемому воздуху.

Соответственно с увеличением конечной плотности силосуемой массы увеличиваются безразмерный силовой фактор и количество откачиваемого воздуха. В формуле (14) не учитывается трубопровод между насосом и контейнером. Трубопровод характеризуется сопротивлением (проводимостью) при проходе воздуха.

Выделим на расстоянии x от входа в трубопровод элементарный участок dx (рис. 7), для которого будут текущие значения давления p , плотности ρ и скорости g .

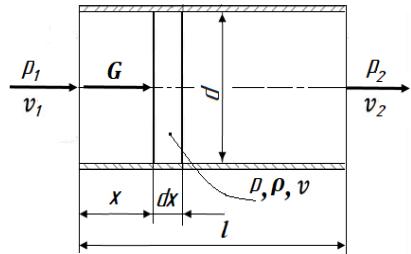


Рисунок 7 – Схема к расчету потерь давления воздуха

Запишем уравнение Бернулли для выделенного участка dx

$$dh + \frac{dp}{\rho g} + \frac{d\vartheta^2}{2g} + dh_{\pi} = 0 \quad (15)$$

где: p – действующее статическое давление, Па; ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h – геометрическая высота потока воздуха в сечении над условной плоскостью сравнения, м; ϑ – скорость потока воздуха, $\text{м}/\text{с}$; dh_{π} – потери напора воздуха на трение, м.

В этом уравнении из-за низкого значения плотности воздуха значимость входящих слагаемых, влияющих на процесс его движения, оценивается по-разному. Слагаемым dh можно пренебречь из-за малого гидростатического давления газового столба высотой dh . Слагаемым напора $\frac{d\vartheta^2}{2g}$ можно также пренебречь из-за незначительной величины и неизменной величине диаметра трубы рассматриваемого участка, по которому движется воздух.

Учитывая выше сказанное, и представляя потерю напора dh_{π} через давление по выражению Дарси-Вейсбаху, заменяя плотность воздуха через его давление, интегрируя от начального до конечного сечения, т.е. от 0 до l и от p_1 до p_2 , уравнение (15) принимает вид

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{\lambda \rho_{cp} \vartheta^2 p_{cp} l}{d} \quad (16)$$

где ρ_{cp} , p_{cp} – соответственно среднее значение плотности ($\text{кг}/\text{м}^3$) и давления (Па) воздуха на рассматриваемом участке трубопровода; λ – безразмерный коэффициент сопротивления движению воздуха; l – длина шланга, м.

Перепад давления $\Delta p = (p_1 - p_2)$ при установившемся движении воздуха за счет вакуума или его падение по длине трубы зависит как от материала трубы, её шероховатости, диаметра, длины, местных сопротивлений и других факторов. Давление p_2 непосредственно в сечение перед входом в вакуумный насос, то его можно принять равным остаточному давлению в системе $p_2 = p_0$. Необходимый диаметр трубопровода для обеспечения требуемой пропускной способности Q_t , учитывая, что среднее давление в трубопроводе $p_{cp} = 0,5(p_1 + p_0)$ из формулы (16) получим

$$d = \frac{\lambda \rho \vartheta^2 l}{2(p_1 - p_0)} \quad \text{или} \quad d = \sqrt[5]{\frac{8\lambda \rho_{cp} l Q_t^2}{\pi^2 (p_1 - p_0)}} \quad (17)$$

По представленному выражению (17) следует определять диаметр трубопровода для откачивания воздуха из мягкого контейнера для обеспечения требуемой производительности.

По конструктивным соображениям длина трубопровода для соединения контейнера с вакуумной системой достаточна в пределах 2...2,5 м. Следует

заметить, что местные потери давления будут наблюдаться при входе в насос. Учитывая, что воздух при откачивании из трубопровода и контейнера попадает в вакуумный насос и в нём сжимается, а затем выбрасывается в атмосферу. То очевидно будут некоторые его перетечки и снижение объёмного расхода по сравнению с расходом в трубы. Поэтому расход Q_h должен превышать необходимый расход Q_1 . Поэтому необходим запас производительности насоса по откачиваемому воздуху по сравнению с необходимым расходом воздуха, поступающим из контейнера.

При реализации предложенного способа приготовления и хранения силоса в мягких вакуумированных контейнерах важным параметром является объём самого контейнера. При выборе размеров контейнера следует учитывать несколько факторов. Такие как удобство заполнения силосуемым сырьем контейнера с последующим вакуумированием, погрузкой и транспортировкой. Размещение в хранилищах для осуществления процесса молочнокислого брожения и использование силоса при его скармливании животным. Ввиду того, что контейнеры не требуют специальных хранилищ, их можно размещать в общехозяйственных ангарах. Для эффективного использования площади хранилищ, контейнеры должны иметь четырехугольную форму в виде квадрата или прямоугольника. В настоящее время в складских помещениях и для погрузки товаров широко используют транспортная тара в виде поддона, перемещаемый с помощью вилочного погрузчика. При выборе размеров контейнера для силоса важно учитывать его рекомендуемые нормы скармливания животным. После вскрытия вакуумированных контейнеров целесообразно использовать силос в течении двух часов, исключая его повторную ферментацию и снижение кормовой ценности.

Исходя из выше сказанного необходимый объём мягкого контейнера (V_k) для приготовления и хранения силоса можно определить по формуле

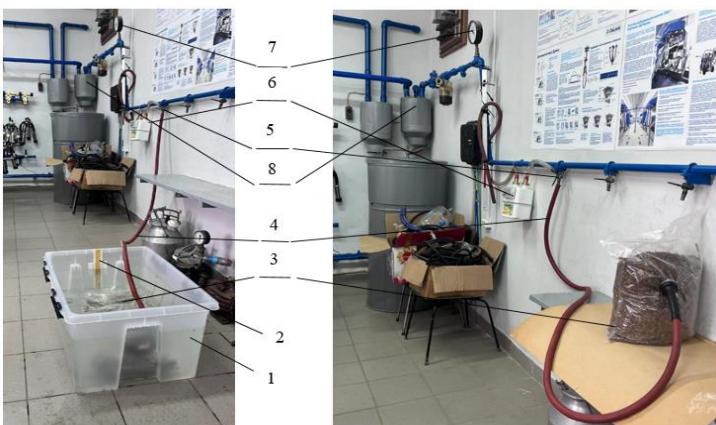
$$V_k = \frac{qN}{k_1 \rho_0 k_2} \quad (18)$$

где q – суточный расход силоса на корову, кг; N – число животных в группе, гол; k_1 – кратность кормления животных; ρ_0 – насыпная плотность силосуемой массы, кг/м³; k_2 – коэффициент использования начальной высоты контейнера.

Применение на практике перспективных роботизированных систем приготовления и раздачи полнорационных смесей лактирующим коровам показал, что кратность составляет от 6 до 8 раз в сутки. Тогда рекомендуемый объём мягкого контейнера (V_k) для приготовления и хранения силоса составляет 1 м³, а расчетный диаметр трубопровода $d=0,02$ м.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование приготовления силоса в мягких контейнерах» представлены методика и результаты проведения лабораторных исследований, необходимые для успешной реализации процесса приготовления силосуемого корма в мягких контейнерах. Обработка полученных данных производилась с помощью ПЭВМ.

Для проведения лабораторных исследований была разработана лабораторная установка (рис. 8).



1 - резервуар с водой; 2 - измерительная шкала уровня жидкости в резервуаре; 3 – мягкий контейнер с силосной массой; 4 – трубопроводный шланг; 5 – кран; 6 – расходомер воздуха; 7 – измеритель вакуума; 8 – вакуумная установка

Рисунок 8 – Общий вид лабораторной установки

По результатам эксперимента построены графические зависимости изменения объема и плотности силосуемой массы в мягком вакуумированном контейнере от действия приложенного уплотняющего давления (рис. 9).

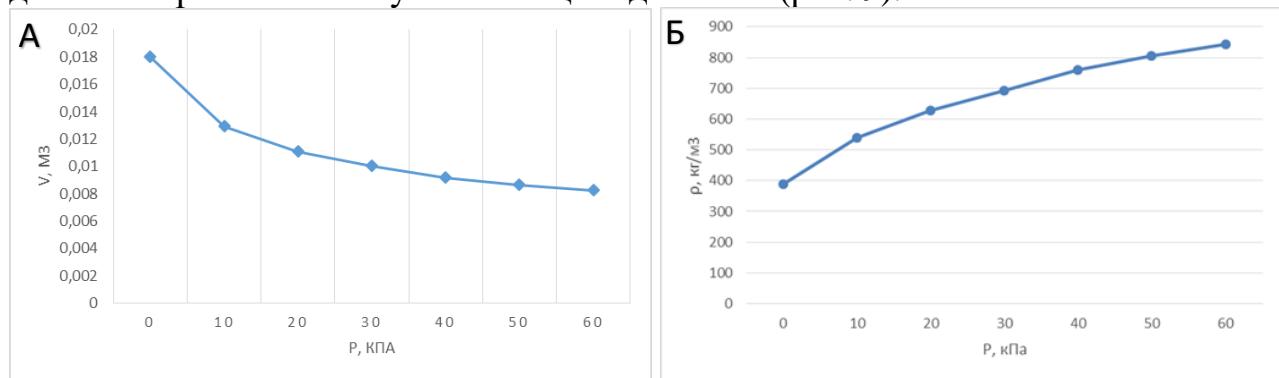


Рисунок 9 – Графическая зависимость изменения объема (А) и плотности (Б) силосуемой массы в мягком контейнере от действия приложенного уплотняющего давления

С ростом вакуумметрического давления объем силосуемой массы уменьшается, плотность соответственно увеличивается. Полученные данные позволяют обосновать процесс приготовления силоса в мягких контейнерах.

Как было сказано ранее, заготовка зеленой массы на силос порой сталкивается с неблагоприятными погодными условиями. Это и обильная роса, и дождливая погода, что ведет к повышению влажности силосуемого сырья из-за свободной влаги. Установлено, что кукуруза в период осадков (роса, дождь) способна накапливать на стеблях и листьях дополнительную свободную влагу. При средней длине стебля с листьями 2,05 м и массе 0,71 кг максимальное количество дополнительной влаги составляет 0,10 кг на один стебель, или до 0,142 кг воды на 1 кг массы кукурузы. Возникает необходимость в осушении заготавливаемого сырья.

На рисунке 10 построена графическая зависимость количества выхода жидкости из измельченной массы кукурузы в контейнере от вакуума и его продолжительности действия.

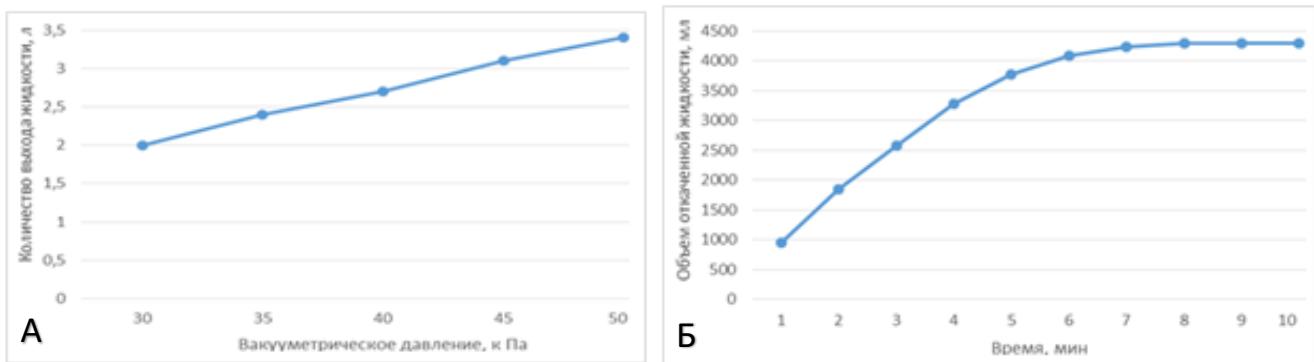


Рисунок 10 – Графические зависимости выхода жидкости: от вакуума (А) и времени (Б).

Так при значениях влажности силосуемой массы – 70% и времени откачивания воздуха 5 мин рост действующего вакуума ведет к увеличению выхода свободной влаги (рис. 10 А). Интенсивность выделения свободной жидкости при рабочем вакууме 50 кПа после 4 минут прокачивания воздуха резко снижается и после 8 минут практически прекращается (рис. 10 Б).

Исследования показали, что после герметизации контейнера уплотнение силосуемой массы в мягких вакуумированных контейнерах при вакууме 40-55 кПа в течении 100 секунд позволяет довести измельченную массу до плотности 750-830 кг/м³, что соответствует зоотехническим требованиям.

С целью окончательного выбора рациональных значений параметров процесса приготовления силоса в мягких контейнерах был проведен многофакторный эксперимент. Для этого выбраны следующие переменные факторы (табл.1).

Таблица 1- Факторы и уровни их варьирования

	Влажность силосной массы, \tilde{x}_1 , %	Время откачивания воздуха, \tilde{x}_2 , мин.	Вакуумметрическое давление, \tilde{x}_3 , кПа
Основной уровень	70	5	40
Интервал варьирования	10	4	10
Верхний уровень	80	9	50
Нижний уровень	60	1	30

За параметры оптимизации у принят объем откаченной жидкости V , л и энергоемкость процесса откачивания жидкости E , кВт·ч/м³.

В результате обработки результатов многофакторного эксперимента получены адекватные уравнения регрессии. После раскодирования они имеют вид:

для количества жидкости, откаченной в результате осушения воздухом силосуемой массы

$$V = -5,9575 + 0,08875B - 0,42T + 0,118P + 0,00625B \cdot T + 0,0024T \cdot P - 0,001B \cdot P \quad (19)$$

для энергоемкости процесса откачивания жидкости из силосуемой массы в контейнере

$$E = -0,537 + 0,0273B + 0,0538T + 0,03338P - 0,00112B \cdot T + \\ + 0,00085T \cdot P - 0,00038B \cdot P \quad (20)$$

где B - влажность силосной массы, %; T - время откачивания воздуха, мин; P - вакуумметрическое давление в контейнере, кПа; V - количество полученной жидкости в результате вакуумирования силосной массы, л.

Графическое изображение поверхности отклика, характеризующие объем откачивающей жидкости из измельченной силосуемой массы и энергоёмкости процесса, представлены на рисунке 11.

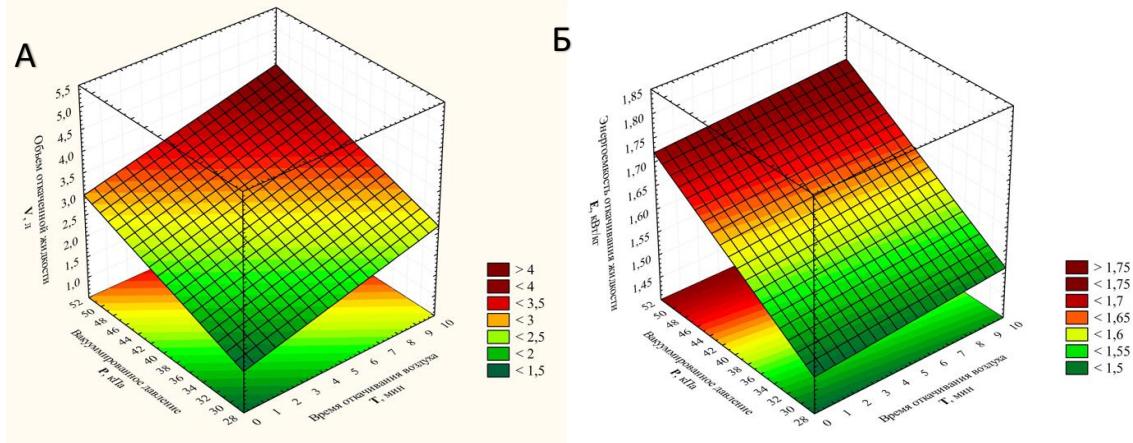


Рисунок 11 - Зависимость объема откаченной жидкости (А) и энергоемкости процесса (Б) от времени откачивания и вакуумированного давления

В программе «Statistica» методом переборки факторов были проанализированы результаты многофакторного эксперимента с целью выявления значений действующих факторов. Можно рекомендовать, при минимуме затраченного времени на процесс, следующие режимные параметры: $t = 6\text{--}7$ мин, $P = 48\text{--}50$ кПа, $E = 1,75\text{--}1,77$ кВт· ч/м³

Для проверки сходимости проведено сравнение теоретических исследований с результатами экспериментальных. На рисунке 12 представлены теоретические и экспериментальные зависимости времени вакуумирования мягкого контейнера с силосуемой массой после его герметизации. Вакуумирование в эксперименте производилось вакуумной системой передвижного агрегата АИД-1 ($Q=12\text{м}^3/\text{ч}$).

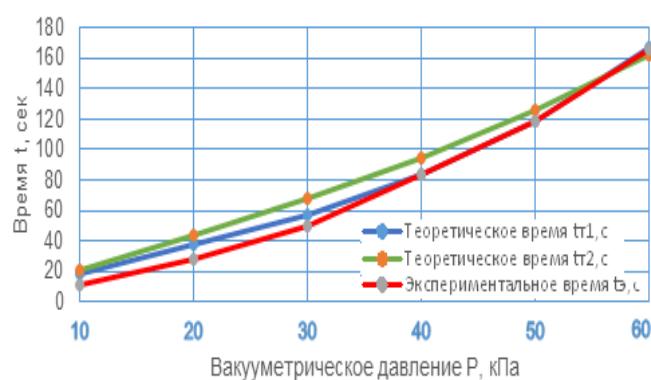


Рисунок 12 – Графические зависимости изменения времени вакуумирования t от вакуума P_h

Анализ данных рисунка показывают, что отклонения зависимостей теоретических от экспериментальных находятся в пределах допустимых погрешностей и не превышают 6%. Что позволяет их использовать при расчете.

В пятой главе «Исследование технологического процесса приготовления силоса в мягких контейнерах с устройством для отвода жидкости в производственных условиях, внедрение и расчет экономической эффективности» изложены программа, методика, результаты экспериментальных исследований в производственных условиях и расчет экономического эффекта от использования разработанного усовершенствованного процесса приготовления силоса в мягких контейнерах. Исследования проводились в ООО «Разбердеевское» Спасского района Рязанской области. Программа исследований предусматривала: приготовление силоса в мягких контейнерах со замером технологических параметров; закладку на хранение с качественной оценкой готового силоса; производственный эксперимент по поедаемости силоса животными.

Общий вид производственной установки для приготовления силоса в мягких контейнерах представлена на рисунке 13.



1 – контейнер; 2 – вакуумная установка; 3 – поддон

Рисунок 13 – Вид производственной установки

В результате производственного эксперимента по приготовлению силоса в мягких вакуумированных контейнерах показали работоспособность усовершенствованного процесса.

Зависимость времени осушения измельченной массы кукурузы с повышенной начальной влажностью около 75% при прокачивании воздуха при вакууме 50 кПа, полученная в ходе производственного эксперимента представлена на рисунке 14

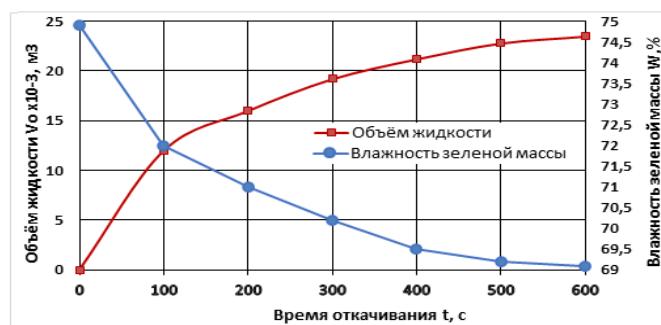


Рисунок 14 – Зависимости изменения объёма выведенной жидкости и влажности от времени осушения t

С увеличением времени прокачивания воздуха через массу кукурузы, размещенной в мягком контейнере количество выведенной жидкости,

увеличивается. После 6 минут процесса интенсивность извлечения жидкости падает и после 8 минут практически прекращается. При этом влажность растительной массы изменяется с 74,9 до 69,1%. Общий объём выведенной из заполненной в контейнер измельченной растительной массы составляет $23,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$. Энергоёмкость осушения по выведенной свободной жидкости составляет $2,8-3,9 \frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^3}$ до достижения влажности около 70%, необходимой при приготовлении силоса в мягких контейнерах.

Продолжительность вакуумирования контейнера с заложенной измельченной массой кукурузы в стадии восковой спелости, при рекомендуемом вакууме 50-55 кПа составляет 120-140 секунд. При этом силосуемая масса уплотняется до плотности 770-800 кг/м³, что выше нормативных требований к уплотнению силосной массы в траншеях 650-750 кг/м³. Дальнейшее уплотнение силосной массы не требуется. При этом энергоёмкость процесса вакуумирования контейнера по установленной мощности вакуумной установки составляет 0,045-0,053 $\frac{\text{Вт}\cdot\text{ч}}{\text{кг}}$ в расчете на массу приготовленного силоса в мягком контейнере. После вакуумирования контейнеров они закладывались в ангар для хранения с созреванием силоса.

Важнейшим результатом, полученным при производственных исследований усовершенствованного процесса, является отсутствие потерь силоса при его приготовлении и хранении. В результате исследований установлено, что полученный и хранившийся в мягких контейнерах кукурузный силос соответствует 1 классу.

Расчет экономической эффективности применения технологического процесса приготовления и хранения силоса в мягких контейнерах показал, что по сравнению с существующей технологией на производство 1,0 т силоса стоимость уменьшилась на 259875 рублей, срок окупаемости составит – 3,86 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа приготовления силоса разработан способ приготовления корма из переувлажненного сырья в мягких контейнерах, который предусматривает предварительное осушение с отводом сока и свободной влаги из закладываемой массы с последующей ее герметизацией и уплотнением.

2. Определены физико-механические свойства и размерные характеристики измельченной кукурузы с початками молочно-восковой и восковой спелости при влажности 60...73% для приготовления силоса в мягких контейнерах. При изменении частиц гранулометрического состава измельченной кукурузной массы от 7,5 до 22,5 мм её насыпная плотность уменьшается с 456 до 376 кг/м³, при этом пористость и коэффициент фильтрации увеличиваются соответственно с 45 до 61% и с $1,24 \cdot 10^{-4}$ до $1,593 \cdot 10^{-4}$ м/с.

При исходной влажности кукурузной массы в пределах 70%, длина резки стеблей должна быть 10...15 мм, при этом насыпная плотность растительной массы составит около 400 кг/м³, пористость 49...53%, коэффициент фильтрации $1,18 \cdot 10^{-4} \dots 1,68 \cdot 10^{-4}$ м/с.

3. Установлено, что кукуруза в период осадков (роса, дождь) способна накапливать на стеблях и листьях дополнительную свободную влагу. При средней длине стебля с листьями 2,05 м и массе 0,71 кг максимальное количество дополнительной влаги составляет 0,10 кг на один стебель, или до 0,142 кг воды на 1 кг массы кукурузы.

4. Теоретически установлено, а экспериментально подтверждено, что время осушения путем откачивания жидкости с воздухом из силосуемого сырья в мягком контейнере зависит от начального объема жидкости, объема конечного, определяющего оптимальную влажность сырья, площадей контейнера и физико-механических свойств сырья. Для достижения влажности силосуемой массы 70%, при значении вакуума 50 кПа максимальная длительность осушения составляет 600 секунд.

5. Продолжительность откачивания воздуха при вакуумировании мягкого контейнера с кукурузной массой зависит от её объема, безразмерного силового фактора, исходной и конечной плотности и производительности вакуумного насоса. Для достижения необходимой плотности силосуемого сырья 750...800 кг/м³ в контейнере объемом 1,0 м³ при диаметре сечения коллектора и трубопровода 0,02м, величине вакуума 50...60 кПа и производительности насоса 0,003-0,0042 м³/с продолжительность вакуумирования составит 120-160 с.

6. Производственная проверка усовершенствованного процесса приготовления силоса из переувлажненного сырья в мягких вакуумированных контейнерах с последующим хранением в них показала его работоспособность и эффективность. Установлено, что приготовленный и хранившийся в мягких контейнерах силос из кукурузы восковой спелости соответствует 1 классу качества.

При приготовлении силоса из переувлажненного сырья кукурузы восковой спелости в мягких контейнерах объемом 1,0 м³ массой 400 кг с исходной влажностью 74,9 % продолжительность удаления излишней жидкости до достижения влажности 69,1% составляет 480-540 с, а её объем - 23,5·10⁻³ м³. Продолжительность последующего вакуумирования контейнера с осушенной измельченной массой кукурузы при вакууме 50-55 кПа составляет 120-140 секунд. При этом удельная энергоёмкость процесса вакуумирования контейнера составляет 0,045-0,053 Вт · ч/м³.

Экономический эффект от внедрения усовершенствованного технологического процесса приготовления и хранения силоса в мягких контейнерах составит 259875 руб/т, срок окупаемости оборудования составит – 3.86 года.

Рекомендации производству:

Применение разработанного усовершенствованного процесса приготовления силоса в мягких вакуумированных контейнерах позволит приготавливать качественный силос из переувлажненного сырья сводя к минимуму негативные природные условия и повышая эффективность кормопроизводства на фермах.

Перспектива дальнейшей разработки темы: продолжить работу в направлении совершенствования процесса приготовления и хранения силосованного корма с применением вакуума, а также создания многоразовых

контейнеров с механизированной загрузкой силосуемого сырья, улучшения качества силоса при сокращении его потерь.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях рекомендованных ВАК РФ:

1. Результаты изучения поедаемости рациона коровами в ООО "Авангард" Рязанского района Рязанской области / Некрашевич В.Ф., Боронтова М.А., Антоненко Н.А. // Вестник ФГБОУ ВО РГАТУ – 2015. – № 3 (27). – С. 21-26.

2. Результаты определения количества воды на стеблях и листьях кукурузы после дождя/ Боронтова М.А. // Вестник ФГБОУ ВО РГАТУ – 2019. – № 1 (41). – С. 142-147.

3. Теоретические исследования процесса удаления жидкости из зеленой массы кукурузы при силосовании/ Боронтова М.А., Левин В.Д., Ульянов В.М., Утолин В.В. // Вестник аграрной науки Дона. 2024. Т. 17. № 2 (66). С. 22-31.

4. Ульянов, В. М. Исследование уплотнения зеленой массы при силосовании в контейнерах / В. М. Ульянов, В. В. Утолин, М. А. Боронтова // Вестник аграрной науки Дона. – 2025. – Т. 18, № 1(69). – С. 34-49. – DOI 10.55618/20756704_2025_18_1_34-49. – EDN GPTNKK.

В патентах на изобретения:

5. Контейнер из воздухонепроницаемой плёнки для силосования кормов. / Некрашевич В.Ф., Боронтова М.А., Хазимов М.Ж. // Патент на полезную модель RU 183627 U1, 28.09.2018. Заявка № 2018109596 от 19.03.2018.

6. Контейнер для приготовления и хранения силосованного корма. / Некрашевич В.Ф., Мамонов Р.А., Афанасьева К.С., Боронтова М.А., Хазимов М.Ж., Хазимов К.М., Сагындыкова Ж.Б.// Патент на полезную модель RU 193970 U1, 21.11.2019. Заявка № 2019104123 от 14.02.2019.

7. Способ приготовления и хранения силосованного корма. /Некрашевич В.Ф., Боронтова М.А. // Патент на изобретение RU 2683521 C1, 28.03.2019. Заявка № 2017143278 от 11.12.2017.

Статьи в изданиях, индексируемых международной глобальной базе Scopus:

8. Mixer for dry concentrated feed. *Ulyanov V., Utolin V., Luzgin N., Borontova M., Kiryanov A., Polunkin A.* В сб.: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 12th International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry, INTERAGROMASH 2019. 2019. С. 012143.

Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать лазерная

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Заказ №1681 подписано в печать 22.01.2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1

*Отпечатано в издательстве учебной литературы и учебно-методических пособий
ФГБОУ ВО РГАТУ*

390044, г. Рязань, ул. Костычева, 1