

Исследование уплотнения кормов в вакууме

Некрашевич В.Ф., Мамонов Р.А., Торженова Т.В., Воробьёва И.В.

Аннотация. В статье приводится краткий анализ результатов исследований в области приготовления и хранения силосованных кормов. Наиболее перспективным направлением развития технологии приготовления и хранения силоса, является силосование кормов в вакуумируемых контейнерах из воздухонепроницаемой пленки. Уплотнение корма в контейнере происходит за счёт собственного веса силосуемой массы и вакуумметрического давления. Теоретически обоснованно, что сверху контейнера действует только вакуумметрическое давление, а сбоку и снизу – разность между вакуумметрическим и соответственно боковым и осевым давлением. Практика применения вакуумируемых контейнеров при силосовании показала, что по всей поверхности получаемого монолита образуется уплотненный слой, препятствующий выходу из силосной массы сока и воздуха. Целью исследования являлось установление влияния вакуумметрического давления на выделение сока и уплотнение силосуемой массы. При пористости массы, приближающейся к нулю, плотность измельченной массы растений приближается к плотности их стеблей и дальнейшее уплотнение силосуемой массы не имеет смысла. Достаточным вакуумом при силосовании является 60 – 70 кПа. Плотность спрессованных монолитов силоса при этом составляет 700 – 800 кг/м³.

Ключевые слова: силос, контейнер, герметизация, вакуумирование.

Для цитирования: Некрашевич В.Ф., Мамонов Р.А., Торженова Т.В., Воробьёва И.В. Исследование уплотнения кормов в вакууме // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9. № 4. С. 40–45.

Investigation of feed compaction in vacuum

Nekrashevich V.F., Mamonov R.A., Torzhenova T.V., Vorobyova I.V.

Abstract. The article provides a brief analysis of the results of research in the field of preparation and storage of siloed feed. The most promising direction of development of the technology of preparation and storage of silage is the silage of feed in vacuum containers made of airtight film. Compaction of the feed in the container occurs due to its own weight of the silage mass and vacuum pressure. It is theoretically justified that only the vacuum pressure acts on top of the container, and the difference between the vacuum pressure and the lateral and axial pressure, respectively, acts on the side and bottom. The practice of using evacuated containers during silage has shown that a compacted layer forms over the entire surface of the resulting monolith, preventing juice and air from escaping from the silage mass. The aim of the study was to establish the effect of vacuum pressure on the release of juice and compaction of the silage mass. With the porosity of the mass approaching zero, the density of the crushed mass of plants approaches the density of their stems and further compaction of the silage mass does not make sense. Sufficient vacuum during silage is 60-70 kPa. The density of compressed silage monoliths is 700 – 800 kg/m³.

Keywords: silo, container, sealing, vacuuming.

For citation: Nekrashevich V.F., Mamonov R.A., Torzhenova T.V., Vorobyova I.V. Investigation of feed compaction in vacuum. Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]. 2022. Vol. 9. No. 4. pp. 40–45. (In Russ.).

Введение

Одним из важнейших кормов в составе рационов для сельскохозяйственных животных является силос. Достаточно сказать, что он составляет, например, для крупного рогатого скота до 40, а иногда и более процентов по питательности [1]. Основной культурой для приготовления силоса в настоящее время является кукуруза [2].

Анализируя современные способы силосования кормов, следует отметить ряд существенных недостатков при их применении. К ним относятся: большие затраты на строительство траншей и башен; большие потери силосной массы и питательных веществ, достигающие 10 – 25 % [1], а иногда и больше; большая закисленность силосной массы [3]. Большинство исследований посвящено вопросам биологии процесса силосования. Только в последние десятилетия начали заниматься изучением влияния вакуума на процесс силосования кормов [3, 4, 5]. Экструзия в вакуумной камере является перспективным способом переработки пищевого сырья [8].

Все существующие технологии связаны с механическим уплотнением силосуемой массы [1]. Нами предлагается технология с уплотнением силосуемой массы с помощью вакуума в контейнерах из воздухонепроницаемой пленки [7].

Сущность этой технологии заключается в следующем. Заготовка зеленой массы осуществляется обычным способом, то есть скашивание растений, измельчение их и погрузка измельченной массы в транспортные средства осуществляется кормоуборочным комбайном. В нашем случае измельченная масса загружается в специальный контейнер из воздухонепроницаемой пленки, который размещается в транспортном мешке, а тот в свою очередь размещается и подвешивается в кассете. Заполненный силосуемой массой контейнер сначала герметично закрывается, а затем из него вакуумным насосом откачивается воздух, то есть он вакуумируется. Контейнеры доставляются на хранение с использованием транспортных средств с манипуляторами. Корм хранится практически близко к безвоздушной среде.

Объекты и методы исследований

В качестве культуры для проведения опытов была взята кукуруза как наиболее применяемая в сельскохозяйственном производстве для силосования кормов. В связи с тем, что предлагается силосование осуществлять в герметичных контейнерах из воздухонепроницаемой пленки, то необходимо рассмотреть вопросы изменения плотности и пористости силосуемой массы в зависимости от первоначальной объемной массы измельченного корма, а также его уплотнения под действием собственного веса и вакуумметрического давления.

Плотность стеблей кукурузы определялась пикнометрическим способом, то есть срезанный стебель сначала взвешивался, затем опускался в мерную емкость с жидкостью и по разности объемов до и после погружения определялся объем стебля. Отношение массы стебля к объему даёт его плотность. Отношение массы измельченных частиц кукурузы к объему ёмкости, в которую они насыпаны, даёт их объёмную массу. Пористость π силосуемой массы определялась по формуле:

$$\pi = \frac{\rho - \gamma}{\rho} \quad (1)$$

где ρ – плотность стеблей кукурузы, кг/м³;

γ – объёмная масса частиц кукурузы, кг/м³.

Рассмотрим процесс уплотнения силосуемой массы в мягком контейнере под действием собственного веса материала и вакуума. Для упрощения теоретического исследования процесса применим принцип независимости действия сил, то есть рассмотрим отдельно уплотнение материала от собственного веса (рис. 1) и вакуума, а полученные результаты сложим [13].

На расстоянии X от верха контейнера на элементарный слой материала толщиной dX будут действовать давления:

P_x – осевое давление от собственного веса сверху;

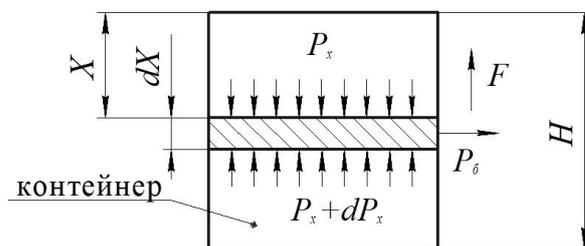


Рис. 1. Схема действующих давлений, вызывающих уплотнение материала от собственного веса

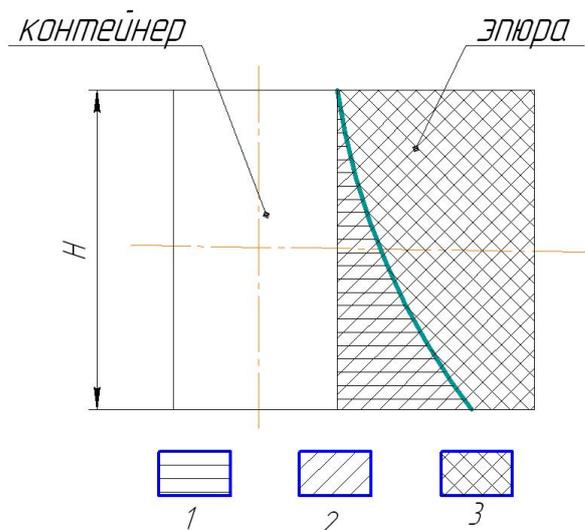


Рис. 2. Эпюра распределения давлений в контейнере с силосуемой массой на боковую грань при вакуумировании: 1 – эпюра бокового давления, 2 – эпюра вакуумметрического давления, 3 – результирующая эпюра

$P_x + dP_x$ – осевое давление от собственного веса снизу;

P_6 – боковое давление распора материала от собственного веса;

F – сила трения, возникающая от бокового давления.

Элементарная сила трения F определяется по формуле

$$F = fP_6PdX \quad (2)$$

где f – коэффициент трения материала о стенки контейнера;

P – периметр поперечного сечения контейнера.

Боковое давление, возникающее под действием собственного веса, определяется из выражения

$$P_6 = P_x \xi \quad (3)$$

где ξ – коэффициент бокового распора.

Напишем уравнение равновесия слоя материала в проекции на вертикальную ось контейнера

$$P_x S - (P_x + dP_x) S - f \xi P_x PdX = 0 \quad (4)$$

Сделав необходимые преобразования и разделив переменные, получим уравнение

$$\frac{dP_x}{P_x} = -f \xi PdX / S \quad (5)$$

где S – площадь поперечного сечения контейнера

Интегрируя левую часть уравнения в пределах от $P=0$ до P , а правую от 0 до X определим закон распределения осевого давления по высоте контейнера

$$P_x = Pe^{-f \xi PX / S}, \quad (6)$$

где P – осевое давление от собственного веса снизу, или

$$P_x = qgxe^{-f \xi PX / S}, \quad (7)$$

где q – плотность материала;

g – ускорение свободного падения.

Осевое давление сверху на массу будет равно нулю, а снизу определится по формуле

$$P_{сн} = qgHe^{-f \xi PH / S}, \quad (8)$$

где H – высота контейнера.

Для куба высота и длина ребра равны H , поэтому формула (8) примет вид

$$P_{сн} = qgHe^{-f \xi^4}. \quad (9)$$

Для монолитов цилиндрической формы и высотой H формула будет иметь вид

$$P_{сн} = qgHe^{-f \xi \pi 4H / d}, \quad (10)$$

где d – диаметр спрессованного монолита.

Рассмотрим уплотнение материала от воздействия вакуума. Величина вакуумметрического давления P_b на материал, определится по формуле

$$P_b = P_a - P_o, \quad (11)$$

где P_a – атмосферное давление;

P_o – остаточное давление воздуха в контейнере.

Поскольку вакуумметрическое давление действуют на все грани куба объемно и с одинаковой силой, а силы противоположных граней направлены навстречу друг другу и одинаковой величины, поэтому в центре куба давление от воздействия вакуума будет равно нулю.

На верхнюю грань куба при вакуумировании давление будет равно P_b , а на нижнюю грань определится по формуле

$$P_{обн} = P_b - qgae^{-4f \xi}. \quad (12)$$

Давление на боковые грани $P_{об}$ определится по формуле

$$P_{об} = P_b - qga \xi e^{-4f \xi}. \quad (13)$$

Таким образом, установлено, что на верхнюю грань действует только вакуумметрическое давление, на нижнюю разность давлений между вакуумметрическим и осевым давлением от силы тяжести, а на боковые грани – разность между вакуумметрическим давлением и давлением бокового распора и зависит от параметров контейнера, коэффициентов трения и бокового распора силосуемого материала, его плотности.

На рисунке 2 показана примерная эпюра распределения давлений на боковую грань от собственного веса материала и вакуумметрического давления. Из рисунка видно, что суммарное давление в нижней части контейнера уменьшается на величину давления бокового распора. Если $P_b < P$, то возможно истечение сока из спрессованного монолита, при $P_b > P$ истечение сока не наблюдается, что и происходит обычно на практике..

Результаты

Результаты опытов по определению плотности стеблей кукурузы с одним или двумя початками, или без них со средней длиной 2,08 м и массой 0,714 кг показали, что их плотность зависит от влажности и находится в пределах от 730 до 850 кг/м³ при соответствующей влажности от 63 до 74 %. Объёмная масса измельченных стеблей кукурузы, собранных с одного и того же поля, находилась при вышеуказанной влажности в пределах от 370 до 450 кг/м³.

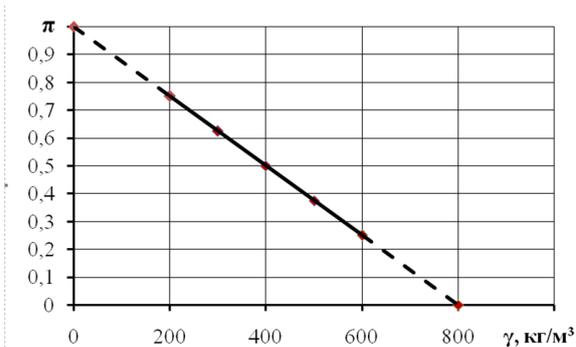


Рис. 3. Графическая зависимость пористости измельченных стеблей кукурузы от их объемной массы при плотности 800 кг/м³

Пористость силосуемой массы π в зависимости от плотности стеблей кукурузы, например, при её величине 800 кг/м³ показана на графической зависимости (рис. 3).

Из графической зависимости видно, что с увеличением объемной массы силосуемой культуры её пористость снижается. Проведенная штриховая линия слева указывают на то, что теоретически с приближением объемной массы к нулю её пористость приближается к единице. Проведенная штриховая линия справа указывает на то, что при приближении объемной массы корма к плотности самого стебля пористость приближается к нулю. Такое явление возможно только тогда, когда происходит уплотнение измельченной массы. Это свидетельствует о том, что из измельченной массы вытеснен весь воздух и нет смысла больше уплотнять силосуемую массу, так как при дальнейшем её уплотнении будут деформироваться сами частицы, выжиматься из них сок и ухудшаться качество корма.

Опыты в лабораторных и полевых условиях показали, что при воздействии в контейнере вакуума на силосуемую массу, на её поверхности возникает твердый слой, который препятствует выходу из сформированного монолита сока и воздуха. Происходит это в том случае, если осевое давление меньше вакуумметрического. Поэтому, чтобы сохранить сок в уплотненном монолите, следует повышать вакуумметрическое давление по мере увеличения высоты контейнера. Появление сока на дне контейнера может свидетельствовать и о том, что при слишком высоком вакууме происходит деформация частиц силосуемой массы и из них выжимается сок. Поэтому плотность силосованного корма нельзя увеличивать больше плотности самих стеблей. Она должна находиться в зависимости от силосуемой культуры в пределах от 680 до 820 кг/м³.

Результаты опытов по определению качества силоса из одной и той же массы кукурузы, убранной в одно время, показали, что силос в вакуумируемых контейнерах содержал на 21,9% больше протеина, на 20% больше каротина при pH 4,3 по сравнению с силосом, приготовленным в траншеях. Влажность силоса в вакуумированных контейнерах была несколько выше приготовленного в траншеях,

что подтверждает наши предположения о защемлении части сока в силосуемой массе при вакуумировании.

Обсуждение

Опыт показывает, что для успешного осуществления работ по приготовлению и хранению силоса в вакуумируемых контейнерах, комплекс машин должен содержать: кормоуборочные агрегаты, оборудование для приёма зеленой измельченной массы, оборудование для герметизации контейнеров и их вакуумирования, погрузки и доставки контейнеров в транспортных мешках к местам хранения.

Результаты исследований по определению пористости силосуемой массы показали, что при приближении пористости силосуемой массы к плотности стеблей, из которых она изготовлена, начинается деформация частиц, что приводит к выделению из них сока. Поэтому при вакуумировании силосуемой массы, с целью её уплотнения, нет смысла величину вакуума превышать больше допустимой.

Теоретически установлено, что уплотнение силосуемой массы под действием собственного веса подчиняется экспоненциальному закону и зависит от высоты насыпи в контейнере, коэффициентов трения и бокового распора. Уплотнение под действием вакуума действует объемно, в связи с чем в контейнере сверху уплотнённого монолита действует только вакуумметрическое давление, а снизу и с боков разность между вакуумметрическим давлением и соответственно осевым и боковым. На практике установлено, что при вакуумировании на поверхности монолита образуется уплотненный слой, препятствующий выходу из его середины сока и воздуха. При вакуумметрическом давлении ниже осевого возможен выход сока из середины монолита, что тоже подтверждается практикой.

Выводы

Таким образом, приведенный выше комплекс машин и оборудования позволяет вести заготовку измельченной зеленой массы, её загрузку в контейнеры из воздухонепроницаемой плёнки, герметизацию контейнеров и их вакуумирование, доставку контейнеров с силосом к местам хранения. Теоретически выявлено, что уплотнение силосуемой массы можно осуществлять как за счёт её собственного веса, так и при помощи вакуума. Установлено, что вести уплотнение измельченной силосуемой массы выше плотности самих стеблей не целесообразно из-за увеличения затрат энергии и повышенного выделения сока. Достаточным вакуумметрическим давлением для силоса из кукурузы является 60 – 70 кПа. При этом силос получается высокого качества.

Литература

- [1] Михалев, С. С. Кормопроизводство: учебное пособие / С. С. Михалев, Н. Н. Лазарев. — Москва : ИНФРА-М, 2020. — 288 с.
- [2] Боронтова, М.А. Результаты определения количества воды на стеблях и листьях кукурузы после дождя / М.А. Боронтова // Вестник РГАТУ, 2019, — № 1(41), — С. 142-147.
- [3] Ульянов, В.М. Вакуумированный контейнер с отводом жидкой фракции для приготовления и хранения силоса / В.М. Ульянов, М.А. Боронтова // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России: Материалы Национальной научнопрактической конференции 22 ноября 2018 года. — Рязань: Издательство Рязанского ГАУ, 2019. — Часть 1., — С. 448- 450.
- [4] Иванов, Д.В. Режимы и технические средства приготовления силосованных культур в упаковках с пониженным давлением газовой среды.: дис... канд. техн. наук (05.20.01)/ Иванов Дмитрий Владимирович; Ставропольский государственный аграрный университет. — Ставрополь, 2010. — 182 с.
- [5] Johnson, H.E., R.J. Merry, D.R. Davies, D.B. Kell, M.K. Theodorou and G.W. Griffith. 2005. Vacuum packing: a model system for laboratory-scale silage fermentations. *Journal of Applied Microbiology*.
- [6] Некрашевич, В.Ф. Приготовление и хранение силоса в мягких вакуумированных контейнерах из воздухонепроницаемой пленки / В.Ф. Некрашевич, И.В. Воробьёва, К.С. Афанасьева, М.А. Боронтова, А.Е. Белов // Кормопроизводство, 2017. — № 10. — С. 44-47.
- [7] Некрашевич, В.Ф. Использование вакуума при уплотнении силосуемой массы в контейнерах из воздухонепроницаемой плёнки / В.Ф. Некрашевич, А.С. Попов, К.С. Афанасьева. // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии, 2017. — №3. — С. 159-162.
- [8] Повышение эффективности обезвоживания экструдата в вакуумной камере модернизированного экструдера / Д. И. Фролов, А. А. Курочкин, П. К. Гарькина [и др.] // Нива Поволжья. — 2019. — № 2(51). — С. 134-143. — EDN BIRIFZ.

References

- [1] Mikhalev, S. S. Forage production: a textbook / S. S. Mikhalev, N. N. Lazarev. — Moscow : INFRA-M, 2020. — 288 p.
- [2] Borontova, M.A. Results of determining the amount of water on corn stalks and leaves after rain / M.A. Borontova // Bulletin of RGATU, 2019, — № 1(41), — P. 142-147.
- [3] Ulyanov, V.M. Vacuumed container with liquid fraction discharge for silage preparation and storage / V.M. Ulyanov, M.A. Borontova // Priority directions of scientific and technological development of the agro-industrial complex of Russia: Materials of the National Scientific and Practical Conference on November 22, 2018. — Ryazan: Publishing House of the Ryazan State Agrarian University, 2019. — Part 1., — P. 448- 450.
- [4] Ivanov, D.V. Modes and technical means of preparation of silage crops in packages with reduced pressure of the gas medium.: Ph.D. St. Stavropol State Agrarian University.. — Stavropol, 2010. — 182 p.
- [5] Johnson, H.E., R.J. Merry, D.R. Davies, D.B. Kell, M.K. Theodorou and G.W. Griffith. 2005. Vacuum packing: a model system for laboratory-scale silage fermentations. *Journal of Applied Microbiology*.
- [6] Nekrashevich, V.F. Preparation and storage of silage in soft vacuumed containers made of airtight film / V.F. Nekrashevich, I.V. Vorobyeva, K.S. Afanasyeva, M.A. Borontova, A.E. Belov // Feed production, 2017. — No. 10. — P. 44-47.
- [7] Nekrashevich, V.F. The use of vacuum when compacting the silo mass in containers made of airtight film / V.F. Nekrashevich, A.S. Popov, K.S. Afanasyeva. // Bulletin of the Ulyanovsk Agricultural Academy, 2017. — No. 3. — P. 159-162.
- [8] Improving the efficiency of extrudate dehydration in the vacuum chamber of a modernized extruder / D. I. Frolov, A. A. Kurochkin, P. K. Garkina [et al.] // Niva Povolzhya. - 2019. - No. 2 (51). - pp. 134-143. — EDN BIRIFZ.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Некрашевич Владимир Федорович доктор технических наук профессор ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет» 390044, Рязань, ул. Костычева, д. 1</p>	<p>Nekrasevich Vladimir Fedorovich D.Sc. in Technical Sciences professor Ryazan State Agrotechnological University</p>
<p>Мамонов Роман Александрович доктор технических наук профессор кафедры тылового обеспечения уголовно- исполнительной системы Академия ФСИН России 390000, Рязань, ул. Сенная, д. 1 Тел.: E-mail: mamonov.agrotexnol@yandex.ru</p>	<p>Mamonov Roman Alexandrovich D.Sc. in Technical Sciences professor at the department of logistic support of the penitentiary system The Academy of Law Management of the Federal Penitentiary Service of Russia Phone: E-mail: mamonov.agrotexnol@yandex.ru</p>
<p>Торженова Татьяна Владимировна кандидат экономических наук доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1 Тел.: E-mail: tanyatorg@yandex.ru</p>	<p>Torzhenova Tatiana Vladimirovna PhD in Economics associate professor at the department of economic security, analysis and accounting Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin Phone: E-mail: tanyatorg@yandex.ru</p>
<p>Воробьёва Ирина Викторовна кандидат биологических наук ассистент кафедры микробиологии ФГБОУ ВО «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации 390026 г. Рязань, ул. Высоковольная, д. 9 Тел.: E-mail: francais64@mail.ru</p>	<p>Vorobeva Irina Viktorovna PhD in Biology assistant of the department microbiology Ryazan State Medical University Phone: E-mail: francais64@mail.ru</p>