

УДК 664.724

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ПРИ ХРАНЕНИИ КОРМОВ В РУКАВЕ**

Чернышев Алексей Дмитриевич

Доцент кафедры

РИНЦ SPIN-код= 5899-2853

*Рязанский институт (филиал) Московского Политехнического университета, Рязань, Россия*

Костенко Михаил Юрьевич

д.т.н., профессор

РИНЦ SPIN-код= 2352-0690

*Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия*

Кирюхин Евгений Андреевич

Аспирант

РИНЦ SPIN-код= 9708-3194

*Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия*

Ремболович Георгий Константинович

д.т.н., профессор

РИНЦ SPIN-код= 9656-2331

*Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия*

Безносюк Роман Владимирович

к.т.н., доцент

РИНЦ SPIN-код= 1616-3982

*Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, Рязань, Россия*

Вопрос хранения кормов в настоящее время стоит особенно остро. Известен способ хранения в герметичных упаковках. Особый интерес представляют процессы, протекающие внутри замкнутого контура упаковки. Установлено, что в процессе хранения происходит окисление продуктов, дыхание, которое снижает содержание кислорода и увеличивает содержание углекислого газа. Рассмотрен процесс дыхания компонентов кормов, в том числе зерна. Дыхание зерна меняет состав газовой среды в межзерновом пространстве, таким образом, содержание углекислого газа увеличивается, а кислорода падает. Выделение углекислого газа в объеме от 60 л до 120 л сопровождается потерей массы зерна в 1 кг. Значительное количество воды, которое выделяется при дыхании,

УДК 664.724

4.3.1. Technologies, machines, and equipment for the agro-industrial complex

## **FEATURES OF GAS ENVIRONMENT FORMATION DURING FEED STORAGE IN A SLEEVE**

Chernyshev Alexey Dmitrievich

Associate Professor of the Department

RSCI SPIN-code= 5899-2853

*Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russia*

KostenkoMikhailYurievich

Dr.Sci.Tech., professor

RSCI SPIN-code= 2352-0690

*Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

Kiryukhin Evgeny Andreevich

Graduate student

RSCI SPIN-code= 9708-3194

*Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

Rembalovich George Konstantinovich

Dr.Sci.Tech., professor

RSCI SPIN-code= 9656-2331

*Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

Beznosyuk Roman Vladimirovich

Cand.Tech.Sci., associate professor

RSCI SPIN-code= 1616-3982

*Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Ryazan, Russia*

The issue of feed storage is currently particularly acute. A known method of storage is in sealed packages. Of particular interest are the processes occurring inside the closed packaging circuit. It has been established that during the storage process, oxidation of products occurs, respiration, which reduces the oxygen content and increases the carbon dioxide content. The process of respiration of feed components, including grain, is considered. Grain respiration changes the composition of the gas environment in the inter-grain space, thus increasing the carbon dioxide content and decreasing the oxygen content. The release of carbon dioxide in a volume of 60 to 120 liters is accompanied by a loss of grain mass of 1 kilogram. A significant amount of water that is released during breathing is released as vapor and condenses

выделяется в виде пара и конденсируется на охлажденных поверхностях. Состав газовой смеси меняется при дыхании и окислении продуктов, что вызывает изменение средней молярной массы газовой смеси. Исследуя скважистость продукта, следует отметить, что она зависит от формы, размеров, упругости и состояния поверхности частиц корма; состава и количества примесей; влажности кормов; упругости пленки герметичной упаковки. Исследована зависимость средней молярной массы сухой газовой смеси от массовой доли углекислого газа. Установлено, что при повышении количества углекислого газа в окружающей среде, при хранении зерна, общая масса газовой смеси значительно увеличивается. Анализ зависимости средней молярной массы влажной газовой смеси от массового влагосодержания можно позволил установить, что при понижении количества углекислого газа в рукаве, общая масса влажной газовой смеси значительно увеличивается. Это обусловлено возникновением реакции между углекислотой и влагой, находящейся непосредственно в продукте хранения. Кроме того в результате исследования установлено, что при увеличении температуры внешней среды, давление газовой смеси в полиэтиленовом рукаве увеличивается

**Ключевые слова:** УПАКОВЫВАНИЕ ЗЕРНА, ХРАНЕНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОВ, ГАЗОВЫЕ СМЕСИ, ПОЛИЭТИЛЕНОВЫЕ РУКАВА, УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-213-035>

on cooled surfaces. The composition of the gas mixture changes during breathing and oxidation of products, which causes a change in the average molar mass of the gas mixture. When studying the product's porosity, it should be noted that it depends on the shape, size, elasticity, and surface condition of the feed particles; the composition and quantity of impurities; the moisture content of the feed; and the elasticity of the sealed packaging film. The dependence of the average molar mass of the dry gas mixture on the mass fraction of carbon dioxide has been studied. It has been established that as the amount of carbon dioxide in the environment increases during grain storage, the total mass of the gas mixture significantly increases. An analysis of the dependence of the average molar mass of a moist gas mixture on the mass moisture content has shown that as the amount of carbon dioxide in the sleeve decreases, the total mass of the moist gas mixture increases significantly. This is due to the reaction between carbon dioxide and the moisture present in the storage product. Additionally, the study has revealed that as the external temperature increases, the pressure of the gas mixture in the polyethylene sleeve also increases

**Keywords:** GRAIN PACKAGING, STORAGE, GAS CHARACTERISTICS, GAS MIXTURES, POLYETHYLENE SLEEVES, CARBON DIOXIDE

## Введение

При хранении кормов в герметичной упаковке термодинамическая система в течении большего времени является закрытой. Термодинамическая система взаимодействует с окружающей средой посредством изменения температуры, давления. Однако значительная часть процессов происходит внутри упаковки: меняется газовый состав смеси, ее давление, влажность и другие параметры.

В период закладки на хранение состав газовой среды в упаковке соответствует составу атмосферного воздуха (таблица1).

Таблица 1 — Состав осушённого воздуха атмосферы (компонентов с наибольшим содержанием)

Вещество	Обозначение	По объёму, %	По массе, %
Азот	N <sub>2</sub>	78,084	75,5
Кислород	O <sub>2</sub>	20,946	23,15
Аргон	Ar	0,934	1,292
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	0,03	0,046
Неон	Ne	0,001818	0,0014
Криптон	Kr	0,000114	0,0003
Метан	CH <sub>4</sub>	0,0002	0,000084
Гелий	He	0,000524	0,000073
Водород	H <sub>2</sub>	0,00005	0,00008
Ксенон	Xe	0,0000087	0,00004
Другие			0,007323

В процессе хранения происходит окисление продуктов, дыхание, которое снижает содержание кислорода и увеличивает содержание углекислого газа. При окислении питательных веществ, например, глюкозы в зависимости от содержания кислорода процесс может идти следующим образом. При достаточном количестве кислорода процесс окисления углеводов происходит согласно формуле 1.



Выделение углекислого газа в условия нормальной влажности зерна происходит достаточно медленно, в течении месяца содержание углекислого газа редко превышает 3%, а кислорода не менее 15% [1]. С

увеличением влажности процесс окисления идет значительно быстрее, например, при влажности кормов более 40% уже за сутки содержание кислорода снижается менее 1%, а содержание углекислого газа повышается более 10% [2]. В этом случае разложение углеводов происходит при отсутствии кислорода на молочную, уксусную и масляную кислоты, а также спирты. Основываясь на базовых знаниях химических реакциях, в формулах 2, 3, 4, представлены молочнокислое, спиртовое и маслянокислое брожения.

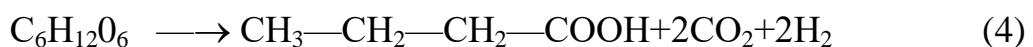
Как видно из формулы 2, конечным продуктом молочнокислого брожения выступает молочная кислота, получаемая в результате воздействия ферментов на глюкозу.



Продуктом спиртового брожения представленного в формуле 3 является этанол который получается в результате биохимического процесса между углеводами и микроорганизмами (дрожжами).



В формуле 4 представлена реакция маслянокислого брожения происходящего под действием бактерий рода Clostridium.



Процесс разложения и сбраживания углеводов называется ферментацией, которая способствует переходу питательных веществ в более доступные формы. Масляная кислота образуется при избыточном количестве влаги и является нежелательным процессом. Герметичность упаковки кормов и других продуктов в подобных условиях способствует меньшему выделению тепла и сохранности продукта без доступа кислорода. При ферментации выделяется меньшее количество теплоты, чем при окислении, в то же время выделяется значительное количество влаги. В тоже время избыток углекислого газа при наличии воды ведет к

образованию слабой угольной кислоты, которая растворяет жиры и белки, снижая питательную ценность кормов [3].

### **Материалы исследования**

Рассмотрим процесс дыхания компонентов кормов на примере зерна, как наиболее изученного процесса изменения газовой среды в герметичной упаковке. Дыхание зерна меняет состав газовой среды в межзерновом пространстве, таким образом содержание углекислого газа увеличивается, а кислорода падает. Выделение углекислого газа в объеме от 60 л до 120 л сопровождается потерей массы зерна в 1 кг. Значительное количество воды, которое выделяется при дыхании, выделяется в виде пара и конденсируется на охлажденных поверхностях. Состав газовой смеси меняется при дыхании и окислении продуктов, что вызывает изменение средней молярной массы газовой смеси. При достаточном количестве кислорода (аэробное дыхание) разложение крахмала (глюкозы) происходит при поглощении кислорода и выделении углекислого газа в равных объемах.

$$V_{CO_2} = V_{O_2} \quad (5)$$

Рассчитаем параметры парогазовой смеси, находящейся в герметичном мягком контейнере. Количество парогазовой смеси определяется скважистостью продукта. Скважистость — это отношение объема скважин, к общему объему зерновой массы

$$S = \frac{V_n - V}{V_n} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $S$  — скважистость, %;

$V_n$  — полный объем массы зерна,  $\text{см}^3$ ;

$V$  — истинный объем зерен,  $\text{см}^3$ .

Форма и размер скважин межзерного пространства определяет газопроницаемость продукта, сопротивление движению газовой среды и сорбционные свойства. Скважистость продукта зависит от формы, размеров, упругости и состояния поверхности частиц корма; состава и количества примесей; влажности кормов; упругости пленки герметичной упаковки (таблица 2) [4].

Таблица 2 – Пределы изменений насыпной плотности и скважистости зерновых культур

Культура	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скважистость, %
Овес	300...550	70...50
Ячмень	480...680	55...45
Кукуруза	600...850	55...35
Пшеница	730...850	45...35

Парогазовая смесь в герметичной упаковке состоит из  $n$  компонентов. Состав газовой многокомпонентной смеси оценим на основе объёмных долей ( $\varphi$ ), молярных ( $x$ ) и массовых ( $\omega$ ).

При температуре около 20<sup>0</sup>С, влажности 60% и давлении 101325 Па средняя молярная масса воздуха равна 29 г/моль [5]. Интерес представляет влияние средней молярной массы сухой газовой смеси на хранение зерна в закрытой, герметичной упаковке.

## Результаты исследования

Определим среднюю молярную массу сухой газовой смеси в программе Mathcad и построим график зависимости.

Анализируя графическую зависимость (рисунок 1) видно, что увеличение массовых долей углекислого газа ведет к увеличению средней молярной массы газовой смеси.

Объёмные доли сухой газовой смеси находим по формуле 10 с учетом парциального давления водяного пара.

$$\phi_g = \frac{P_g}{P} = \frac{P - P_n}{P}, \quad (10)$$

где  $P_g$  – парциальное давление сухой газовой смеси;

$P_n$  – парциальное давление водяного пара;

$P$  – давление смеси сухой газовой среды и водяного пара (по закону Дальтона  $P=P_g+Pn$ ).

Учитывая аналогичные факторы, из формулы 11 можно определить объемную долю водяного пара.

$$\phi_n = \frac{P_n}{P}, \quad (11)$$

На основе полученных данных, из формул 10 и 11, в приложении Mathcad был построен график зависимости средней молярной массы сухой газовой смеси от массовой доли углекислого газа (рисунок 1).

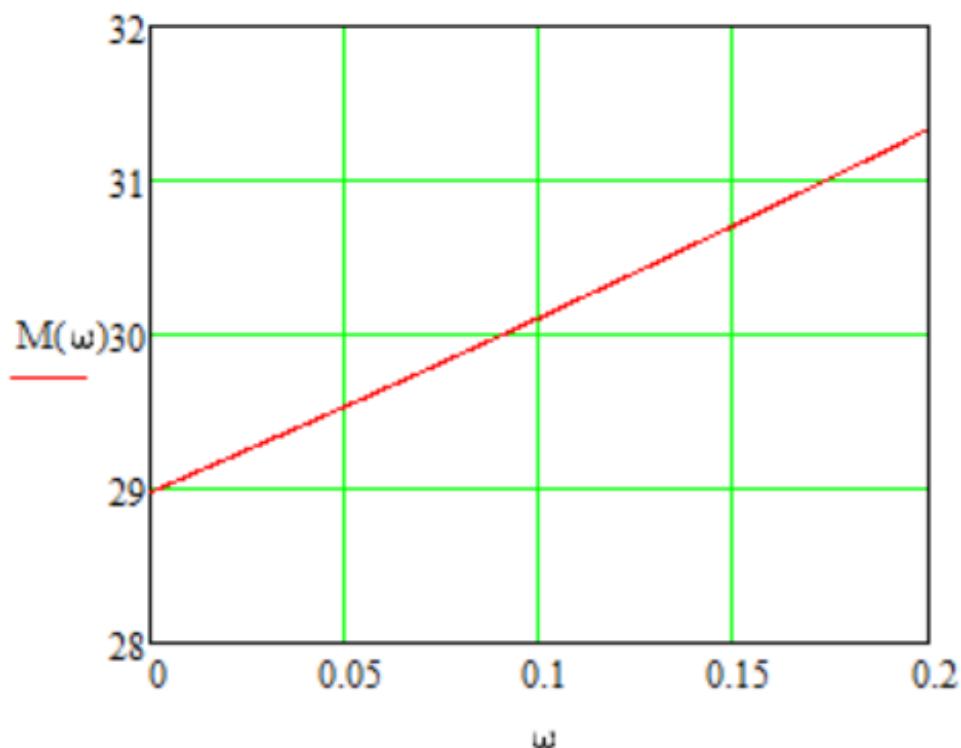


Рисунок 1 – График зависимости средней молярной массы сухой газовой смеси от массовой доли углекислого газа

Анализируя график зависимости средней молярной массы сухой газовой смеси от массовой доли углекислого газа можно сделать вывод, что при увеличении количества углекислого газа в рукаве, при хранении зерна, общая масса газовой смеси значительно увеличивается.

Зная относительную влажность газовой среды и рассчитав объемные доли, можно определить среднюю молярную массу влажной газовой смеси, результат представлен в формуле 12.

$$M_{cp} = M_r \phi_r + M_n \phi_n = 28,96 \frac{P - P_n}{P} + 18,06 \frac{P_n}{P} = 28,96 - 10,94 \frac{P_n}{P}, \quad (12)$$

Массовое влагосодержание можно представить в соотношения (кг пара/ кг газовой смеси)

$$d = \frac{\omega_n}{\omega_r}, \quad (13)$$

С другой стороны, влагосодержание зависит от парциальных давлений

$$d = 0,622 \frac{P_n}{P - P_n}, \quad (14)$$

Выразив, получим

$$\frac{P_n}{P} = \frac{d}{(d+0,622)}, \quad (15)$$

Подставив в выражении (12), получим

$$M_{cp} = 28,96 - 10,94 \frac{d}{(d+0,622)}, \quad (16)$$

Величину влагосодержания возможно определить на основе диаграммы влагосодержание-энталпия. Построим в программе Mathcad график зависимости средней молярной массы влажной газовой смеси от массового влагосодержания (рисунок 2)

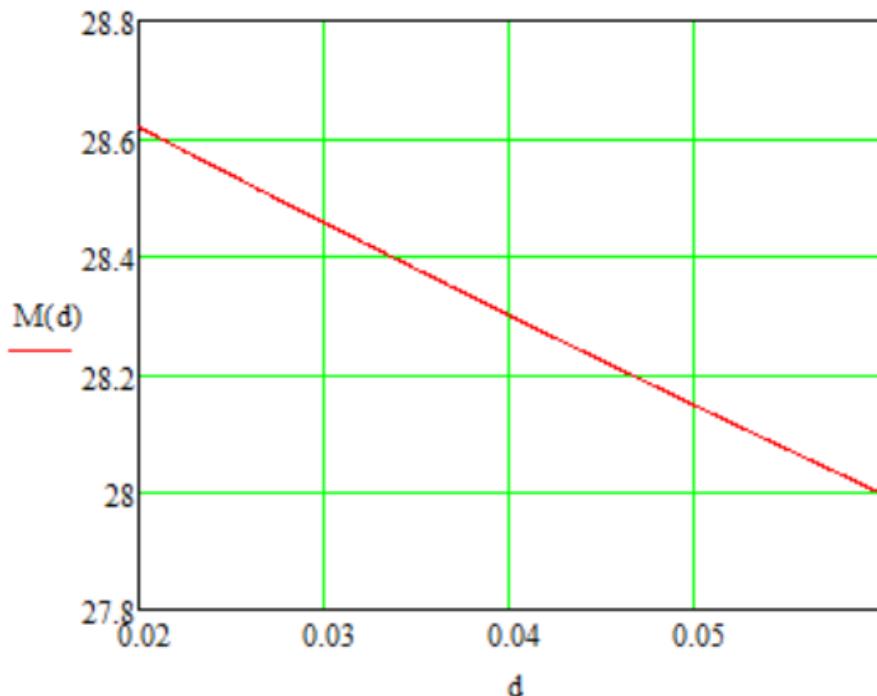


Рисунок 2 – График зависимости средней молярной массы влажной газовой смеси от массового влагосодержания

Анализируя график зависимости средней молярной массы влажной газовой смеси от массового влагосодержания можно сделать вывод, что при понижении количества углекислого газа в рукаве, общая масса влажной газовой смеси значительно увеличивается. Это происходит благодаря тому, что углекислота вступает в реакцию с влагой, находящейся непосредственно в продукте хранения, и преобразуется в угольную кислоту.

Допустим, что реальные газы при невысоких давлениях и обычных температурах можно рассматривать как идеальные. Тогда параметры

парогазовой среды можно анализировать на основе уравнения Менделеева-Клапейрона.

Определим массу парогазовой среды  $m_{газ.с.}$ , (кг) из уравнения 17. В результате преобразования выведена формула 18.

$$P \cdot V_r = \frac{m_{газ.с.} \cdot R \cdot T}{M_{cp}}, \quad (17)$$

$$m_{газ. см.} = \frac{P \cdot V_p \cdot S \cdot M_{cp}}{R \cdot T \cdot 100\%}, \quad (18)$$

где  $m_{газ.с.}$  — масса газовой среды в рукаве, г;

$V_e$  — общий объем газовой среды, м<sup>3</sup>;

$R$  — универсальная газовая постоянная,  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ;

$T$  — температура закладки на хранение, К;

$S$  — скважистость, %;

$V_p$  — общий объем рукава для хранения кормов, м<sup>3</sup>.

Исходными данными газовой среды при хранении зерна пшеницы являются  $T = 293$  К,  $P = 101300$  Па, объем рукава  $V_p = 320$  м<sup>3</sup>

$$m_{газ. с.} = \frac{101300 \text{ Па} \cdot 41,54\% \cdot 320 \text{ м}^3 \cdot 28,0 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{8314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К} \cdot 100\%} = 154,78 \text{ кг}$$

Выразим величину давления в рукаве от температуры

$$P = \frac{m_{газ. с.} \cdot R \cdot T \cdot 100\%}{V_p \cdot S \cdot M_{cp}}, \quad (19)$$

Построим в программе Mathcad график зависимости давления в рукаве от температуры (рисунок 3).

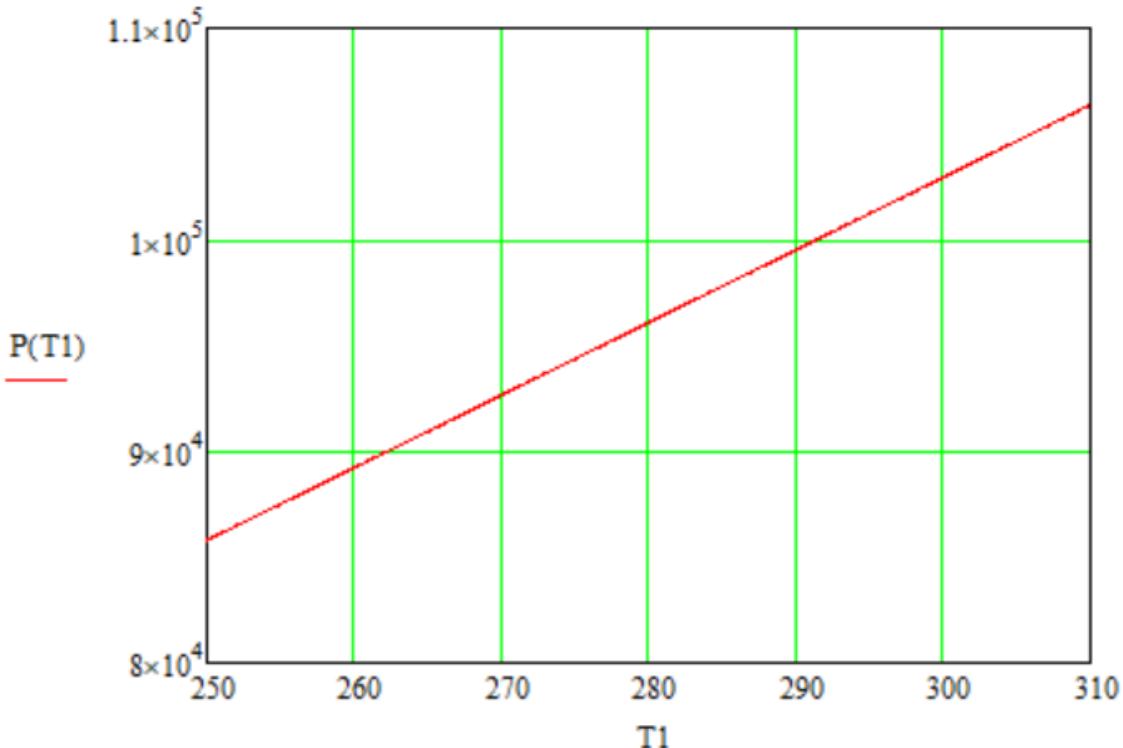


Рисунок 3 – График зависимости давления газовой смеси от температуры внутри рукава для хранения кормов

Согласно графику зависимости давления газовой смеси от температуры внутри можно сделать вывод, что при увеличении температуры внешней среды, давление газовой смеси в полиэтиленовом рукаве увеличивается. Избыточное давление и высокая температура негативно сказывается на сроке хранения зерна, при высокой температуре происходит активное дыхание зерна и развитие патогенной микрофлоры.

Определим массу углекислого газа ( $CO_2$ ) в газовой смеси из выражения 20

$$m(CO_2) = \omega(CO_2) \cdot m_{\text{газ. с.}} \quad (20)$$

Масса углекислого газа при необходимом содержании 5% составит

$$m(CO_2) = 0,05 \cdot 154,78 \text{ кг} = 7,74 \text{ кг}$$

## Заключение

На хранение зерна в полиэтиленовом рукаве влияет массовая доля углекислого газа. Установлено, что при увеличении температуры внешней среды, давление газовой смеси в закрытой, герметичной упаковке увеличивается. Изменение давления внутри рукава даже при небольших нарушениях герметичности ведет к инфильтрации атмосферного воздуха, и снижает качество хранения зерна в рукаве. При заполнении рукавов с зерном углекислым газом до 2-3% концентрации углекислого газа позволит уменьшить потери. Теоретические расчеты показывают, что мониторинг давления газовой среды в рукавах на основе сравнения давления, необходимо проводить при разных погодных условиях и температурных режимах, что позволит оценить состояние газовой среды в рукавах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение качества хранения кормов и сельскохозяйственной продукции в герметичных рукавах / Г. К. Ремболович, М. Ю. Костенко, Р. В. Безносюк [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 152-157. – DOI 10.36508/RSATU.2023.25.37.021. – EDN NADWBE.
2. Чернышев, А. Д. Особенности формирования газовой среды при хранении сенажа в агрострейч пленке / А. Д. Чернышев, М. Ю. Костенко, Г. К. Ремболович // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2023. – № 191. – С. 228-237. – DOI 10.21515/1990-4665-191-032. – EDN EHJGRU.
3. Чернышев, А. Д. Совершенствование упаковки сельскохозяйственных продуктов в газомодифицированных средах / А. Д. Чернышев, М. Ю. Костенко // Инновационный вектор развития отечественного АПК : Материалы III Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Н.В. Бышова, Рязань, 23 ноября 2023 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет, 2023. – С. 198-202. – EDN IDEQXI.
4. Чернышев, А. Д. Совершенствование упаковки комбикорма для хранения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чернышев Алексей Дмитриевич. – Рязань, 2023. – 156 с. – EDN PRVRQZ.
5. The effect of alcohol on the preservation of the nutritional value of the haylage when it is packed in agrostretch film / A. D. Chernyshev, M. Y. Kostenko, N. A. Antonenko [et al.] // E3s web of conferences : IX International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Namangan, Uzbekistan, 26

октября – 03 2023 года. – EDP Sciences - Web of Conferences: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. – P. 01009. – DOI 10.1051/e3sconf/202448601009. – EDN EIXMOV.

### **LIST OF LITERATURE**

1. Povyshenie kachestva hranenija kormov i sel'skohozjajstvennoj produkci v germetichnyh rukavah / G. K. Rembalovich, M. Ju. Kostenko, R. V. Beznosjuk [i dr.] // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2023. – T. 15, № 4. – S. 152-157. – DOI 10.36508/RSATU.2023.25.37.021. – EDN NADWBE.
2. Chernyshev, A. D. Osobennosti formirovaniya gazovoj sredy pri hranenija senazha v agrostrejch plenke / A. D. Chernyshev, M. Ju. Kostenko, G. K. Rembalovich // Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – № 191. – S. 228-237. – DOI 10.21515/1990-4665-191-032. – EDN EHJGRU.
3. Chernyshev, A. D. Sovershenstvovanie upakovki sel'skohozjajstvennyh produktov v gazomodificirovannyh sredah / A. D. Chernyshev, M. Ju. Kostenko // Innovacionnyj vektor razvitiya otechestvennogo APK : Materialy III Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashchennoj pamjati doktora tehnicheskikh nauk, professora N.V. Byshova, Rjazan', 23 nojabrja 2023 goda. – Rjazan': Rjazanskij gosudarstvennyj agrotehnologicheskij universitet, 2023. – S. 198-202. – EDN IDEQXI.
4. Chernyshev, A. D. Sovershenstvovanie upakovki kombikorma dlja hranenija: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheskikh nauk / Chernyshev Aleksej Dmitrievich. – Rjazan', 2023. – 156 s. – EDN PRVRQZ.
5. The effect of alcohol on the preservation of the nutritional value of the haylage when it is packed in agrostretch film / A. D. Chernyshev, M. Y. Kostenko, N. A. Antonenko [et al.] // E3s web of conferences : IX International Conference on Advanced Agrotechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development, Namangan, Uzbekistan, 26 oktyabrya – 03 2023 goda. – EDP Sciences - Web of Conferences: EDP Sciences - Web of Conferences, 2024. – P. 01009. – DOI 10.1051/e3sconf/202448601009. – EDN EIXMOV.