

Тип статьи: научная
УДК 631.3
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-3-53-60

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА И РЕЖИМОВ ХРАНЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ В РАЗРЕЖЕННОЙ СРЕДЕ

*Надежда Михайловна Латышенок*¹, *Александр Владимирович Шемякин*²,
*Валентин Алексеевич Макаров*³

^{1,2,3} Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева,
г. Рязань, Российская Федерация
³ va_makarov@rambler.ru

Автор ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Макаров, va_makarov@rambler.ru
Corresponding author: Valentin Makarov, va_makarov@rambler.ru

Реферат. Проведенными исследованиями установлено, что большую часть времени семенное зерно находится в режиме хранения в соответствующих ёмкостях (мешках, контейнерах). Выявлено, что в режиме хранения в герметичных контейнерах идёт процесс удаления накапливающегося углекислого газа с одновременным обновлением воздушной среды из окружающего воздуха. Система обмена воздушной среды происходит в режиме аэрации с компонентами азота, кислорода, аргона, гелия, водорода, паров воды и т.д. для которых рассмотрены молекулярные массы и теоретически обоснована средняя молярность массы воздушной смеси. Рассмотрено влияние различных факторов на значение средней массы воздушной смеси. Установлены математические зависимости общего объёма содержимого в герметичном контейнере, состоящего из объёма зерновой массы и объёма в межзерновом пространстве, от скважности, формы зерна и его засорённости. Получена графическая зависимость воздушной массы от доли кислорода, демонстрирующая, с уменьшением содержания кислорода в молярной массе смеси возрастает доля углекислого газа. При расчёте накопителя углекислого газа, последний рассматривается как идеальный газ, для которого можно использовать уравнение Менделеева – Клапейрона, получена формула для определения его давления в герметичной ёмкости по соответствующей зависимости. Для определения зависимости изменения массы воздушной смеси от скважности и разреженности внутри ёмкости получено математическое обоснование изменения воздушной массы в ёмкости от скважности и степени разряжения воздушной среды в одном м³ ёмкости. На основании проведенных исследований делается соответствующее заключение с требованиями к устройству для хранения зерновой массы в разреженной воздушной среде.

Ключевые слова: зерно, ёмкость хранения, разряженная среда, компоненты смеси.

SUBSTANTIATION OF THE STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND MODES OF GRAIN STORAGE IN A DISCHARGED ENVIRONMENT

*Nadezhda Latyshonok*¹, *Alexander Shemyakin*², *Valentin Makarov*³

^{1,2,3} Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev,
Ryazan, Russian Federation
³ va_makarov@rambler.ru

Abstract. The research has established that most of the time, seed grain is stored in appropriate containers (bags, containers). It was revealed that during storage in sealed containers, the process of removing accumulated carbon dioxide occurs while simultaneously renewing the air environment from the surrounding air. The air exchange system occurs in aeration mode with the components of nitrogen, oxygen, argon, helium, hydrogen, water vapor, etc. for which the molecular masses are considered and the average molarity of the mass of the air mixture is theoretically justified. The influence of various

factors on the value of the average mass of the air mixture is considered. Mathematical dependencies for the total volume of contents in a sealed container have been established, consisting of the volume of the grain mass and the volume in the intergrain space, from the porosity, the shape of the grain and its contamination. A graphical dependence of the air mass on the proportion of oxygen was obtained, demonstrating that with a decrease in the oxygen content in the molar mass of the mixture, the proportion of carbon dioxide increases. When calculating a carbon dioxide storage tank, the latter is considered as an ideal gas, for which the Mendeleev-Cliperon equation can be used, and a formula is obtained for determining its pressure in a sealed container using the corresponding dependence. To determine the dependence of the change in the mass of the air mixture on the duty cycle and rarefaction inside the container, a mathematical justification was obtained for the change in the air mass in the container on the duty cycle and the degree of rarefaction of the air in one m³ of the container. The corresponding conclusion with the requirements for a device for storing grain mass in a rarefied air environment is made based on the research carried out.

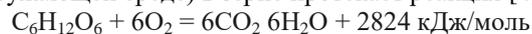
Keywords: grain, storage capacity, discharged medium, components of the mixture.

Для цитирования: Латышенок Н.М., Шемякин А.В., Макаров В.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров устройства и режимов хранения зерновых в разряженной среде // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 69, № 3. С. 53-60. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-53-60>.

For citation: Latyshonok N., Shemyakin A., Makarov V. Substantiation of the structural and technological parameters and modes of grain storage in a discharged environment. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 69(3): 53-60. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-3-53-60>.

Введение. Свежеубранное зерно, как правило, используется после длительного периода хранения. Сохранность зерна зависит от его чистоты, качества защиты от вредителей, температуры и влажности. Традиционно используют три основных режима хранения зерна в состоянии: сухом, охлажденном, без доступа воздуха или в газовой среде. Многочисленными исследованиями выявлено, что технология хранения семенного зерна в герметичной емкости всегда проходит в двух режимах: без вентиляции и с вентиляцией (аэрацией) межзернового пространства в ёмкости хранилища [1,2, 3]. В режиме «хранения» устройство находится большую часть времени. Характерной особенностью этого режима является постоянное изменение состава воздушной смеси, находящейся в рабочем объеме зернохранилища, за счет расходования кислорода на аэробное дыхание семенного зерна и насыщения углекислым газом, который является продуктом жизнедеятельности семян. Изменения, происходящие при хранении семенного зерна без вентиляции, не требуют дополнительного поступления энергетических и других затрат из окружающей среды и поэтому можно считать, что режим «хранения» представляет собой закрытую термодинамическую систему.

В период хранения из-за взаимодействия физических, химических и биологических факторов зерно может портиться из-за нежелательного воздействия биологических организмов (гниение, порча насекомыми, грибами, грызунами) и саморазогрева. Основные потери зерна при хранении зависят от температуры и влажности, как самого зерна, так и окружающей среды, поэтому важно обеспечивать определенную температуру, проветривание и влажность. При организации хранения зерна необходимо учитывать некоторые физические (например, скважистость, сыпучесть, гигроскопичность, теплопроводность и др.) и биологические (например, дыхание) свойства, значение которых зависит в основном от условий окружающей среды. Клетки зерна во время дыхания обеспечиваются энергией за счет кислорода окружающей среды. При аэробном дыхании (достаточно кислорода в окружающей среде) в зерне протекает реакция [4]:



В процессе аэробного дыхания семян в контейнере состав воздуха в межзерновом пространстве постоянно меняется, при этом содержание углекислого газа увеличивается, а кислорода – уменьшается.

При анаэробном дыхании (недостатке кислорода происходит спиртовое брожение:



В период хранения зерна должны быть созданы условия для его аэробного дыхания, при этом необходимо заботиться о том, чтобы образующийся в результате дыхания углекислый газ не накапливался в зерновой массе и вытеснялся из нее воздухом с достаточным содержанием кислорода [5]. При повышенном содержании углекислого газа необходимо производить вентиляцию зерновой массы наружным воздухом для исключения анаэробного дыхания зерна.

Анализ существующих способов хранения зерна показал, что оптимальным является хранение в металлических силосах (контейнерах) с частично разреженной воздушной средой, позволяющей не допустить образование конденсационной влаги внутри этого контейнера в процессе вентиляции межзернового пространства и замедлить, соответственно, скорость аэробного дыхания зерна [6]. К тому же предполагается, что в разреженной воздушной среде ограничивается жизнедеятельность насекомых и микроорганизмов а дыхание зерна остается аэробным.

Целью исследования авторами является попытка обосновать конструктивно-технологические параметры устройства для хранения зерна в разреженной среде и режимы его эффективной работы.

Материалы и методы. Было разработано устройство для хранения зерна в разреженной атмосфере [7] в виде герметичного контейнера, в котором создавалась разреженная атмосфера (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид герметичного контейнера для хранения семенного зерна в разреженной атмосфере

Результаты и обсуждение. При хранении семенного зерна в контейнере с регулируемой воздушной средой мы имеем дело с двумя видами термодинамических систем: закрытой и открытой (рисунок 2).

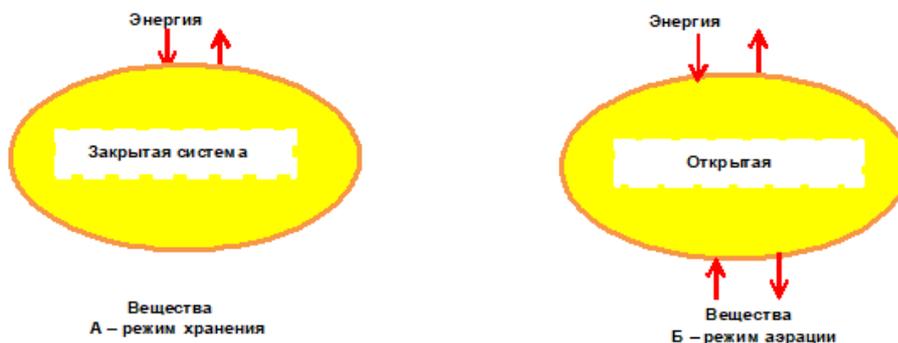


Рисунок 2 - Термодинамическая система обмена воздушной среды в объеме емкости для хранения зерновой массы

При хранении зерна большую часть времени контейнер будет закрытой термодинамической системой, пока не появится необходимость аэрации зерна для исключения его анаэробного дыхания. В режиме «Аэрация» происходит обновление старой воздушной смеси, на свежую, обогащенную кислородом вводимого воздуха в ёмкость из окружающей среды и имеющего свои температурно-влажностные показатели, поэтому можно считать, что режим «Аэрация»

обеспечивает существование открытой термодинамической системы. При аэрации происходят процессы переноса тепла, давления и массы.

Функцией состояния термодинамической системы является энтропия (S). Согласно второму началу термодинамики для открытых систем, энтропия в системе изменяется за счет процессов производства энтропии в самой системе и за счет обмена энтропии между системой и окружающей средой. Энтропия в открытых системах остается неизменной. Неравновесное состояние в открытых системах характеризуется химическим потенциалом компонентов системы.

Воздух является смесью состоящей из различных компонентов: азот N₂; кислород O₂; аргон Ar, углекислый газ CO₂; неон Ne; гелий He; метан CH₄; криптон Kr; водород H₂; оксид азота N₂O; ксенон Xe; Озон O₃, адон Rn) [2,8]. Объемное и массовое содержание этих основных составляющих атмосферного воздуха около 99%. Поэтому для упрощения дальнейших теоретических исследований воздушная смесь рассматривается, как смесь только отмеченных нами основных компонентов. Известно, что в атмосферном воздухе постоянно присутствует водяной пар, плотность которого меняется в зависимости от температуры воздуха и с учетом климатических условий центральных районов Российской Федерации составляет от 8 до 17 · 10⁻³ кг/м³. Значение средней молярной массы условной воздушной смеси, исходя из сделанных ограничений, определяется в виде зависимости:

$$M_r = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{M_i}}, \quad (1)$$

где n – количество компонентов в смеси;

M_i – молярная доля i -го компонента в смеси, кг/моль;

ω_i – массовая доля газа.

Молярная масса компонентов воздушной смеси определяется через атомные массы элементов: для азота

$$Mr(N_2) = 2Ar(N) = 2 \cdot 140067 = 28,0134 \text{ г/моль},$$

для кислорода

$$Mr(O_2) = 2Ar(O) = 2 \cdot 15,9994 = 31,9988 \text{ г/моль},$$

для аргона

$$Mr(Ar) = Ar(Ar) = 39,948 \text{ г/моль},$$

для углекислого газа

$$Mr(CO_2) = 1 \cdot Ar(C) + 2Ar(O) = 1 \cdot 12,01115 + 2 \cdot 15,9994 = 44,00995,$$

для паров воды

$$Mr(H_2O) = 2 \cdot Ar(H) + 1Ar(O) = 2 \cdot 1,00797 + 15,9994 = 18,01534 \text{ г/моль}$$

Для сухой воздушной смеси

$$M_{cp} = 1 / \left(\frac{\omega(N_2)}{Mr(N_2)} + \frac{\omega(Ar)}{Mr(Ar)} + \frac{\omega(CO_2)}{Mr(CO_2)} \right) \quad (2)$$

Однако изменения, происходящие при хранении зерновой массы, по составу воздушной смеси в рабочем объеме герметичной емкости-зернохранилища постоянно меняется из-за дыхания семенного зерна. Вместе с углекислым газом смесь наполняется и водяными парами, которые могут перемещаться в межзерновом пространстве в результате теплообменных процессов между слоями зерна и образовывать конденсат на поверхности семян и внутренних стенках емкости при резких изменениях температуры наружного воздуха.

Объем заполненный воздушной смесью в герметичном устройстве состоит из объема зерновой массы и объемов в межзерновом пространстве и определится как:

$$V_{cv} = (\alpha \cdot S \cdot V_p) \div 100 \% , \quad (3)$$

где V_{cv} - объем воздухом внутри емкости для хранения, м³;

α – коэффициент заполнения рабочего объема емкости-зернохранилища семенным зерном;

S – скважистость зерновой массы, %;

V_p – рабочий объем емкости для хранения зерна, м³.

Скважистость зерновой массы и зависит от формы и размеров зерна, его засоренности может быть определена:

$$S = 100 \cdot (V_p - V) / V_p \text{ или } S = 100 \cdot (1 - V / V_p). \quad (4)$$

Обозначив $\delta = V / V_p$,

Получаем
$$S = 100 \cdot (1 - \delta) \quad (5)$$

где S – скважистость зерновой насыпи, %;

V – истинный объем зерен в зерновой насыпи, м³;

δ – степень заполнения рабочего объема емкости семенным зерном.

Качественные показатели сохранности семенного зерна в герметичном контейнере зависят от дыхательного коэффициента, представляющегося соотношением объемов углекислого газа к объему кислорода.

Если дыхательный коэффициент равен единице, то доли кислорода и углекислого газа должны быть равны ($V_{CO_2} = V_{O_2}$), то дыхание зерна идёт по аэробному процессу.

При коэффициенте свыше единицы, дыхание становится анаэробным и запишется как:

$$\omega_{CO_2} = \frac{x_{CO_2} \cdot M_{CO_2}}{x_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + x_{O_2} \cdot M_{O_2}} = 0,57901 \quad (6)$$

$$\omega_{O_2} = \frac{x_{O_2} \cdot M_{O_2}}{x_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + x_{O_2} \cdot M_{O_2}} = 0,42988 \quad (7)$$

Тогда долевое соотношение масс запишется в виде:

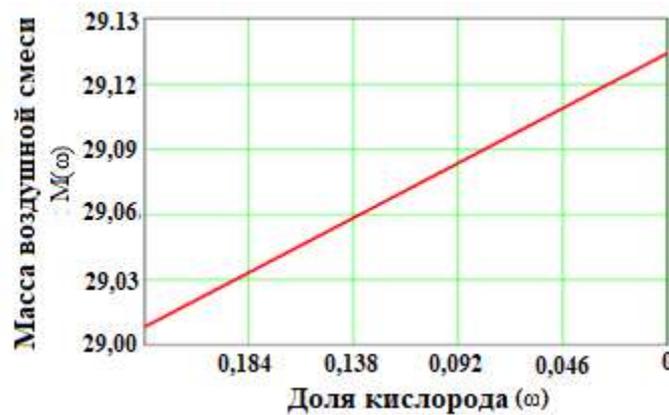
$$\frac{\omega_{CO_2}}{\omega_{O_2}} = \frac{0,57902}{0,42988} = 1,3469 \quad (8)$$

Средняя молярная масса воздушной смеси при дыхании семян может быть определена из формулы:

$$M_{cp} = \frac{1}{\frac{0,7550}{28,0134} + \frac{\omega_{O_2}}{31,9988} + \frac{0,01292}{39,948} + \frac{0,00046 + 1,3469(23,15 - \omega_{O_2})}{44,0095}} \quad (9)$$

Обработав формулу (9) по программе Mathcad, получены зависимости по содержанию кислорода и углекислого газа (рисунок 3). Эта зависимость указывает на то, что дыхательный коэффициент может быть использован для мониторинга условий хранения семенного зерна в качестве диагностического показателя пригодности воздушной смеси к хранению семян в герметичной емкости в реальном промежутке времени.

Вместе с тем из графической зависимости видно, что с уменьшением содержания кислорода в молярной массе смеси возрастает доля углекислого газа. При этом углекислый газ, как наиболее тяжелый, опускается в нижние слои зерновой массы, понижая содержанием кислорода в верхних слоях, что неизбежно приведет к интенсивному переходу зерна на анаэробное дыхание в нижних слоях зерновой массы, а затем и в верхних.



$M(\omega)$ – молярная масса смеси, ω – молярная доля кислорода в смеси
 Рисунок 3 - Зависимость массы воздушной смеси в контейнере от доли кислорода

Для снижения возможного процесса перехода семенного зерна, особенно в нижних слоях зерновой насыпи, на анаэробное дыхание необходимо оборудовать герметичную емкость накопителем углекислого газа, который должна располагаться ниже придонном слое зерна. Наличие такого накопителя также позволит упростить процесс хранения семян за счет расположения в нем необходимых датчиков контроля состояния воздушной смеси и снизить частоту проведения принудительной аэрации зерновой насыпи.

Для расчёта объемов накопителя углекислого газа, смесь воздуха внутри емкости рассматривается, как идеальный газ, для которого можно использовать уравнение Менделеева-Клапейрона, и которое для герметичной ёмкости будет иметь вид:

$$P_{xp} \cdot V_{cv} \cdot M_{cp} = m_{воз.см} \cdot R T_{xp}, \quad (10)$$

где P_{xp} — давление в ёмкости, Па;
 V_{cv} - объем воздуха в ёмкости, м³;
 R – газовая постоянная, Дж/(моль·°К);
 T_{xp} - температура в смеси воздуха, °К;
 M_{cp} – масса смеси, кг/моль;
 $M_{воз.см}$ – масса воздуха в ёмкости, кг;

Из уравнений (3) и (10) массу смеси $m_{воз.см}$ можно определить как:

$$m_{воз.см} = (P_{xp} \cdot \alpha \cdot S \cdot V_k \cdot M_{cp}) / (R T_{xp}), \quad (11)$$

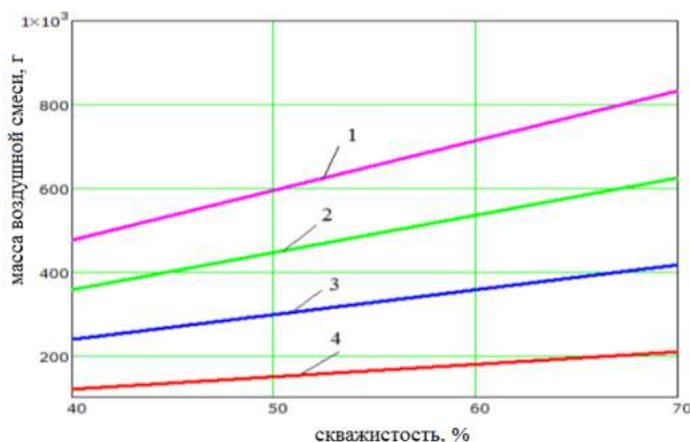
где V_k – объём емкости, м³.

Из формулы (11) видно, что при постоянном объёме ёмкости и температуры в ней на дыхание зерновой массы большое влияние оказывает давление воздушной смеси внутри герметичной емкости, и степень заполнения объема зерновой массой. Оптимальные значения этих технологических параметров планируется при проведении экспериментальных исследований.

Количественные показатели по содержанию углекислого газа в смеси определится как:

$$m(CO_2) = \omega(CO_2) \cdot [P_{xp} \cdot \alpha \cdot S \cdot V_k \cdot M_{cp}] \div (R T_{xp}), \quad (12)$$

Для складывающихся условий хранения семенного зерна в разряженной среде с использованием программы Mathcad, построены графические зависимости для бункера с рабочим объёмом $V=1^3$ м при температуре зерновой массы $t=20^\circ\text{C}$ по формуле 12 (рисунок 4).



Давление, кПа: 1 – 100, 2 - 75, 3 - 50, 4 – 25

Рисунок 4 - Зависимость изменения массы воздушной смеси от скважистости и разреженности внутри контейнера

Эти зависимости показывают изменение массы воздушной смеси в емкости с семенным зерном в зависимости от его скважистости и степени разреженности воздушной среды в объеме 1 м^3 емкости:

$$V_{CO_2} = \frac{m(CO_2) \cdot R \cdot T_{xp}}{M_{cp} \cdot p_{xp}} \quad (13)$$

где M_{cp} – масса углекислого газа, кг/моль

Результаты полученные, в ходе исследований говорят о том, что на сохранность семенного зерна в емкости с разреженной воздушной средой значительное влияние оказывают такие технологические параметры, как её ёмкость, заполненная зерном, содержанием кислорода в воздушной массе и объём накопителя углекислого газа.

Значение этих показателей определяется экспериментальным путем. Объем накопителя углекислого газа устанавливается после нахождения оптимального давления воздушной смеси внутри герметичной емкости и массы углекислого газа образовавшегося в процессе дыхания семян.

Заключение. При обосновании отмеченных в статье параметров хранения семенного зерна в разреженной воздушной среде нами сформулированы главные технические требования к устройству для хранения семенного зерна в разреженной воздушной среде:

- устройство должно представлять герметичную емкость, имеющую тепловые характеристики, способствующие ограничению теплообменных процессов между слоями зерна, между собой и окружающей средой для прекращения миграции влаги в рабочем объеме устройства и отпотевания зерна;
- для снижения вероятности образования конденсата в рабочем объеме устройство процесс активной вентиляции зерновой массы должен быть заменён на процесс принудительной аэрации, которая будет проходить за счет разреженности воздушной смеси, при этом устройство должно иметь абсорбционный осушитель наружного воздуха используемого для аэрации зерна;
- замена воздушной смеси, в рабочем объеме устройства, должна осуществляться при снижении концентрации в ней кислорода до критического значения, характеризующего переход зерна на анаэробное дыхание.

Список источников

1. Латышонок Н.М. Особенности вентиляции зерновой насыпи, находящейся на хранении в герметичном силосе с регулируемой воздушной средой /М.Б. Латышонок, В.А. Макаров, Н.М. Датышонок, А.А. Слободская, А.В. Ивашкин //Вестник РГАТУ.- Рязань: РГАТУ, №3, 2020. – С. 40-46.

2. Технология и организация подготовки и хранения зерна... - <http://avtoreferat.seluk.ru>

3. Быстрицкий Г. Ф. Основы теплотехники и энергетическое оборудование промышленных предприятий. –М.: Юрайт, 2019. – 30 с.
4. Казаков Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки: учеб.пособие/Е.Д. Казаков. В.Л. Кретович.-М.: Колос.1979.-152 с.
5. Z. O. Ajani (2000). Standardization of Maize Grain Stored by National Strategic Grain Reserve (N.S.G.R.) Unpublished Thesis. M. Eng. Thesis Department of Agricultural Engineering, Federal University of technology, Minna Nigeria.- pp.25-39.
6. Фадеев Л.В. Зерно-живое существо. Не бей его. /Л.В. Фадеев/Хлебопродукты. -2014.-№ 9.- С.42.
7. Патент РФ № 2713802, МПК А01F25/14 Устройство хранения зерна в регулируемой воздушной среде и способ его осуществления/ М.Б. Латышенко, А.В. Ивашкин, Н.М. Латышенко, В.И. Биленко, М.И. Голубенко.- 2019112936; заявлено 26.04.2019; опуб. 07.02.2020. Бюл. №4. -16 с.
8. Пилипюк В.Л. Технология хранения зерна и семян Саратов: IPR MEDIA. 2008 – 75 с.

References

1. Latyshonok N.M. Features of ventilation of a grain mound stored in a sealed silo with a controlled air environment / M.B. Latyshonok, V.A., Makarov, N.M. Datyshonok, A.A. Slobodskaya, A.V. Ivashkin // Bulletin of RSATU. - Ryazan: RSATU, No. 3, 2020. – P. 40-46.
2. Technology and organization of grain preparation and storage... - <http://avtoreferat.seluk.ru>
3. Bystritsky G.F. Fundamentals of heat engineering and energy equipment of industrial enterprises. – М.: Yurayt, 2019. – 30 p.
4. Kazakov E.D. Biochemistry of grain and products of its processing: textbook/E.D. Kazakov. V.L. Kretovich.-M.: Kolos. 1979.-152 p.
5. Z. O. Ajani (2000). Standardization of Maize Grain Stored by National Strategies Grain Reserve (N.S.G.R.) Unpublished Thesis. M.Eng. Thesis Department of Agricultural Engineering, Federal University of Technology, Minna Nigeria. - pp.25-39.
6. Fadeev L.V. Grain is a living being. Don't hit him. /L.V. Fadeev/Bread products. -2014.-No. 9.- P.42.
7. RF Patent No. 2713802, IPC A01F25/14 Device for storing grain in a controlled air environment and a method for its implementation / M.B. Latyshenok, A.V. Ivashkin, N.M. Latyshenok, V.I. Bilenko, M.I. Golubenko.- 2019112936; declared 04/26/2019; publ. 02/07/2020. Bull. No. 4. -16 s.
8. Pilipyuk V.L. Grain and seed storage technology Saratov: IPR MEDIA. 2008 – 75 p.

Информация об авторах

Латышенко Н. М. – кандидат технических наук, доцент; Шемякин А. В. – доктор технических наук, профессор; Макаров В. А. – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

Latyshonok N. – candidate of technical sciences, associate professor; Shemyakin A. – doctor of technical sciences, professor; Makarov V. – doctor of technical sciences, professor.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 16.05.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.06.2024