

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 631.333–189.2:631.82
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-153-164>

Поступила в редакцию 25.07.2025
Received 25.07.2025

В. В. Азаренко¹, А. А. Жешко²

¹*Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*
²*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь*

**К ВОПРОСУ ОБОСНОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ
НАКОПИТЕЛЬНЫХ ЕМКОСТЕЙ ВЫСОКОТОЧНЫХ МАШИН ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Аннотация. Современные технические средства для внесения минеральных удобрений должны обеспечивать высокое качество их распределения по поверхности поля. В значительной степени неравномерность распределения зависит от типа применяемых распределяющих рабочих органов. Высокую точность распределения обеспечивают штанговые разбрасыватели, однако для стабильной их работы необходимо, чтобы осуществлялась равномерная дозированная подача удобрений транспортирующими устройствами из накопительных емкостей к распределяющим рабочим органам. Для центробежных разбрасывателей равномерная подача удобрений к дискам также является важнейшей задачей. Рациональные геометрические параметры накопительных емкостей сводят к минимуму вероятность образования сводов и зависания удобрений, а также обуславливают производительность машинно-тракторных агрегатов при выполнении технологических операций по внесению средств химизации земледелия. Объем накопительных емкостей также является важнейшим параметром, предопределяющим технико-экономическую эффективность процесса внесения удобрений. С одной стороны, компактные навесные разбрасыватели грузоподъемностью 0,4–1,5 т характеризуются высокой маневренностью и низкой материалоемкостью, однако в процессе внесения требуют значительного количества технологических остановок для дозагрузки новыми порциями удобрений, что является причиной снижения их производительности. В этой связи навесные штанговые разбрасыватели целесообразно использовать для внесения подкормочных доз удобрений. Полуприцепные разбрасыватели грузоподъемностью 5 т и более производительны при внесении основных доз удобрений на крупных по площади участках, однако их применение не всегда оправдано на небольших полях со значительным количеством препятствий. Рассмотрены особенности конструкций технологических емкостей, применяемых на современных высокоточных технических средствах для внесения минеральных удобрений, представлены аналитические зависимости для определения основных конструктивных параметров рассматриваемых и подобных технических средств.

Ключевые слова: распределение удобрений, накопительные емкости, боковое давление, коррозионная активность, объем, образование сводов, поперечное сечение, подвижность удобрений

Для цитирования: Азаренко, В. В. К вопросу обоснования конструктивных параметров накопительных емкостей высокоточных машин для внесения минеральных удобрений / В. В. Азаренко, А. А. Жешко // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 2. – С. 153–164. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-153-164>

Vladimir V. Azarenko¹, Aliaksandr A. Zheshka²

¹*Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Republic of Belarus*

**ON THE ISSUE OF SUBSTANTIATING THE DESIGN PARAMETERS OF STORAGE TANKS
OF HIGH-PRECISION MACHINES FOR APPLYING MINERAL FERTILIZERS**

Abstract. Modern technical means for applying mineral fertilizers should ensure high quality of their distribution over the field surface. To a large extent, the uneven distribution depends on the type of distributing working bodies used. High distribution accuracy is provided by rod spreaders. However, for their stable operation, it is necessary that uniform metered

fertilizer supply is carried out by transporting devices from storage tanks to distributing working bodies. For centrifugal spreaders, the uniform supply of fertilizers to the discs is also an important task. Rational geometric parameters of storage tanks minimize the likelihood of arches forming and fertilizers hanging, and also determine the productivity of machine and tractor units when performing technological operations to introduce chemicals for agriculture. The capacity of storage tanks is also an important parameter that determines the technical and economic efficiency of the fertilizer application process. On the one hand, compact mounted spreaders with a lifting capacity of 0.4–1.5 tons are characterized by high maneuverability and low material consumption. However, during application, they require a significant number of technological stops to reload new portions of fertilizers, which is the reason for a decrease in their productivity. In this regard, it is advisable to use mounted rod spreaders for applying fertilizing doses of fertilizers. Semi-trailer spreaders with a load capacity of 5 tons or more are suitable for applying basic doses of fertilizers in large areas, but their use is not always justified in small fields with a large number of obstacles. Consider the design features of technological tanks used on modern, high-precision technical means for applying mineral fertilizers, and presents analytical dependencies for determining their main design parameters.

Keywords: fertilizer distribution, storage tanks, lateral pressure, corrosion activity, capacity, arch formation, cross section, mobility of fertilizers

For citation: Azarenko V. V., Zheshka A. A. On the issue of substantiating the design parameters of storage tanks of high-precision machines for applying mineral fertilizers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 2, pp. 153–164 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-2-153-164>

Введение. Накопительная емкость большинства современных технических средств для внесения твердых минеральных удобрений изготавливается в виде сварной конструкции, состоящей из выполненного из профильного металла каркаса и обшивки из листовой стали. Цилиндрические емкости машин для внесения жидких удобрений производят из листового материала, толщина которого может достигать 5 мм и более в случае, если в накопительной емкости в процессе работы создается избыточное давление.

Необходимо учитывать, что годовая загрузка машин для внесения удобрений превышает аналогичный показатель для другой сельскохозяйственной техники, в то же время в процессе эксплуатации накопительные емкости и другие рабочие органы разбрасывателей удобрений взаимодействуют с агрессивными средами, что может являться причиной преждевременного выхода из строя машин. По коррозионной активности минеральные удобрения делят на три группы [1, с. 132; 2, с. 28; 3, с. 147]:

- низкой активности – мочевины;
- средней – суперфосфат, аммиачная селитра;
- высокой – нитроаммофоска и сульфат аммония.

По этой причине для изготовления емкостей машин для внесения удобрений в настоящее время все чаще используют в качестве материала пластмассы, а также защитные покрытия для бункеров из металлов. Срок службы элементов машин для внесения удобрений в большей мере зависит от глубины коррозионных воздействий – питтингов, которые являются локальными очагами разрушения металлических элементов конструкции бункеров.

Для исключения зависания удобрений и образования сводов накопительные емкости должны иметь обоснованную геометрическую форму, обеспечивающую высокую подвижность сыпучих материалов. Для последующего расчета подающих и распределяющих рабочих органов необходимо определить давление, которое создают удобрения на стенки и дно накопительных емкостей. По этой причине обоснование основных конструктивных параметров накопительных емкостей современных технических средств для высокоточного внесения удобрений является актуальной задачей.

Цель работы – на основе анализа конструкций современных технических средств для высокоточного внесения твердых минеральных удобрений определить наиболее перспективные формы накопительных емкостей и определить их рациональные конструктивные параметры.

Материалы и методы исследований. Механизированная загрузка и выгрузка удобрений из бункера должна протекать без образования «мертвых зон», в которых происходит скопление сыпучего материала без дальнейшего продвижения под действием собственного веса к подающим и распределяющим устройствам [4–6]. Образование «мертвых зон» характерно для твердых минеральных удобрений в случае недостаточного угла наклона боковых, задней или передней сте-

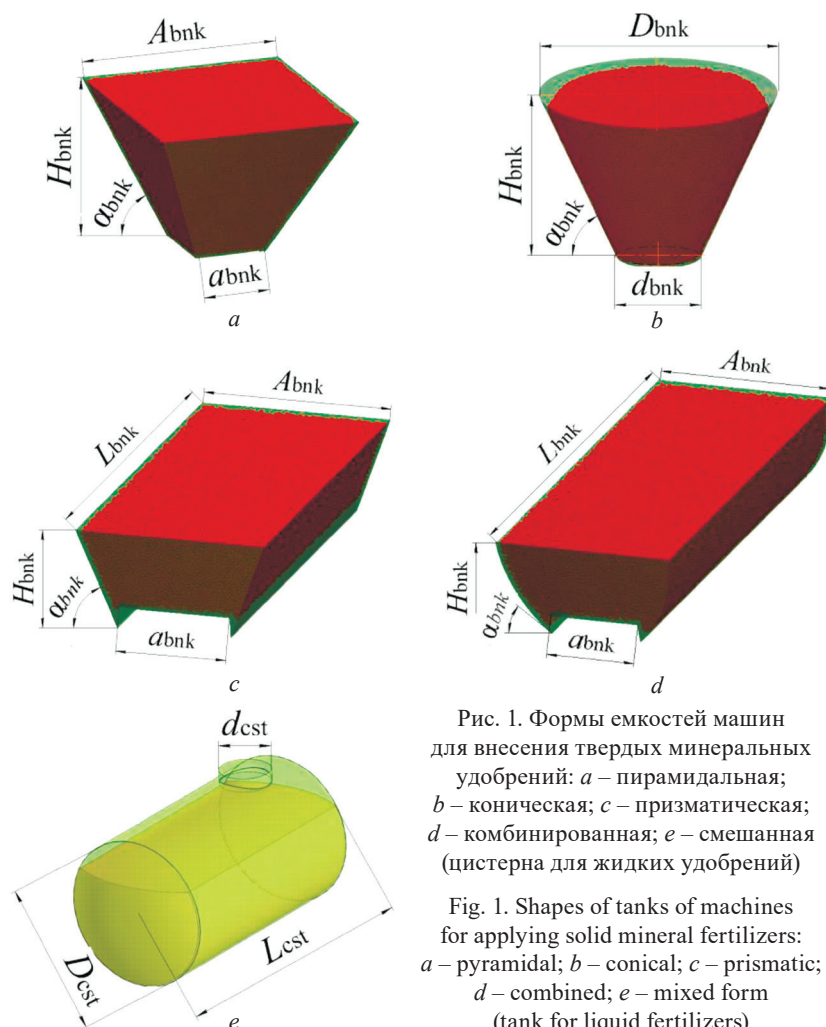


Рис. 1. Формы емкостей машин для внесения твердых минеральных удобрений: *a* – пирамидальная; *b* – коническая; *c* – призматическая; *d* – комбинированная; *e* – смешанная (цистерна для жидких удобрений)

Fig. 1. Shapes of tanks of machines for applying solid mineral fertilizers: *a* – pyramidal; *b* – conical; *c* – prismatic; *d* – combined; *e* – mixed form (tank for liquid fertilizers)

нок к горизонту. Также форма и геометрические параметры накопительных емкостей должны исключать образование сводов при движении удобрений к подающим и дозирующим устройствам.

Наиболее характерные формы бункеров машин для внесения твердых и жидких минеральных удобрений представлены на рис. 1. Форма бункеров для внесения твердых минеральных удобрений может быть сферической, призматической, конической, пирамидальной или смешанной¹ [7, 8; 9, с. 24–34; 10, с. 8–10].

Геометрические параметры бункеров машин для внесения твердых минеральных удобрений должны приниматься в соответствии со следующими требованиями:

- размеры A_{bnk} , L_{bnk} , D_{bnk} – обеспечивают беспрепятственное заполнение бункера твердыми минеральными удобрениями при использовании механического погрузчика;
- размеры a_{bnk} , H_{bnk} – исключают образование сводов при внесении удобрений;
- угол α_{bnk} – обеспечивает стекание удобрений под действием собственного веса к подающим или дозирующим рабочим органам без образования «мертвых зон».

Для вычисления объема пирамидальной накопительной емкости следует использовать формулу для нахождения объема усеченной пирамиды

$$V_{\text{bnk}}^{\text{pir}} = \frac{1}{3} H_{\text{bnk}} \left(A_{\text{bnk}}^2 + \sqrt{A_{\text{bnk}}^2 a_{\text{bnk}}^2 + a_{\text{bnk}}^2} \right), \quad (1)$$

где $V_{\text{bnk}}^{\text{pir}}$ – объем пирамидальной накопительной емкости, м³; A_{bnk} , a_{bnk} – соответственно длина верхней и нижней стороны основания, м; H_{bnk} – высота бункера, м.

¹ Цыбуленко П. В., Березовский Н. И. Машины и оборудование обогатительных и перерабатывающих производств: метод. пособие по практ. занятиям. Мн.: БНТУ, 2013. 32 с.

Для призматической формы бункера получим

$$V_{\text{bnk}}^{\text{prz}} = \frac{1}{3} H_{\text{bnk}} \left(A_{\text{bnk}} L_{\text{bnk}} + \sqrt{A_{\text{bnk}} L_{\text{bnk}} a_{\text{bnk}} l_{\text{bnk}} + a_{\text{bnk}} l_{\text{bnk}}} \right), \quad (2)$$

где $V_{\text{bnk}}^{\text{prz}}$ – объем призматической накопительной емкости, м³; L_{bnk} , l_{bnk} – длина верхней и нижней части бункера, м.

Объем конического бункера определим как объем усеченного конуса:

$$V_{\text{bnk}}^{\text{con}} = \frac{1}{12} H_{\text{bnk}} \left(D_{\text{bnk}}^2 + D_{\text{bnk}}^2 d_{\text{bnk}}^2 + d_{\text{bnk}}^2 \right) = \frac{\pi \tan \alpha_{\text{bnk}}}{24} \left(D_{\text{bnk}}^2 - D_{\text{bnk}}^3 \right), \quad (3)$$

где $V_{\text{bnk}}^{\text{con}}$ – объем конической накопительной емкости, м³; D_{bnk} , d_{bnk} – соответственно диаметр верхнего и нижнего основания, м; α_{bnk} – угол наклона образующей конуса, град.

Для комбинированной формы накопительной емкости A_{bnk} является хордой основания (см. рис. 1); при известной высоте H_{bnk} определим радиус основания (R_{bnk}) по формуле

$$R_{\text{bnk}} = \frac{H_{\text{bnk}}}{2} + \frac{A_{\text{bnk}}^2}{8H_{\text{bnk}}}, \quad (4)$$

тогда объем комбинированной накопительной емкости ($V_{\text{bnk}}^{\text{cor}}$) определим как

$$\begin{aligned} V_{\text{bnk}}^{\text{cor}} &= L_{\text{bnk}} \frac{\left(\frac{A_{\text{bnk}}^2 + 4H_{\text{bnk}}^2}{8H_{\text{bnk}}} \right)^2 \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{2R_{\text{bnk}}} - \sin \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{2R_{\text{bnk}}} \right) \right)}{2} = \\ &= L_{\text{bnk}} \frac{\left(\frac{A_{\text{bnk}}^2 + 4H_{\text{bnk}}^2}{8H_{\text{bnk}}} \right)^2 \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{H_{\text{bnk}} + \frac{A_{\text{bnk}}}{4H_{\text{bnk}}}} - \sin \left(2 \arcsin \frac{A_{\text{bnk}}}{H_{\text{bnk}} + \frac{A_{\text{bnk}}}{4H_{\text{bnk}}}} \right) \right)}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для нахождения объема цистерны для жидких удобрений, представленной на рис. 1, е, необходимо найти объем цилиндрической части и объем двух усеченных шарообразных заглушек. Объем цилиндрической части составит

$$V_{\text{cst}}^{\text{cil}} = \frac{\pi D_{\text{cst}}^2}{4} (L_{\text{cst}} - 2h_{\text{ceg}}), \quad (6)$$

где $V_{\text{cst}}^{\text{cil}}$ – объем цилиндрической части, м³; L_{cst} , D_{cst} – длина и диаметр цистерны соответственно, м; h_{ceg} – длина усеченных шарообразных заглушек, м.

Объем усеченной шарообразной заглушки ($V_{\text{cst}}^{\text{ceg}}$) определим по формуле

$$\begin{aligned} V_{\text{cst}}^{\text{ceg}} &= \pi \int_{R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}}}^{R_{\text{ceg}}} \left(\sqrt{R_{\text{ceg}}^2 - x^2} \right)^2 dx = \pi \int_{R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}}}^{R_{\text{ceg}}} \left(R_{\text{ceg}}^2 - x^2 \right)^2 dx = \\ &= \pi \left(R_{\text{ceg}}^2 x - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}}}^{R_{\text{ceg}}} = \pi \left[R_{\text{ceg}}^2 h_{\text{ceg}} - \frac{R_{\text{ceg}}^3}{3} + \frac{(R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}})^3}{3} \right] = \\ &= \pi \left(R_{\text{ceg}} h_{\text{ceg}}^2 - \frac{h_{\text{ceg}}^3}{3} \right) = \frac{\pi h_{\text{ceg}}^2 (3R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}})}{3}, \end{aligned} \quad (7)$$

где R_{ceg} – радиус шарообразного сегмента, м.

С учетом формул (6) и (7) для определения объема цистерны (V_{cst}) получим следующее выражение:

$$V_{\text{cst}} = V_{\text{cst}}^{\text{cil}} + 2V_{\text{cst}}^{\text{ceg}} = \frac{\pi D_{\text{cst}}^2}{4} (L_{\text{cst}} - 2h_{\text{ceg}}) + \frac{\pi h_{\text{ceg}}^2 (3R_{\text{ceg}} - h_{\text{ceg}})}{6}. \quad (8)$$

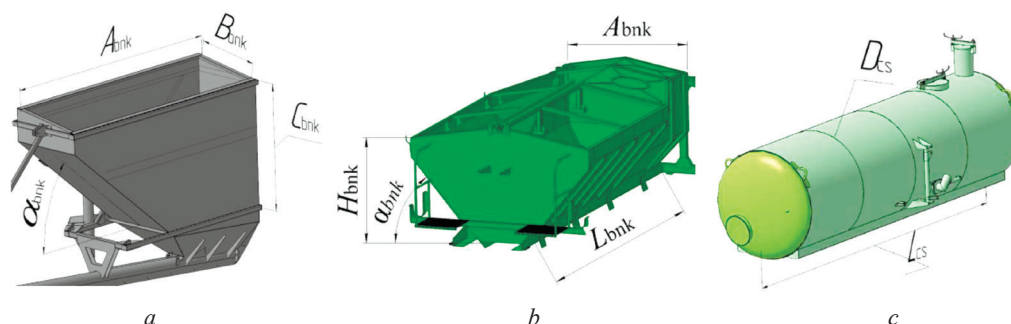


Рис. 2. Геометрические параметры накопительных емкостей машин для внесения минеральных удобрений: *a* – РШУ-18; *b* – МШВУ-18; *c* – МПВУ-16

Fig. 2. Geometric parameters of storage tanks of machines for applying mineral fertilizers: *a* – RShU-18; *b* – MShVU-18; *c* – MPVU-16

Для навесных и полунавесных разбрасывателей твердых минеральных удобрений, как правило, применяют кузова конической и пирамидальной формы [11; 12, с. 14–16; 13, с. 763; 14]. Например, в настоящее время выпускаются разбрасыватели грузоподъемностью до 500 кг с конической формой бункера, такие как STRUMYK S-300, D-POL 500L, Jar-Met 500L и др. [15, с. 555; 16–19], и с призматической формой, состоящие из двух пирамидальных отсеков, – РУ-1000, РУ-1600, РУ-3000 и др. Также пирамидальный бункер применен на машине штанговой для внесения твердых минеральных удобрений РШУ-18 (рис. 2, *a*). Для полуприцепных разбрасывателей грузоподъемностью более 4 т, таких как МТТ-4У, РУ-7000-1, РУ-8, МШХ-9, характерны емкости призматической и комбинированной форм; данный тип бункера применяется на машинах МШВУ-18 (рис. 2, *b*), МХС-10 и др. На машинах для внесения жидких органических и минеральных удобрений, например МПВУ-16 (рис. 2, *c*), применяются емкости – цистерны [20, 21].

Технологический расчет конструктивных элементов накопительных емкостей сводится к определению вертикального давления на дно и бокового давления на стенки.

Важнейшей характеристикой, позволяющей судить о характере движения удобрений в бункере, является гидравлический радиус, который представляет собой отношение площади поперечного сечения емкости к смоченному периметру этого сечения:

$$R_{\text{gudb}} = \frac{S_{\text{udb}}}{P_{\text{udb}}} = \frac{S_{\text{udb}}}{2a_{\text{udb}} + b_{\text{udb}}}, \quad (9)$$

где R_{gudb} – гидравлический радиус, м; S_{udb} – площадь поперечного сечения емкости минеральных удобрений, м²; P_{udb} – смоченный периметр поперечного сечения емкости минеральных удобрений, м; a_{udb} , b_{udb} – соответственно длина боковой и нижней стенок, соприкасающихся со слоем удобрений, м.

Согласно исследованиям [3, с. 153] для средних по глубине накопительных емкостей при соблюдении условия

$$3R_{\text{gudb}} < H_{\text{udb}} < 8R_{\text{gudb}}, \quad (10)$$

где H_{udb} – высота слоя удобрений в бункере, м, величина подвижности удобрений в бункере учитывается коэффициентом подвижности удобрений в бункере, который вычисляется по формуле

$$m_{\text{pdv}} = \frac{1 - \sin \varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}}{1 + \sin \varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}} = 1 + 2f_{\text{vnt}}^2 - 2f_{\text{vnt}} \sqrt{1 + f_{\text{vnt}}^2}, \quad (11)$$

где m_{pdv} – коэффициент подвижности удобрений в бункере; $\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}$, f_{vnt} – угол и коэффициент внутреннего трения удобрений соответственно.

Далее определим боковое и вертикального давление на стенки и дно накопительной емкости. В процессе внесения удобрений в накопительных емкостях возникают динамические нагрузки в результате различных сотрясений, которые необходимо учитывать при вычислении давления

на стенки и дно емкостей. Значения данного коэффициента для полуприцепных и навесных разбрасывателей находятся в пределах $k_{\text{dnm}} = 1,6\text{--}1,8$.

Также при вычислении давления на стенки и дно накопительных емкостей необходимо учитывать возможные зависания твердых минеральных удобрений. Значение коэффициента зависания зависит от гидравлического радиуса, высоты слоя материала в бункере, коэффициента трения удобрений о стенки и других факторов и определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{udb}} = \frac{R_{\text{gudb}}}{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}} \left(1 - \frac{1}{e^{\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}{R_{\text{gudb}}}}} \right) = \frac{R_{\text{gudb}} - R_{\text{gudb}}e^{-\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}{R_{\text{gudb}}}}}{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}, \quad (12)$$

где ε_{udb} – коэффициент зависания удобрений в бункере; H_{udb} – глубина погружения рассчитываемой площадки (высота слоя удобрений в накопительной емкости), м; k_{frc} – коэффициент внешнего трения удобрений о стенки накопительной емкости.

Вертикальное давление на дно бункера (P_{dnv}) определим как произведение высоты слоя материала, плотности (с соответствующим обозначением кг/м³) удобрений, коэффициента зависания и динамичности. С учетом формулы (12) его значение определим как

$$P_{\text{dnv}} = gH_{\text{udb}}\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}\varepsilon_{\text{udb}} = \frac{\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}} \left(R_{\text{gudb}} - R_{\text{gudb}}e^{-\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}{R_{\text{gudb}}}} \right)}{k_{\text{frc}}m_{\text{pdv}}}. \quad (13)$$

Выражение для определения вертикального давления на дно накопительной емкости (P_{vrt}) запишем в виде

$$P_{\text{vrt}} = \frac{\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}R_{\text{gudb}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) + 1 \right) e^{\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) - 1 \right)}{R_{\text{gudb}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) + 1 \right)} - 1}}{k_{\text{frc}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) - 1 \right)}. \quad (14)$$

Боковое давление на вертикальную стенку накопительной емкости (P_{bkv}) определим по формуле

$$P_{\text{bkv}} = gH_{\text{udb}}\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}\varepsilon_{\text{udb}}m_{\text{pdv}} = \frac{g\gamma_{\text{udb}}k_{\text{dnm}}R_{\text{gudb}} \left(e^{\frac{H_{\text{udb}}k_{\text{frc}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) - 1 \right)}{R_{\text{gudb}} \left(\sin(\varphi_{\text{udb}}^{\text{vnt}}) + 1 \right)} - 1 \right)}{k_{\text{frc}}}. \quad (15)$$

На рис. 3 представлена графическая интерпретация результатов расчета давления минеральных удобрений различных видов (аммиачная селитра $\gamma_{\text{udb1}} = 823,5$ кг/м³, карбамид $\gamma_{\text{udb2}} = 774,6$ кг/м³, суперфосфат двойной $\gamma_{\text{udb3}} = 1\,086,6$ кг/м³, хлористый калий $\gamma_{\text{udb4}} = 1\,070,5$ кг/м³) на боковую вертикальную стенку и дно бункера машины РШУ-18. Среднее значение внутреннего угла трения удобрений принято $\varphi_{\text{ubd}}^{\text{vnt}} = 30^\circ$, коэффициент динамичности $k_{\text{dnm}} = 1,7$, значение гидравлического радиуса R_{gudb} для бункера разбрасывателя РШУ-18, в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 3, составляет

$$R_{\text{gudb}} = \frac{S_{\text{udb}}}{a_{\text{udb}} + b_{\text{ubd}} + H_{\text{udb}}} = \frac{0,95}{3,02} = 0,3. \quad (16)$$

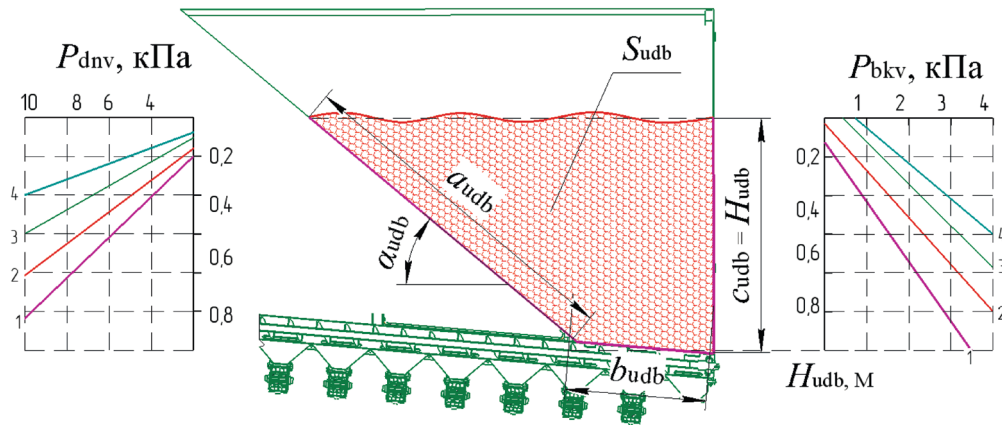


Рис. 3. Расчетная схема для определения бокового и вертикального давления на стенки и дно накопительной емкости пирамидальной формы: 1 – суперфосфат двойной; 2 – хлористый калий; 3 – аммиачная селитра; 4 – карбамид

Fig. 3. Calculation scheme for determining the lateral and vertical pressure on the walls and bottom of a pyramidal storage tank: 1 – double superphosphate; 2 – potassium chloride; 3 – ammonium nitrate; 4 – carbamide

Боковое давление на наклонную стенку накопительной емкости (P_{nkl}), установленную под углом $\alpha_{удб}$ к горизонту, определим по формуле

$$P_{nkl} = H_{удб} \gamma_{удб} k_{dnm} \varepsilon_{удб} \left(\cos^2 \alpha_{удб} + m_{pdv} \sin^2 \alpha_{удб} \right) =$$

$$= \frac{g \gamma_{удб} k_{dnm} R_{гудб} \left(\sin^2(\alpha_{удб}) \sin(\varphi_{удб}^{vnt}) + \cos^2(\alpha_{удб}) \sin(\varphi_{удб}^{vnt}) + 1 \right) \left(e^{\frac{H_{удб} k_{frc} (\sin(\varphi_{удб}^{vnt}) - 1)}{R_{гудб} (\sin(\varphi_{удб}^{vnt}) + 1)}} - 1 \right)}{k_{frc} (\sin(\varphi_{удб}^{vnt}) - 1)} \quad (17)$$

где $\gamma_{удб}$ – плотность удобрений, кг/м³; k_{dnm} – динамический коэффициент.

На рис. 4 представлена расчетная схема для определения бокового давления на стенки, расположенные под углом $\alpha_{удб} = 50^\circ$. Для машины штанговой для внесения удобрений $S_{удб} = 1,77 \text{ м}^2$, а значение смоченного периметра $2a_{удб} + b_{удб} = 3,57 \text{ м}$, значение гидравлического радиуса составляет $R_{гудб} = 0,49 \text{ м}$.

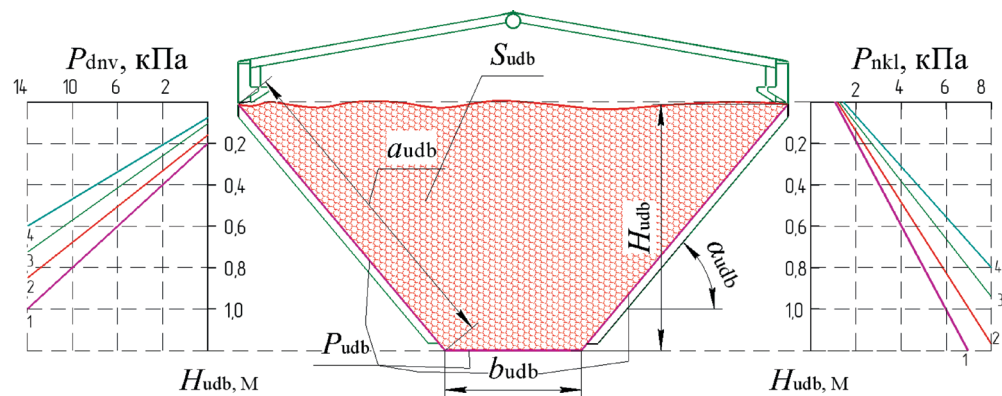


Рис. 4. Расчетная схема для определения бокового и вертикального давления на стенки и дно накопительной емкости призматической формы: 1 – суперфосфат двойной; 2 – хлористый калий; 3 – аммиачная селитра; 4 – карбамид

Fig. 4. Calculation scheme for determining the lateral and vertical pressure on the walls and bottom of a prismatic storage tank: 1 – double superphosphate; 2 – potassium chloride; 3 – ammonium nitrate; 4 – carbamide

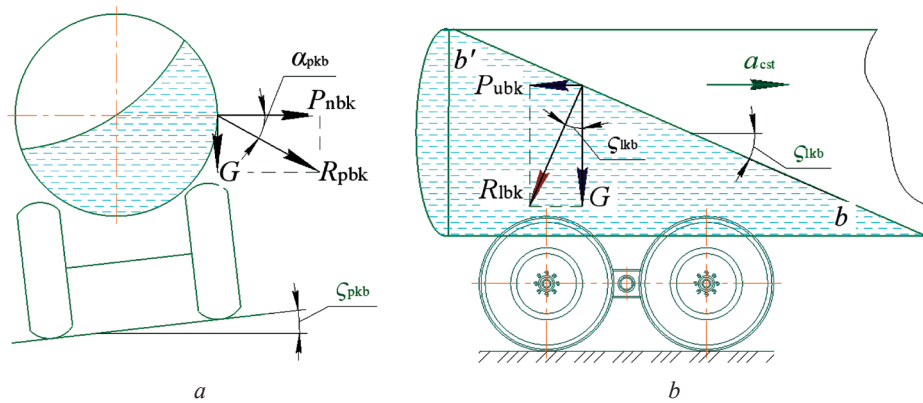


Рис. 5. Расчетная схема для определения бокового и вертикального давления в цистерне:
 а – наезд на препятствие; б – ускорение и замедление

Fig. 5. Calculation scheme for determining the lateral and vertical pressure in a tank:
 a – hitting an obstacle; b – acceleration and deceleration

Согласно результатам, представленным на рис. 3 и 4, давление на дно накопительных емкостей для твердых минеральных удобрений более чем в два раза превышает давление на вертикальные и наклонные боковые стенки бункеров.

В процессе внесения жидких минеральных удобрений происходят колебания в результате обработки закругленных участков, при работе на склонах и по причине наезда на неровности поля [23, с. 10–13]. При этом жидкие минеральные удобрения набегают на стенку накопительной емкости, что является причиной возникновения бокового давления (рис. 5, а). Кроме того, при внесении жидких удобрений на рабочем участке оператор переключает передачи, что приводит к ускорению или замедлению, в результате жидкость набегает на заднюю или переднюю стенку накопительной емкости (рис. 5, б).

Колебательные процессы могут являться причиной неравномерного распределения удобрений в результате колебания адаптеров для поверхностного внесения шлангами-понижителями или модулей для внутрпочвенного внесения. Для снижения данных негативных воздействий в конструкции навесной системы адаптеров должно быть предусмотрено наличие демпфирующих устройств.

Для нахождения силы бокового давления определим объем, занимаемый жидкими удобрениями в зависимости от их уровня в накопительной емкости. В соответствии со схемой, представленной на рис. 6, запишем формулу для определения площади поперечного сечения, занимаемого жидкими удобрениями:

$$S_{ACD} = S_{ADC} - S_{ADB},$$

площадь сектора ADCB определим по формуле

$$S_{ADC} = \alpha_{trv} R_{cst}^2 = R_{cst}^2 \arccos \left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}} \right), \tag{18}$$

где α_{trv} – угол между вертикалью и точкой на пересечении уровня жидкости и цистерны, град; R_{cst} – радиус цистерны, м; h_{cst} – высота уровня удобрений в цистерне, м.

Для нахождения площади равнобедренного треугольника ABC запишем

$$S_{ABC} = \frac{L_{trv} (R_{cst} - h_{cst})}{2} = (R_{cst} - h_{cst}) \sqrt{R_{cst}^2 - (R_{cst} - h_{cst})^2} = (R_{cst} - h_{cst}) \sqrt{2R_{cst}h_{cst} - h_{cst}^2}, \tag{19}$$

где S_{ABC} – площадь равнобедренного треугольника ABC, м²; L_{trv} – длина основания равнобедренного треугольника ABC, м.

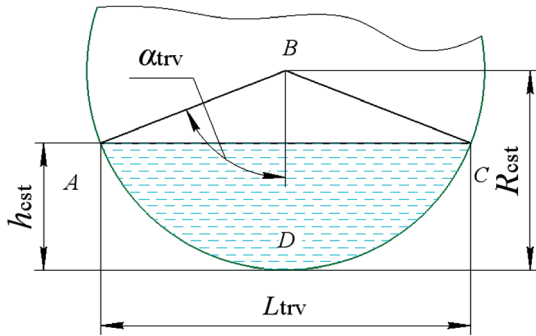


Рис. 6. Расчетная схема для определения объема, занимаемого жидкими удобрениями

Fig. 6. Calculation scheme for determining the volume occupied by liquid fertilizers

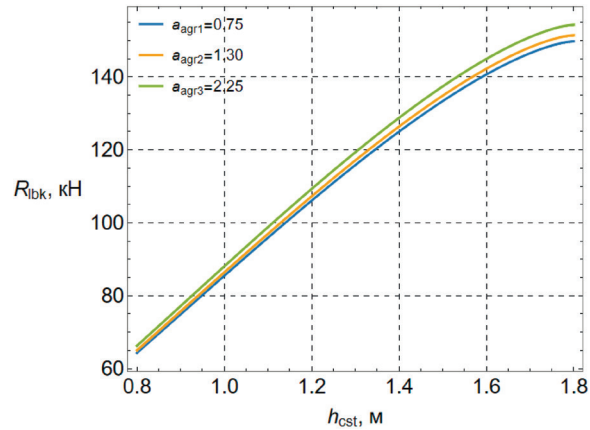


Рис. 7. Зависимость величины силы бокового давления от уровня жидких удобрений в цистерне

Fig. 7. Dependence of the lateral pressure force on the level of liquid fertilizers in the tank

Тогда площадь сегмента BCD определим как

$$S_{BCD} = R_{cst}^2 \arccos\left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}}\right) - (R_{cst} - h_{cst})\sqrt{2R_{cst}h_{cst} - h_{cst}^2}. \quad (20)$$

Объем, занимаемый жидкими удобрениями, определим как

$$V_{BCD} = S_{BCD}L_{cst}, \quad (21)$$

где V_{BCD} – объем, занимаемый жидкими удобрениями, m^3 ; L_{cst} – длина накопительной емкости, м.

Тогда масса жидких минеральных удобрений определится как

$$m_{BCD} = \rho_{udbl} \left(R_{cst}^2 \arccos\left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}}\right) - (R_{cst} - h_{cst})\sqrt{2R_{cst}h_{cst} - h_{cst}^2} \right), \quad (22)$$

где m_{BCD} – масса жидких минеральных удобрений, кг; ρ_{udbl} – плотность жидких минеральных удобрений, kg/m^3 .

Тогда сила бокового давления составит

$$R_{lbk} = \sqrt{(ma_{agr})^2 + (mg)^2} = \sqrt{L_{cst}\rho_{udbl} \left(a_{agr}^2 + g^2 \right) \left(R_{cst}^2 \cos^{-1}\left(1 - \frac{h_{cst}}{R_{cst}}\right) + \sqrt{-h_{cst}(h_{cst} - 2R_{cst})(h - R)} \right)^2}, \quad (23)$$

где R_{lbk} – сила бокового давления, кН; a_{agr} – ускорение (замедление) машинно-тракторного агрегата, m/c^2 .

На рис. 6 отображена расчетная схема для определения объема, занимаемого жидкими удобрениями. Зависимость значения силы бокового давления от уровня жидких минеральных удобрений в накопительной емкости для машины МПВУ-16, для которой $R_{cst} = 0,9$ м, $L_{cst} = 6$ м, $\rho_{udb} = 997$ kg/m^3 , представлена на рис. 7. Как видно из рисунка, в процессе работы машины для внесения жидких органических удобрений подвергаются существенным воздействиям, которые необходимо снижать за счет применения перегородок внутри емкости, а также демпферных устройств для адаптеров.

Заключение. В статье представлены аналитические зависимости для определения рациональных параметров накопительных емкостей современных технических средств для высокоточного внесения твердых минеральных удобрений. Полученные результаты использованы при расчете конструкций машины штанговой для внесения удобрений МШВУ-18, навесного разбрасывателя для внесения подкормочных доз твердых минеральных удобрений РШУ-18 и машины для поверхностного и внутрипочвенного внесения жидких удобрений МПВУ-16 и могут быть применены для разработки аналогичных технических средств различного типоразмера.

Список использованных источников

1. Степук, Л. Я. Недобор и потери урожая как следствие наличия проблем в сфере технического обеспечения сельского хозяйства / Л. Я. Степук, В. Р. Петровец, И. В. Барановский // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2. – С. 132–136.
2. Степук, Л. Я. Доказательства необходимости разработки и реализации государственной научно-технической программы приоритетного сельхозмашиностроения / Л. Я. Степук // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (Минск, 20–21 окт. 2022 г.) / НАН Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва; редкол.: П. П. Казакевич (гл. ред.) [и др.]. – Мн., 2022. – С. 27–33.
3. Догановский, М. Г. Машины для внесения удобрений: конструкция, теория, расчет и испытания / М. Г. Догановский, Е. В. Козловский. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
4. Исследование влияния параметров питающих устройств на качество внесения минеральных удобрений / К. П. Андреев, В. А. Макаров, Б. А. Нефедов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева. – 2017. – № 4 (36). – С. 82–86.
5. Бричагина, А. А. Движение семян и гранул минеральных удобрений в бункере сеялки / А. А. Бричагина, В. К. Евтеев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 7 (45). – С. 64–66.
6. Дёмин, С. Б. Моделирование влияния параметров бункера и транспортных окон на производительность бункера сеялок / С. Б. Дёмин, Д. В. Синёнков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. – № 4 (39). – С. 46–53. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-39-4-47-53>
7. Аль-Аббас Амер. Изучение рабочих параметров машин для внесения твердых минеральных удобрений / Аль-Аббас Амер // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2011. – № 6. – С. 170–174.
8. Зернов, Е. В. Математическая модель процесса истечения сыпучего материала из бункеров / Е. В. Зернов, А. М. Моисеенко // Вестник ОрелГАУ. – 2006. – № 2–3. – С. 94–95.
9. Мурадова, С. Ш. Воздействие сыпучих материалов на стенки щелевых бункеров / С. Ш. Мурадова, Л. В. Федосеева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2017. – Т. 44, № 3. – С. 24–38. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-3-24-38>
10. Андреев, К. П. Разработка и обоснование параметров рабочих органов самозагружающейся машины для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Андреев Константин Петрович; Рязан. гос. агротехнол. ун-т. – Рязань, 2017. – 17 с.
11. Шварц, А. А. Стабилизация пространственного положения кузовного низкорамного разбрасывателя удобрений / А. А. Шварц, Б. П. Беседин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 7. – С. 73–76.
12. Лютых, О. Обзор рынка опрыскивателей и разбрасывателей удобрений // АгроФорум. – 2020. – № 2. – С. 12–21.
13. Raei, R. Morphological attributes and phytochemical compounds of *Satureja hortensis* L. in response to poultry pellet and zinc sulphate applications / R. Raei, V. Akbarpour, M. A. Bahmanyar // Journal of Horticultural Sciences. – 2023. – Vol. 36, № 4. – P. 763–776. <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.67877.1006>
14. Experimental and numerical research of granular manure fertilizer application by centrifugal fertilizer spreading / E. Jotautiene, V. Bivainis, R. Mieldazys [et al.] // Proceedings of the 21st international scientific conference “Engineering for rural development”, Jelgava, Latvia, 25–27 May 2022 / Latvia Univ. of Life Sciences a. Technologies. – Jelgava, 2022. – P. 295–299. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF088>
15. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation / X. Wang, W. Liu, Z. Li [et al.] // Pedosphere. – 2020. – Vol. 30, № 4. – P. 555–562. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60457-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60457-0)
16. Rutkoviene, V. Nitrogen losses from organic and mineral fertilizers in model soil system / V. Rutkoviene, L. Cesoniene, D. Steponavicius // Cereal Research Communications. – 2007. – Vol. 35, № 2. – P. 313–316. <https://doi.org/10.1556/CRC.35.2007.2.37>
17. Investigation of natural magnesium mineral fertilizer granulation and determination of granule qualitative indicators / A. Jasinskas, J. Pekarskas, V. Kucinskas, A. Aboltins // 15th international scientific conference “Engineering for rural development”, Jelgava, Latvia, 25–27 May, 2016 / Latvia Univ. of Agriculture; ed.: L. Malinovska, V. Osadcuks. – Jelgava, 2016. – P. 647–652.
18. Experimental study of disc fertilizer spreader performance / A. Przywara, F. Santoro, A. Kraszkievicz [et al.] // Agriculture. – 2020. – Vol. 10, № 10. – Art. 467. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100467>
19. Reumers, J. Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc: a parameter study / J. Reumers, E. Tijsskens, H. Ramon // Biosystems Engineering. – 2003. – Vol. 86, № 3. – P. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.004>
20. Design of a sieve bucket spreading mechanism based on EDEM / Z. Liping, Z. Weiqiang, Z. Lixin, L. Yulong // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2019. – Vol. 12, № 3. – P. 84–90. <https://doi.org/10.25103/jestr.123.12>
21. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader / P. Van Liedekerke, E. Tijsskens, E. Dintwa [et al.] // Powder Technology. – 2009. – Vol. 190, № 3. – P. 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.018>
22. Оценка сил давления жидкости на боковую стенку котла цистерны при поперечных колебаниях кузова / М. С. Громаков, С. В. Беспалько, О. И. Мироненко, А. В. Зяблов // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 3. – С. 10–13. https://doi.org/10.53883/20749325_2021_03_10

References

1. Stepuk L. Ia., Petrovets V. R., Baranovskii I. V. Shortage and losses of yield as consequence of problems in the sphere of technical support of agriculture. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2017, no. 2, pp. 132–136 (in Russian).
2. Stepuk L. Ia. Evidence of the need to develop and implement a state scientific and technical program for priority agricultural machinery engineering. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhoziaistvennom proizvodstve: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 75-letiyu obrazovaniya RUP "NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khoziaistva" (Minsk, 20–21 oktyabrya 2022 g.)* [Scientific and technological progress in agricultural production: proceedings of the international scientific and technical conference dedicated to the 75th anniversary of the establishment of the Republican Unitary Enterprise "Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization" (Minsk, October 20–21, 2022)]. Minsk, 2022, pp. 27–33 (in Russian).
3. Doganovskii M. G., Kozlovskii E. V. *Fertilizer application machines: design, theory, calculation and testing*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 272 p. (in Russian).
4. Andreev K. P., Makarov V. A., Nefedov B. A., Uglanov M. B., Kostenko M. Yu. Investigation of the influence of parameters of nutrition devices on the quality of mineral fertilizers introduction. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P. A. Kostycheva = Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev*, 2017, no. 4 (36), pp. 82–86 (in Russian).
5. Brichagina A. A., Evteev V. K. Movement of seeds and mineral fertilizer granules in a seed drill hopper. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2008, no. 7 (45), pp. 64–66 (in Russian).
6. Demin S. B., Sinenkov D. V. Modelling of influence of parameters of the bunker and transport windows on productivity of the bunker of seeders. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2015, no. 4 (39), pp. 46–53 (in Russian). <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2015-39-4-47-53>
7. Al-Aabbas Amer. Studying the operating parameters of solid mineral fertilizer application machines. *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhoziaistvennoi akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2011, no. 6, pp. 170–174 (in Russian).
8. Zernov E. V., Moiseenko A. M. Mathematical model of the process of bulk material discharge from bunkers. *Vestnik OrelGAU*, 2006, no. 2–3, pp. 94–95 (in Russian).
9. Muradova S. Sh., Fedoseeva L. V. Impact of loose materials on track hopper walls. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 24–38 (in Russian). <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-3-24-38>
10. Andreev K. P. *Development and justification of the parameters of the working bodies of a self-loading machine for surface application of solid mineral fertilizers*. Riazan, 2017. 17 p. (in Russian).
11. Shwartz A. A., Besedin B. P. The stabilization of low-built fertilizing spreaders attitude position. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2016, no. 7, pp. 73–76 (in Russian).
12. Lyutykh O. Overview of the market for sprayers and fertilizer spreaders. *AgroForum*, 2020, no. 2, pp. 12–21 (in Russian).
13. Raei R., Akbarpour V., Bahmanyar M. A. Morphological attributes and phytochemical compounds of *Satureja hortensis* L. in response to poultry pellet and zinc sulphate applications. *Journal of Horticultural Sciences*, 2023, vol. 36, no. 4, pp. 763–776 (in Persian). <https://doi.org/10.22067/jhs.2021.67877.1006>
14. Jotautiene E., Bivainis V., Mieldazys R., Gaudutis A., Jasinskas A. Experimental and numerical research of granular manure fertilizer application by centrifugal fertilizer spreading. *Proceedings of the 21st international scientific conference "Engineering for rural development", Jelgava, Latvia, 25–27 May 2022*. Jelgava, 2022, pp. 295–299. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF088>
15. Wang X., Liu W., Li Z., Teng Y., Christie P., Luo Y. Effects of long-term fertilizer applications on peanut yield and quality and plant and soil heavy metal accumulation. *Pedosphere*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 555–562. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60457-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60457-0)
16. Rutkoviene V., Cesoniene L., Steponavicius D. Nitrogen losses from organic and mineral fertilizers in model soil system. *Cereal Research Communications*, 2007, vol. 35, no. 2, pp. 313–316. <https://doi.org/10.1556/CRC.35.2007.2.37>
17. Jasinskas A., Pekarskas J., Kucinskas V., Aboltins A. Investigation of natural magnesium mineral fertilizer granulation and determination of granule qualitative indicators. *15th international scientific conference "Engineering for rural development", Jelgava, Latvia, 25–27 May, 2016*. Jelgava, 2016, pp. 647–652.
18. Przywara A., Santoro F., Kraszkiewicz A., Pecyna A., Pascuzzi S. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. *Agriculture*, 2020, vol. 10, no. 10, art. 467. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100467>
19. Reumers J., Tijssens E., Ramon H. Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc: a parameter study. *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 86, no. 3, pp. 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.08.004>
20. Liping Z., Weiqiang Z., Lixin Z., Yulong L. Design of a sieve bucket spreading mechanism based on EDEM. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2019, vol. 12, no. 3, pp. 84–90. <https://doi.org/10.25103/jestr.123.12>

21. Van Liedekerke P., Tijssens E., Dintwa E., Rioual F., Vangeyte J., Ramon H. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. *Powder Technology*, 2009, vol. 190, no. 3, pp. 348–360. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.018>

22. Gromakov M. S., Bepal'ko S. V., Mironenko O. I., Zyablov A. V. Estimation of liquid pressure forces on the tank boiler side at bogie frame swaying. *Nauka i tekhnika transporta* [Transport Science and Technology], 2021, no. 3, pp. 10–13 (in Russian). https://doi.org/10.53883/20749325_2021_03_10

Информация об авторах

Азаренко Владимир Витальевич – член-корреспондент Национальной академии наук, доктор технических наук, доцент, академик-секретарь Отделения аграрных наук Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.basnet.by

Жешко Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 220049, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-5956-8974>. E-mail: azeshko@gmail.com

Information about the authors

Vladimir V. Azarenko – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor, Academic Secretary of the Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-2122-3281>. E-mail: azarenko@presidiun.bas-net.by

Aliaksandr A. Zheshka – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization (1, Knorin St., 220049, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-5956-8974>. E-mail: azeshko@gmail.com