

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

**МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА**  
**MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING**

УДК 631.333-025.13:004.4  
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-145-155>

Поступила в редакцию 20.02.2024  
Received 20.02.2024

**В. В. Азаренко<sup>1</sup>, А. А. Жешко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Республика Беларусь

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАШИН ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ**

**Аннотация.** Установлено, что объемы глобального производства и потребления минеральных удобрений продолжают возрастать, в то время как ресурсы их производства ограничены, что требует совершенствования как технических средств для внесения удобрений, так и решения организационных вопросов химизации земледелия, что в конечном итоге позволит качественно распределять удобрения по поверхности поля в оптимальные агротехнические сроки. Решение поставленных задач может достигаться за счет увеличения точности инструментов для расчета основных эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений, что стало возможным ввиду развития электронных картографических сервисов и специализированных инструментов для комплектования машинно-тракторных агрегатов. Резервом повышения производительности машин химизации земледелия является также определение их рациональных конструктивных параметров в зависимости от конкретных производственных условий, таких как длина гона, контурность полей, особенностей организации работ по внесению удобрений, удаленности от склада удобрений до рабочего участка, внутрихозяйственной логистики. В этой связи предложена аналитическая зависимость для определения функциональной взаимосвязи производительности с основными конструктивными параметрами разбрасывателя удобрений, что является дополнительным критерием выбора рационального сочетания машинно-тракторных агрегатов для внесения удобрений с учетом конкретных производственных условий. Разработан алгоритм, который реализован в программном приложении для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений.

**Ключевые слова:** машины химизации земледелия, внесение удобрений, разбрасыватель, программное приложение, эксплуатационные показатели, способ движения агрегата, дозы удобрений, равномерность распределения удобрений, алгоритм, коэффициент использования времени смены, производительность

**Для цитирования:** Азаренко, В. В. Результаты разработки программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений / В. В. Азаренко, А. А. Жешко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 145–155. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-145-155>

**Vladimir V. Azarenko<sup>1</sup>, Alexander A. Zheshko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Department of Agrarian Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agriculture Mechanization, Minsk, Republic of Belarus

**RESULTS OF DEVELOPMENT OF A SOFTWARE APPLICATION FOR CALCULATING THE  
PERFORMANCE INDICATORS OF MACHINES FOR FERTILIZERS APPLICATION**

**Abstract.** It has been determined that the volume of global production and consumption of mineral fertilizers continues to grow, while their production resources are limited, which requires improving both technical means for fertilizers application and solving organizational issues of arable farming chemicalization, which ultimately will allow for high-quality distribution of fertilizers over the field surface within optimal agrotechnical terms. The tasks can be solved by increasing the accuracy of tools for calculating the basic performance indicators of machines for fertilizers application, which became possible due to

development of electronic cartographic services and specialized tools for assembling machine and tractor units. The reserve for increasing the performance of arable farming chemicalization machines is also the determination of their rational design parameters depending on specific production conditions, such as the length of the run, contour of the fields, specifics of the organization of fertilizer application, the distance from the fertilizer warehouse to the work site and local logistics. In this regard, an analytical dependence is proposed to determine the functional relationship of performance with the main design parameters of the fertilizer spreader, which is an additional criterion for choosing a rational combination of machine and tractor units for fertilization, taking into account specific production conditions. An algorithm has been developed that is implemented in a software application for calculating the performance indicators of machines for fertilizers application.

**Keywords:** arable farming chemicalization machines, fertilizer application, spreader, software application, performance indicators, method of the unit movement, fertilizer doses, uniformity of fertilizer distribution, algorithm, shift time utilization factor, performance

**For citation:** Azarenko V. V., Zheshko A. A. Results of development of a software application for calculating the performance indicators of machines for fertilizers application. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 2, pp. 145–155 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-145-155>

**Введение.** Эффективное применение средств химизации земледелия способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Подтверждением является тот факт, что средства химизации применяются в технологиях возделывания всех без исключения сельскохозяйственных культур, а положительный эффект от применения только пестицидов и минеральных удобрений достигает 60 % [1–3].

Согласно данным, приведенным на мировых статистических интернет-ресурсах, в частности Our World in Data [4], за последние 55 лет отмечается глобальный рост потребления азотных, фосфорных и калийных удобрений, которое к настоящему времени превысило отметку в 200 млн т и будет прогрессировать дальше. При этом между уровнем сельскохозяйственного производства и объемами применения средств химизации существует пропорциональная зависимость. Сказанное является подтверждением того факта, что повышение эффективности сферы применения средств химизации позволит повысить плодородие почв и приумножить урожайность продукции растениеводства. Учитывая взаимосвязь растениеводческой и животноводческой отраслей в сфере потребления кормов, положительный эффект позитивно скажется на производстве продукции животноводства [5].

На рис. 1 представлено потребление минеральных удобрений в расчете на гектар пашни. Объемы глобального производства минеральных удобрений представлены на рис. 2. Как видно из рис. 1, наиболее существенное потребление минеральных удобрений наблюдается в странах, которые являются их производителями. Например, Китай производит около 30 % мирового объема удобрений [6].

С учетом возрастающих из года в год объемов производства и потребления минеральных удобрений актуальным вопросом продолжает оставаться совершенствование и повышение точности инструментов для расчета машин для внесения удобрений. Возможности современных картографических сервисов и специальных программных инструментов позволяют получать точные параметры рабочих участков и находить оптимальные траектории движения [7–9], а с помощью программных средств для комплектования машинно-тракторных агрегатов можно определять рациональные сочетания энергетических средств и сельскохозяйственных машин [10–13].

*Цель работы* – на основе анализа существующих инструментов для расчета эксплуатационных показателей машин химизации земледелия разработать алгоритм функционирования и реализовать его в программном приложении для расчета машин для внесения удобрений.

В зависимости от основного действующего вещества удобрения подразделяют на азотные, фосфорные и калийные [14]. В процессе производства минеральных удобрений существенное внимание уделяется таким их характеристикам, как смешиваемость, гигроскопичность и сыпучесть. Для уменьшения негативного влияния слеживаемости и гигроскопичности удобрения выпускают в виде гранул, вводят в их состав добавки минеральных солей и обрабатывают частицы поверхностно-активными веществами с целью образования на их поверхности гидрофобного слоя.

Сбалансированное применение химических мелиорантов, органических и минеральных удобрений нацелено на окультуривание почвы, т. е. на улучшение режимов питания растений, биоло-

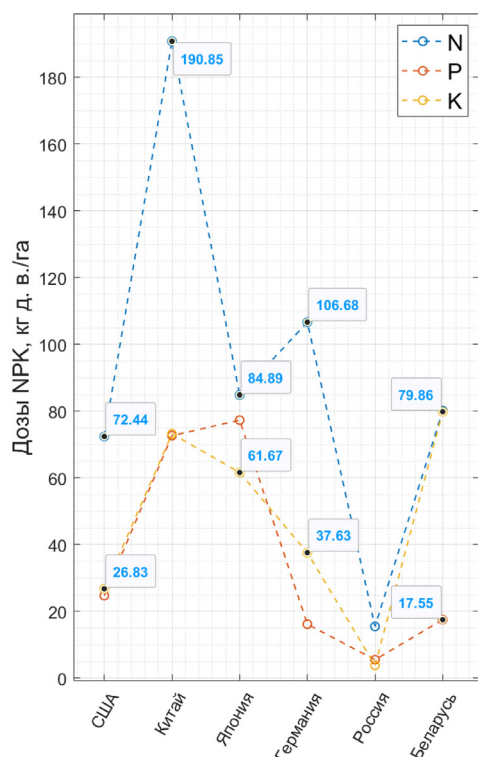


Рис. 1. Потребление минеральных удобрений в расчете на гектар пашни

Fig. 1. Consumption of mineral fertilizers per hectare of arable land

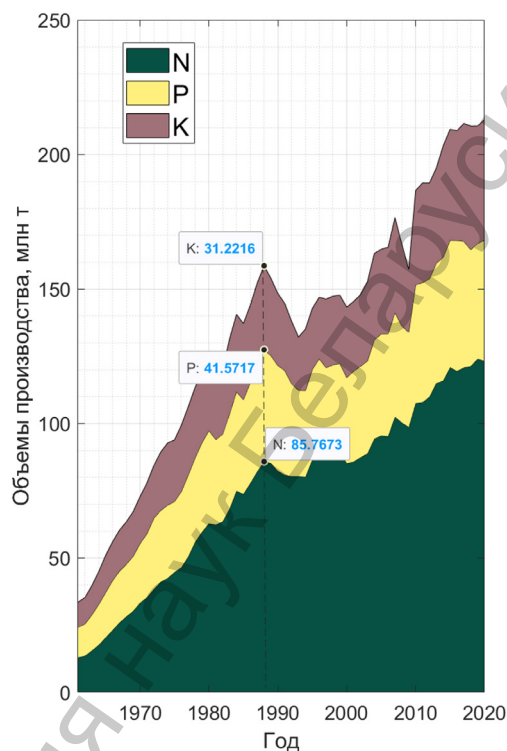


Рис. 2. Объемы глобального производства минеральных удобрений

Fig. 2. Volume of global production of mineral fertilizers

гических и физических свойств, что повышает продуктивность сельскохозяйственных культур [15]. При достижении стадии окультуренности раскрывается потенциал почвенного плодородия и создаются оптимальные условия для развития культурных растений. Планируемую урожайность на окультуренных почвах можно достигнуть внесением меньших доз удобрений, что в конечном итоге позволяет снизить экологическую нагрузку, затраты на возделывание сельскохозяйственных культур и перейти к ресурсосберегающей системе внесения минеральных удобрений [16].

Технические средства химизации земледелия являются машинами общего назначения, которые используются для обработки всех сельскохозяйственных культур [17]. К ним относятся комплексы машин для внесения твердых и жидких минеральных удобрений; твердых, жидких и полужидких органических удобрений, химических мелиорантов и пестицидов. Приоритет названных машин подтверждается тем, что доля их использования в технологиях возделывания всех без исключения сельскохозяйственных культур составляет 40 % и более [18], включая основное, припосевное, подкормочное внесение удобрений, операции по борьбе с вредителями, сорняками и болезнями при уходе за сельскохозяйственными культурами, а также технологические операции по известкованию почв [19]. В связи с тем, что машины химизации используются с ранней весны до поздней осени, их годовая загрузка выше, чем у другой сельскохозяйственной техники. Кроме того, машины для внесения удобрений взаимодействуют с агрессивными средами, что устанавливает определенные требования к обеспечению их надежности [20].

**Материалы и методы исследований.** Для определения рационального направления движения по выбранному участку, вычисления коэффициента рабочих ходов, соотношения рабочих и холостых ходов, а также других эксплуатационных показателей воспользуемся инструментом для оптимизации Agronaut [7–10].

После определения параметров рабочего участка осуществляется комплектование машинно-тракторного агрегата. Для решения этой задачи целесообразно использовать инструмент AgroAQ

[11–13]. Перед выполнением вычислений следует из выпадающих списков выбрать вид разбрасывателя удобрений и предполагаемую марку трактора для агрегатирования. После завершения редактирования параметров машинно-тракторного агрегата необходимо выполнить расчет, нажав на соответствующую кнопку приложения. В результате автоматически строится график, анализируя который можно оценить правильность комплектования агрегата.

После определения рациональной траектории движения и комплектования машинно-тракторного агрегата целесообразно выполнить уточняющие расчеты для определения производительности при внесении удобрений. Это связано с тем, что технологическая операция может выполняться различными сочетаниями машин и энергетических средств, но при этом эффективность выполнения работы будет различаться. Например, для небольших рабочих участков целесообразно использовать маневренные навесные агрегаты, для больших площадей – прицепные широкозахватные разбрасыватели. В этой связи необходимо установить зависимость производительности от основных конструктивных параметров разбрасывателей удобрений.

Представим производительность разбрасывателя удобрений  $W_p$  как функцию от ширины захвата  $B$  и объема бункера  $V$ , т. е.  $W_p = f(B, V)$ . Для этого выразим коэффициент использования времени смены  $\tau$ , который в данном случае определяется как отношение времени основной работы по внесению удобрений  $t_p$  к действительному времени смены  $t_d$ , т. е.  $\tau = t_p/t_d$ . Чистое время работы разбрасывателя равно времени, затрачиваемому на внесение удобрений. Так, если объем бункера разбрасывателя обозначить как  $V$ , то при внесении минеральных удобрений плотностью  $\gamma$  время  $t_{p1}$  на внесение удобрений определится как

$$t_{p1} = \gamma V / q, \quad (1)$$

где  $t_{p1}$  – время, затрачиваемое на внесение удобрений за одну загрузку, ч;  $V$  – объем бункера, м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – плотность минеральных удобрений, кг/м<sup>3</sup>;  $q$  – расход удобрений в единицу времени, кг/ч.

Расход удобрений в единицу времени определяется как

$$q = BHv_p / 10, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина захвата штанговой машины, м;  $H$  – норма внесения минеральных удобрений, кг/га;  $v_p$  – рабочая скорость движения агрегата, км/ч.

Тогда

$$t_{p1} = \frac{10\gamma V}{BHv_p}. \quad (3)$$

Действительное время смены  $t_d$  представим в следующем виде:

$$t_d = n_c (t_{p1} + t_x + t_z + 2t_{tr}) + t_{to} + t_{ot} + t_{pz}, \quad (4)$$

где  $n_c$  – количество циклов внесения удобрений за смену;  $t_x$  – общее время, затрачиваемое на развороты во время разгрузки 1 бункера удобрений, ч;  $t_z$  – время на загрузку удобрений в бункер, ч;  $t_{tr}$  – время, затрачиваемое на переезд с места внесения до места загрузки удобрений, ч;  $t_{to}$  – время на техническое обслуживание агрегата, ч;  $t_{ot}$  – время на отдых и личные надобности оператора, ч;  $t_{pz}$  – подготовительно-заключительное время, ч.

Количество циклов внесения удобрений за смену  $n_c$  можно определить по формуле

$$n_c = \frac{T - (t_{to} + t_{ot} + t_{pz})}{t_{p1} + t_x + t_z + 2t_{tr}}, \quad (5)$$

где  $T$  – время смены, ч.

Время, необходимое для заполнения разбрасывателя новой порцией удобрений, можно представить как сумму времени, необходимого для подъезда загрузочного средства к разбрасывателю  $t_{pd}$ , и времени, потребного для заполнения бункера новой порцией минеральных удобрений:

$$t_z = t_{pd} + \gamma V / W_z, \quad (6)$$

где  $W_z$  – производительность загрузчика минеральных удобрений, кг/ч.

Время, затрачиваемое на переезд с места внесения до места загрузки удобрений  $t_{tr}$  определим по формуле

$$t_{tr} = \frac{l_{tr}}{v_{tr}}, \quad (7)$$

где  $l_{tr}$  – расстояние транспортировки, км;  $v_{tr}$  – транспортная скорость разбрасывателя, км/ч.

Чтобы найти общее время, затрачиваемое на развороты во время разгрузки бункера удобрений, вычислим длину холостого хода разбрасывателя удобрений при развороте:

$$l_x = 2\xi(l_T + l_p) + 8R_0, \quad (8)$$

где  $R_0$  – радиус поворота, м;  $\xi$  – коэффициент, зависящий от способа агрегатирования разбрасывателя удобрений,  $l_T$  и  $l_p$  – соответственно кинематическая длина трактора и разбрасывателя удобрений, м.

Количество разворотов при внесении удобрений с одной загрузки

$$n_{rz} = \frac{10^4 \gamma V}{BHL_g} - 1, \quad (9)$$

где  $L_g$  – длина гона, м.

Тогда

$$t_x = \frac{(2\xi(l_T + l_p) + 8R_0) \left( \frac{10^4 \gamma V}{BHL_g} - 1 \right)}{10^3 v_p}. \quad (10)$$

Время основной работы по внесению удобрений  $t_p$  определим как

$$t_p = n_c t_{p1} = \frac{10\gamma V (T - t_{to} - t_{ot} - t_{pz})}{BHv_p \left( \frac{2l_{tp}}{v_{tp}} + \frac{10\gamma V}{BHv_p} + \frac{\gamma V}{W_z} + t_{pd} + t_x \right)}. \quad (11)$$

Тогда, учитывая, что  $\tau = t_p / t_{pd}$ , для определения коэффициента времени смены получим формулу

$$\tau = \frac{10\gamma V (T - t_{to} - t_{ot} - t_{pz})}{TBHv_p \left( \frac{2l_{tp}}{v_{tp}} + \frac{10\gamma V}{BHv_p} + \frac{\gamma V}{W_z} + t_{pd} + t_x \right)}. \quad (12)$$

Производительность разбрасывателя удобрений составит

$$W_p = 0,1Bv_p \tau = \frac{\gamma V (T - t_{to} - t_{ot} - t_{pz})}{TH \left( \frac{2l_{tp}}{v_{tp}} + \frac{10\gamma V}{BHv_p} + \frac{\gamma V}{W_z} + t_{pd} + t_x \right)} = \frac{\gamma V (T - t_{to} - t_{ot} - t_{pz})}{TH \left( \frac{2l_{tp}}{v_{tp}} + \frac{10\gamma V}{BHv_p} + \frac{\gamma V}{W_z} + t_{pd} + \frac{(2\xi(l_T + l_p) + 8R_0) \left( \frac{10^4 \gamma V}{BHL_g} - 1 \right)}{10^3 v_p} \right)}. \quad (13)$$



Необходимо отметить, что формула (13) позволяет определить производительность разбрасывателя удобрений в зависимости от конструктивных параметров и конкретных производственных условий.

**Результаты и их обсуждение.** Диаграмма, представляющая функциональную модель программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений, представлена на рис. 3. Исходными данными является информация о разбрасывателях П, предоставляемая заводами-изготовителями, а также технические характеристики вспомогательных погрузочных и транспортных средств I2. Выходными результатами являются эксплуатационные показатели O1.

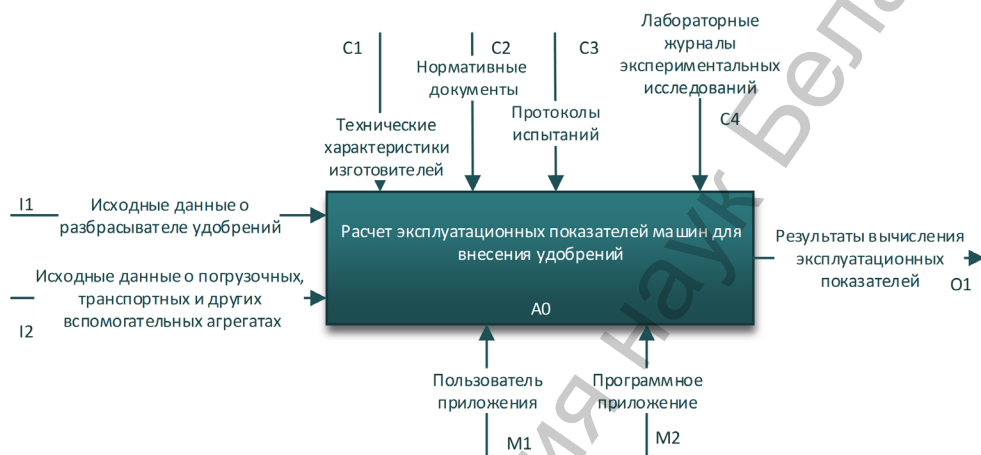


Рис. 3. Диаграмма, представляющая функциональную модель программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений

Fig. 3. Diagram representing a functional model of the software application for calculating performance of fertilizer machines application for calculating the performance of fertilizer machines

Механизмами контроля в соответствии с рис. 3 являются технические характеристики заводов-изготовителей C1, нормативные документы C2, протоколы испытаний C3 и лабораторные журналы C4. К механизмам реализации относятся совместные действия пользователя M1, который осуществляет выбор и анализ исходной информации A1, подбор агрегата для внесения удобрений (рис. 4) и функциональные возможности программного приложения M2, которое

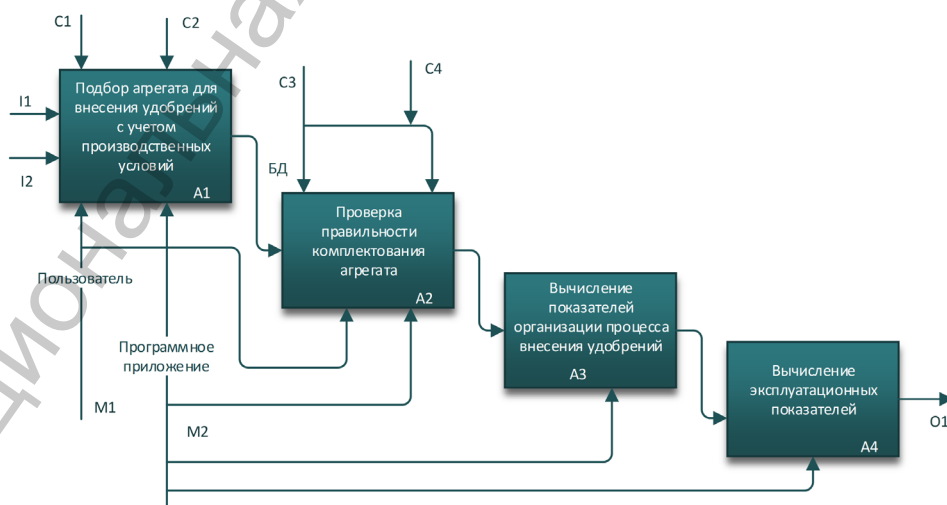


Рис. 4. Декомпозиция функциональной модели программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений

Fig. 4. Decomposition of the functional model of the software application for calculating the performance of fertilizer machines

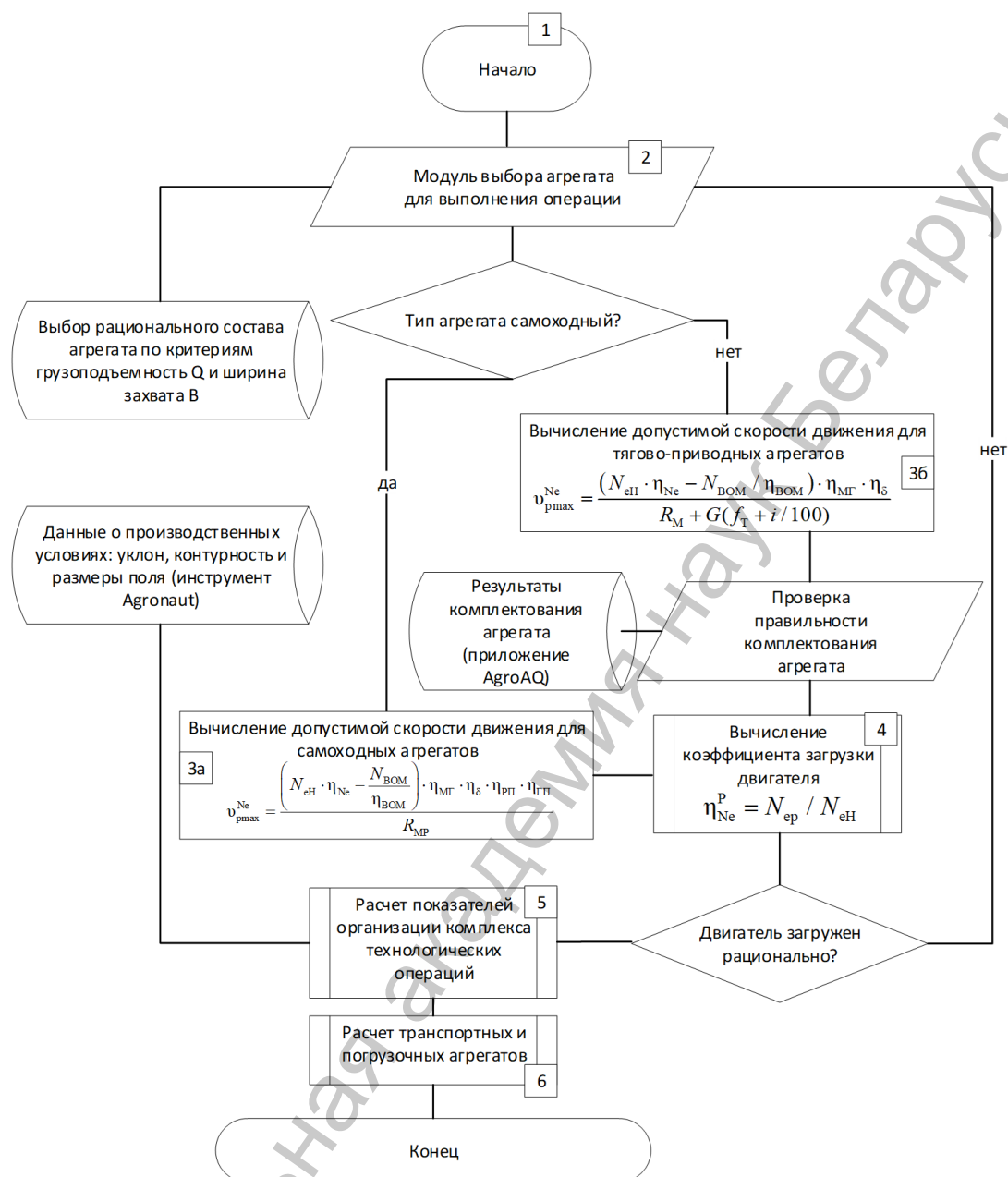


Рис. 5. Алгоритм функционирования программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений

Fig. 5. Algorithm of the software application for calculating the performance of fertilizer machines

позволяет проверить правильность комплектования агрегата A2, вычислить показатели организации процесса A3 и эксплуатационные показатели процесса внесения удобрений A4.

Алгоритм функционирования программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений представлен на рис. 5. На модуль выбора агрегата для выполнения операции 2 подается информация о имеющейся в распоряжении технике для внесения удобрений и данные о характеристике обрабатываемого участка. Далее по критериям грузоподъемности и ширины захвата разбрасывателя определяется наиболее производительный состав агрегата с учетом конкретных производственных условий.

В блоке проверки типа агрегата происходит переход к определению допустимой скорости движения по нагрузке двигателя. Для тягово-приводных агрегатов выполняется проверка правильности комплектования с учетом функционала приложения AgroAQ, а также проводится

дополнительная проверка загрузки двигателя. Далее выполняются расчеты для комплекса технологических операций с учетом данных о конкретных производственных условиях, после чего результаты вычислений передаются в блок расчета вспомогательных транспортных и погрузочных агрегатов в зависимости от особенностей организации процесса внесения удобрений.

Предлагаемая функциональная модель (рис. 3, 4) и алгоритм (рис. 4) реализованы в программном приложении для расчета эксплуатационных показателей машин внесения удобрений (рис. 6). Видно, что форма состоит из заголовка 1, блока ввода исходных данных 2, блока выбора основного агрегата для внесения удобрений 3, блока выбора погрузочного агрегата 4, блока ввода данных о составляющих времени смены 5.

Блок ввода исходных данных (см. рис. 6, а) состоит из полей ввода данных о дозе вносимых удобрений, расстоянии транспортировки удобрений, среднем уклоне рабочего участка, выпадающего списка для выбора радиуса поворота агрегата, полей ввода длины и ширины рабочего участка и плотности вносимых удобрений.

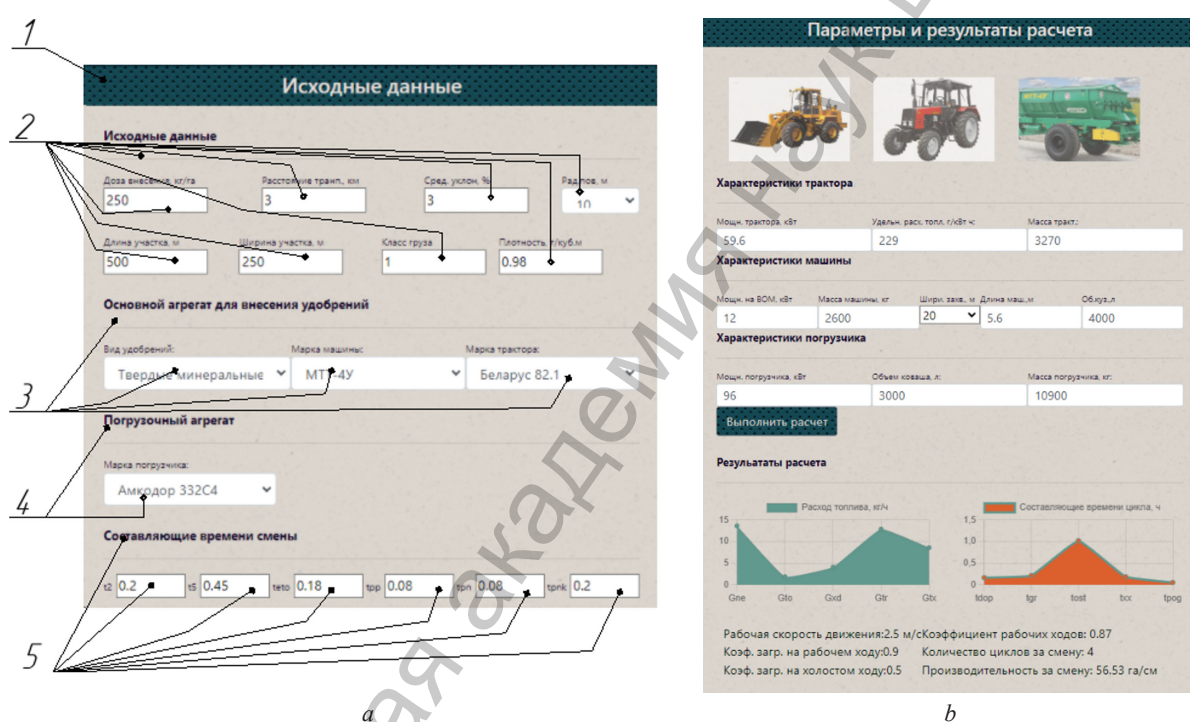


Рис. 6. Формы ввода исходных данных программы и результатов вычислений: а – исходные данные: 1 – заголовок формы; 2 – блок ввода исходных данных; 3 – блок выбора основного агрегата для внесения удобрений; 4 – блок выбора погрузочного агрегата; 5 – блок ввода данных о составляющих времени смены; б – параметры и результаты расчета

Fig. 6. Forms for input of the program initial data and calculation results: а – initial data: 1 – form header; 2 – block for entering initial data; 3 – block for selecting the main fertilizer unit; 4 – block for selecting the loading unit; 5 – block for input data on the components of the shift time; б – parameters and calculation results

В зависимости от выбранной марки машины для внесения удобрений осуществляется автоматизированное формирование списка тракторов для агрегатирования с указанной машиной, которые оптимально подходят для комплектования по критерию загрузки двигателя.

Для выбора марки погрузочного агрегата необходимо из выпадающего списка выбрать элемент. Перед выполнением расчетов нужно ввести данные о составляющих времени смены. Для этого в поля ввода необходимо ввести время на техническое обслуживание агрегата в поле, на отдых и личные надобности, ежесменное техническое обслуживание, на подготовку агрегата к переезду, на получение наряда и сдачу работы, на переезды.

После выбора технических средств для внесения удобрений путем заполнения форм в блоке вывода выбранных технических средств появятся их изображения.



Вместе с выбором из выпадающего списка марки трактора в блоке вывода данных о характеристике трактора появляются данные, которые при необходимости можно редактировать. Аналогично после выбора из выпадающего списка марки разбрасывателя в блоке вывода данных о характеристике разбрасывателя удобрений появляются данные, которые при необходимости можно редактировать перед выполнением расчетов. Кроме того, после выбора из выпадающего списка марки погрузочного агрегата в блоке вывода данных о характеристике погрузчика появляются данные, которые при необходимости можно редактировать.

В нижней части блока расположена кнопка для запуска вычислений. После завершения выбора исходных данных необходимо нажать на кнопку, в результате чего в нижней части формы появятся результаты вычислений и графическая информация.

В соответствии с рис. 6, *b* в качестве результатов вычислений отображаются графики составляющих расхода топлива при выполнении технологической операции внесения удобрений: номинальный часовой расход топлива, расход топлива при остановках трактора, расход топлива на холостом ходу.

Также отображается графическая информация о составляющих времени цикла и выводятся результаты вычисления эксплуатационных показателей машины для внесения удобрений.

**Выводы.** Предложены аналитические зависимости, позволяющие для конкретных производственных условий (расстояние перевозки удобрений до рабочего участка, длина гона и размеры рабочего участка) выбирать состав агрегата для внесения минеральных удобрений, который выполняет операцию с наибольшей производительностью. Предложены функциональная модель и алгоритм функционирования программного приложения для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений. Результаты исследований реализованы в программном приложении для расчета эксплуатационных показателей машин для внесения удобрений.

#### Список использованных источников

1. 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. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва; редкол.: П. П. Казакевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2022. – С. 27–33.
2. Степук, Л. Я. Построение машин химизации земледелия / Л. Я. Степук, А. А. Жешко. – Минск: [б. и.], 2012. – 443 с.
3. 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 // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2017. – № 2. – С. 132–136.
4. Our World in Data [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ourworldindata.org>. – Date of access: 08.12.2023.
5. Statista [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.statista.com>. – Date of access: 17.12.2023.
6. Top 10 phosphate countries by production [Electronic resource] // Investing News Network. – Mode of access: <https://investingnews.com/search/?q=Top+10+Phosphate+Countries+by+Production+>. – Date of access: 17.12.2023.
7. Жешко, А. А. Современные тенденции эксплуатации машинно-тракторных агрегатов на основе зарубежного опыта / А. А. Жешко, А. В. Ленский // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию со дня образования РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», Минск, 18–20 окт. 2017 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва; ред.: П. П. Казакевич, Л. Ж. Кострома. – Минск, 2017. – С. 253–255.
8. Ленский, А. В. Анализ методов расчета оптимальных маршрутов движения машинно-тракторного агрегата по полевому участку произвольной конфигурации / А. В. Ленский, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2018. – Вып. 51. – С. 212–220.
9. Ленский, А. В. Оптимизация маршрутов движения машинно-тракторных агрегатов по рабочим участкам простой конфигурации / А. В. Ленский, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2019. – Вып. 52. – С. 13–18.
10. Ленский, А. В. Методы определения тягового сопротивления сельскохозяйственных машин / А. В. Ленский, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2022. – Вып. 55. – С. 188–198.
11. Ленский, А. В. Разработка алгоритма рационального комплектования машинно-тракторных агрегатов для основной обработки почвы / А. В. Ленский, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства:

межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2023. – Вып. 56. – С. 56–62.

12. Жешко, А. А. Функциональная и информационная модели автоматизированной системы рационального комплектования машинно-тракторных агрегатов / А. А. Жешко, А. В. Ленский // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2023. – Вып. 56. – С. 202–207.

13. Жешко, А. А. Графоаналитический метод расчета роторного распределяющего рабочего органа / А. А. Жешко // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 25–26 авг. 2010 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва; редкол.: П. П. Казакевич, О. О. Дударев. – Минск, 2010. – С. 54–58.

14. Лапа, В. В. Продуктивность сельскохозяйственных культур и применение минеральных удобрений в Республике Беларусь / В. В. Лапа, Е. Г. Мезенцева, О. Г. Кулеш // Почвоведение и агрохимия. – 2020. – № 1 (64). – С. 7–14.

15. Лапа, В. В. Повышение плодородия почв и эффективности применения удобрений – основные приоритеты в развитии агрохимических исследований (на примере Республики Беларусь) / В. В. Лапа // Плодородие. – 2019. – № 3 (108). – С. 3–6. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.108.01>

16. Мишура, О. И. Минеральные удобрения и их применение при современных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур / О. И. Мишура, И. Р. Вильдфлуш, В. В. Лапа. – Горки: БГСХА, 2011. – 176 с.

17. Научно-технические основы построения машин химизации земледелия / Л. Я. Степук [и др.]. – Горки: БГСХА, 2022. – 410 с.

18. Степук, Л. Я. О качестве, количестве и экономической эффективности машин для внесения удобрений / Л. Я. Степук, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межведомств. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2009. – Вып. 43, т. 1. – С. 14–19.

19. Степук, Л. Я. Сравнительная оценка отечественных и зарубежных разбрасывателей твердых минеральных удобрений (грузоподъемность и масса) / Л. Я. Степук, А. А. Жешко, С. А. Антошук // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 окт. 2009 г.: в 3 т. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2010. – Т. 1. – С. 81–88.

20. Степук, Л. Я. К вопросу оптимизации количественного состава парка машин химизации / Л. Я. Степук, А. А. Жешко // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 окт. 2012 г.: в 3 т. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2012. – Т. 1. – С. 119–128.

## References

1. Stepuk L. Ya. Evidence of the need to develop and implement a state scientific and technical programme of priority agricultural machinery engineering. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 75-letiyu obrazovaniya RUP "NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaistva"*, Minsk, 20–21 oktyabrya 2022 g. [Scientific and technical progress in agricultural production: proceedings of the International scientific and technical conference, dedicated to the 75<sup>th</sup> anniversary of the foundation of the RUE "Scientific and Practical Centre for Agricultural Mechanisation of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, October 20–21, 2022]. Minsk, 2022, pp. 27–33 (in Russian).

2. Stepuk L. Ya., Zheshko A. A. *Construction of machines for chemicalisation of farming*. Minsk, 2012. 443 p. (in Russian).

3. Stepuk L. Ya., 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'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Belarussian State Agricultural Academy*, 2017, no. 2, pp. 132–136 (in Russian).

4. *Our World in Data*. Available at: <https://ourworldindata.org> (accessed 08.12.2023).

5. *Statista*. Available at: <https://www.statista.com> (accessed 17.12.2023).

6. Top 10 phosphate countries by production. *Investing News Network*. Available at: <https://investingnews.com/search/?q=Top+10+Phosphate+Countries+by+Production+> (accessed 17.12.2023).

7. Zheshko A. A., Lenskii A. V. Modern trends in the operation of machine and tractor units based on foreign experience. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu so dnya obrazovaniya RUP "NPTs NAN Belarusi po mekhanizatsii sel'skogo khozyaistva"*, Minsk, 18–20 oktyabrya 2017 g. [Scientific and technical progress in agricultural production: proceedings of the International scientific and technical conference, dedicated to the 75<sup>th</sup> anniversary of the foundation of the RUE "Scientific and Practical Centre for Agricultural Mechanisation of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, October 18–20, 2017]. Minsk, 2017, pp. 253–255 (in Russian).

8. Lensky A. V., Zheshko A. A. Analysis of methods of calculation of optimum routes of motion of the machine and tractor unit for the field site of any configuration. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2018, iss. 51, pp. 212–220 (in Russian).

9. Lensky A. V., Zheshko A. A. Optimization of routes of movement of machine aggregates on working fields of simple configuration. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2019, iss. 52, pp. 13–19 (in Russian).

10. Lensky A. V., Zheshko A. A. Methods for determining the traction resistance of agricultural machines. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2022, iss. 55, pp. 188–198 (in Russian).
11. Lenski A. V., Zheshko A. A. Development of an algorithm for rational acquisition of machine-tractor units for basic tillage. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2023, iss. 56, pp. 56–62 (in Russian).
12. Zheshko A. A., Lenski A. V. Functional and information models of the automated system of rational acquisition of machine-tractor aggregates. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2023, iss. 56, pp. 202–207 (in Russian).
13. Zheshko A. A. A graphic-analytical method for calculating a rotary spreading tool. *Energoresursozberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya ikh obespecheniya v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, Minsk, 25–25 avgusta 2010 g.* [Energy and resource saving technologies and technical means for their provision in agricultural production: proceedings of the International scientific and practical conference of young scientists, Minsk, August 25–26, 2010]. Minsk, 2010, pp. 54–58 (in Russian).
14. Lapa V. V., Mezentseva E. G., Kulesh O. G. Productivity of agricultural crops and application of mineral fertilizers in the Republic of Belarus. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2020, no. 1 (64), pp. 7–14 (in Russian).
15. Lapa V. V. Soil fertility and efficiency improvement applications of fertilizers – key priorities in development of agrochemical research (on the example of the Republic of Belarus). *Plodorodie*, 2019, no. 3 (108), pp. 3–6 (in Russian). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.108.01>
16. Mishura O. I., Vil'dflush I. R., Lapa V. V. *Mineral fertilizers and their application in modern technologies cultivation of agricultural crops*. Gorki, Belarusian State Agricultural Academy, 2011. 176 p. (in Russian).
17. Stepuk L. Ya., Petrovets V. R., Begun P. P., Zheshko A. A., Golyban V. V. *Scientific and technical foundations of the construction of chemical farming machines*. Gorki, Belarusian State Agricultural Academy, 2022. 410 p. (in Russian).
18. Stepuk L. Ya., Zheshko A. A. On the quality, quantity and economic efficiency of fertilizer machines. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva: mezhvedomstvennyi tematicheskii sbornik* [Mechanization and electrification of agriculture: interdepartmental subject collection]. Minsk, 2009, iss. 43, vol. 1, pp. 14–19 (in Russian).
19. Stepuk L. Ya., Zheshko A. A., Antoshuk S. A. Comparative assessment of domestic and foreign spreaders of solid mineral fertilizers (load capacity and weight). *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 21–22 oktyabrya 2009 g.* [Scientific and technical progress in agricultural production: proceedings of the International scientific and technical conference]. Minsk, 2010, vol. 1, pp. 81–88 (in Russian).
20. Stepuk L. Ya., Zheshko A. A. On the issue of optimizing the quantitative composition of the fleet of chemicalization machines. *Nauchno-tekhnicheskii progress v sel'skokhozyaistvennom proizvodstve: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, 10–11 oktyabrya 2012 g.* [Scientific and technical progress in agricultural production proceedings of the International scientific and technical conference]. Minsk, 2012, vol. 1, pp. 119–128 (in Russian).

### Информация об авторах

*Азаренко Владимир Витальевич* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, 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](mailto: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](mailto: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](mailto:azarenko@presidiun.bas-net.by)

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