

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9063

УДК 631.33

Статья

Оценка эффективности использования усовершенствованного беспилотного летательного аппарата при внесении сухих минеральных удобрений

Васильев Владимир Викторович

*кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Афоничев Дмитрий Николаевич

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
dtafonichev@yandex.ru*

Аксенов Игорь Игоревич

*кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
igor-aksenov1989@ya.ru*

Еремин Михаил Юрьевич

*кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
ети69@yandex.ru*

Получена: 5 октября 2025 / Принята: 11 февраля 2026 / Опубликовано: 11 марта 2026

Аннотация: Усовершенствован беспилотный летательный аппарат, предназначенный для посева сельскохозяйственных культур и внесения в почву сыпучих минеральных удобрений. Отличительная особенность данного беспилотного летательного аппарата — пониженный собственный вес, что даёт возможность увеличить объём ящика для загрузки семян или сыпучих минеральных удобрений. Приведена методика оценки эффективности использования беспилотного летательного аппарата при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на озимых зерновых культурах по сравнению с наземными разбрасывателями, которая предусматривает два варианта: первый — наземными разбрасывателями не выполняется подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением

после схода снежного покрова, а только выполняется своевременная подкормка в период весеннего кущения, при этом подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением беспилотными летательными аппаратами выполняется своевременно и в полном объёме; второй — наземными разбрасывателями не выполняется подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением после схода снежного покрова и в период весеннего кущения, при этом подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением беспилотными летательными аппаратами выполняется своевременно и в полном объёме. Для каждого варианта приведены формулы для расчёта экономического эффекта. Результаты расчёта экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы в зависимости от площади посева, стоимости озимой пшеницы и затрат на внесение минеральных удобрений беспилотными летательными аппаратами показали, что при изменении площади посева озимой пшеницы от 100 до 1000 га для обоих вариантов экономический эффект присутствует и изменяется от 2040 до 26419 тыс. руб. В случае изменения стоимости озимой пшеницы от 1050 до 1500 руб./ц для обоих вариантов экономический эффект также присутствует и изменяется от 5940 до 13169 тыс. руб. При затратах на внесение минеральных удобрений беспилотными летательными аппаратами после схода снежного покрова и в период весеннего кущения соответственно 8000—16500 руб./га и 6000—14500 руб./га применение беспилотных летательных аппаратов целесообразно и характеризуется положительным экономическим эффектом: от 10469 до 1469 тыс. руб., при больших затратах применение беспилотных летательных аппаратов становится невыгодным.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; наземный разбрасыватель; минеральное удобрение; озимые зерновые культуры

DOI: 10.15393/j2.art.2026.9063

Article

Assessment of an improved unmanned aerial vehicle performance efficiency for dry mineral fertilization

Vladimir Vasiliev

*Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation),
vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Dmitry Afonichev

*D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation),
dmafonichev@yandex.ru*

Igor Axenov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation),
igor-aksenov1989@ya.ru*

Mikhail Eremin

*Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation),
emu69@yandex.ru*

Received: 5 October 2025 / Accepted: 11 February 2026 / Published: 11 March 2026

Abstract: The article deals with an improved unmanned aerial vehicle designed for sowing crops and applying loose mineral fertilizers to the soil. A distinctive feature of this unmanned aerial vehicle is its reduced weight, which allows for a larger capacity for loading seeds or loose mineral fertilizers. The authors present a methodology for evaluating the effectiveness of using an unmanned aerial vehicle for early spring application of mineral fertilizers on winter crops compared with ground — based spreaders. The methodology specifies two options. The first one regards the situation when ground-based spreaders do not fertilize winter crops with mineral fertilizer after snow cover melting, but fertilize them only during spring tillering, while fertilizing of winter crops performed with unmanned aerial vehicles is done in a timely and complete manner. The second option regards the situation when ground-based spreaders do not fertilize winter crops with mineral fertilizer either after snow cover melting or during

spring tillering while both operations are performed with unmanned aerial vehicles in a timely and complete manner. Formulas for calculating the economic effect are provided for each option. The results of calculating the economic effect of using unmanned aerial vehicles instead of ground-based spreaders for early spring application of mineral fertilizers on winter wheat crops, depending on the area of sowing, the cost of winter wheat, and the cost of applying mineral fertilizers using unmanned aerial vehicles, showed that for both options, the economic effect is present and varies from 2.040.000 rubles to 26.419.000 rubles, depending on the area of sowing of winter wheat. If the cost of winter wheat changes from 1,050 rubles per centner to 1.500 rubles per centner for both options, the economic effect also changes from 5.940.000 rubles to 13.169.000 rubles. When the cost of applying mineral fertilizers with unmanned aerial vehicles after the snow cover melting and during the spring tillering period is 8.000—16.500 rubles per hectare and 6.000—14.500 rubles per hectare, respectively, the use of unmanned aerial vehicles is advisable and has a positive economic effect ranging from 10.469.000 rubles to 1.469.000 rubles. However, when the cost is higher, the use of unmanned aerial vehicles becomes unprofitable.

Keywords: unmanned aerial vehicle; ground spreader; mineral fertilizer; winter grain crops

1. Введение

Интенсивная технология возделывания сельскохозяйственных культур в обязательном порядке предусматривает внесение органических и минеральных удобрений как предварительно в почву, так и в процессе вегетации растений [1—11]. Предварительное внесение органических и минеральных удобрений в почву осуществляется перед осенней обработкой почвы, а также в весенний период времени года перед весенней обработкой почвы и при посеве сельскохозяйственных культур. Внесение удобрений (как правило, минеральных) в процессе вегетации растений реализуется в ранневесенний период года по озимым зерновым культурам, где гранулированные азотные удобрения вносятся в почву путём разбрасывания по поверхности земли. При этом ранневесеннее внесение минеральных удобрений производится наземными техническими средствами [3], [6], [12—15]. В летний период года подкормка растений производится распылением рабочего раствора минерального удобрения. Данные работы выполняются не только наземными техническими средствами [1], [3—8], [12—15], но и посредством беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) сельскохозяйственного назначения [16—26].

Для получения высокого урожая озимых зерновых культур необходимо своевременно осуществлять подкормку вегетирующих растений за счёт ранневесеннего внесения азотных удобрений, т. е. после схода снежного покрова по таломёрзлой почве [3], [4], [6]. Затем внесение минеральных азотных удобрений осуществляется в период весеннего кущения озимых зерновых культур, а последующая подкормка по листу (листовая подкормка) реализуется согласно данным, полученным при определении уровня обеспечения растений элементами питания [3], [6]. Полученные данные определяют количество подходов подкормки по листу и их интенсивность.

Ранневесеннее внесение азотных удобрений по посевам озимых зерновых культур производится различными видами наземных технических средств на колёсном ходу [12—15], где основным условием является их проезд по сельскохозяйственному полю, когда движители проходят по изначально созданной постоянной технологической колее или непосредственно по посевам. В настоящее время в Центральном Черноземье наблюдаются тёплые зимы, в результате этого не представляется возможность проезда технических средств по таломёрзлой почве, что приводит к смещению сроков внесения азотных удобрений, а следовательно, и к потере урожая озимых зерновых культур. Смещение сроков внесения азотных удобрений происходит в сторону периода весеннего кущения озимых зерновых культур, и при указанных обстоятельствах может происходить первое внесение азотных удобрений непосредственно в период весеннего кущения озимых, что также снижает урожайность. Единственным вариантом исключения указанных недостатков является использование авиационного способа внесения азотных удобрений посредством БПЛА, что позволит своевременно вносить азотные удобрения на посевы озимых культур, исключить создание и формирование постоянной технологической колеи, а также уплот-

нение почвы движителями наземных технических средств. На основании вышесказанного определена цель работы — усовершенствовать конструкцию БПЛА для внесения сухих минеральных удобрений и произвести оценку эффективности его использования при ранневесеннем внесении азотных удобрений на посевах озимых зерновых культур.

2. Материалы и методы

Современная тенденция развития БПЛА способствовала разработке в Китае ряда конструкций летательных аппаратов [27—32], предназначенных для посева семян сельскохозяйственных культур и внесения сыпучих минеральных удобрений. Анализ указанных конструкций БПЛА позволил усовершенствовать многофункциональный БПЛА (рисунки 1—3) [33]. Данный БПЛА предназначен как для посева сельскохозяйственных культур, так и для внесения азотных удобрений на посевах озимых зерновых культур.

Усовершенствованный БПЛА [33] включает кольцевой корпус 1, с внешней стороны которого закреплены четыре горизонтальные штанги 2 на равном удалении друг от друга. На свободном конце каждой горизонтальной штанги 2 сверху установлен двигатель 3 с лопастями воздушного винта 4. С нижней стороны кольцевого корпуса 1 жёстко закреплены опорные штоки 5. Свободный конец каждого опорного штока 5 соединён с опорной пластиной 6, размещённой в гильзе 7, где между опорной пластиной 6 и внутренней стороной дна гильзы 7 размещена пружина 8, а с внешней стороны дна гильзы 7 закреплена резиновая прокладка 9. В кольцевой корпус 1 установлен ящик 10, оснащённый с верхней стороны крышкой 11, которая по бокам имеет отверстия 12 для засыпки минерального удобрения 13, а с нижней стороны — подающей трубкой 14. Внутри ящика 10 вертикально установлен шнек 15. Верхний конец шнека 15 закреплён за вал серводвигателя 16, расположенного в водонепроницаемом чехле 17 с внешней стороны крышки 11. Нижний конец шнека 15, оснащённый шпилькой 18, проходит через подшипниковый узел 19, который зафиксирован в подающей трубке 14 горизонтальными рёбрами жёсткости 20. Подающая трубка 14 проходит через сквозное отверстие 21, выполненное в центре верхнего подвижного диска 22, и устанавливается таким образом, что торцевая часть свободного конца подающей трубки 14 располагается на уровне высоты разделительных пластин 23, которые одним ребром зафиксированы на нижней стороне верхнего подвижного диска 22, а другим ребром — на верхней стороне нижнего подвижного диска 24. При этом шпилька 18 заходит в сквозное отверстие 25, выполненное в центре нижнего подвижного диска 24. Нижний подвижной диск 24 плотно прилегает к торцевой части шнека 15 и фиксируется на шпильке 18 гайкой 26, которая закручивается в сторону вращения нижнего подвижного диска 24.

БПЛА для внесения удобрений при ранневесеннем внесении азотных удобрений на посевах озимых культур работает следующим образом. В ящик 10 через отверстия 12, имеющиеся с верхней стороны крышки 11, засыпают минеральное удобрение 13. Оператор сигналом с пульта управления запускает БПЛА и направляет его в зону внесения удобрений.

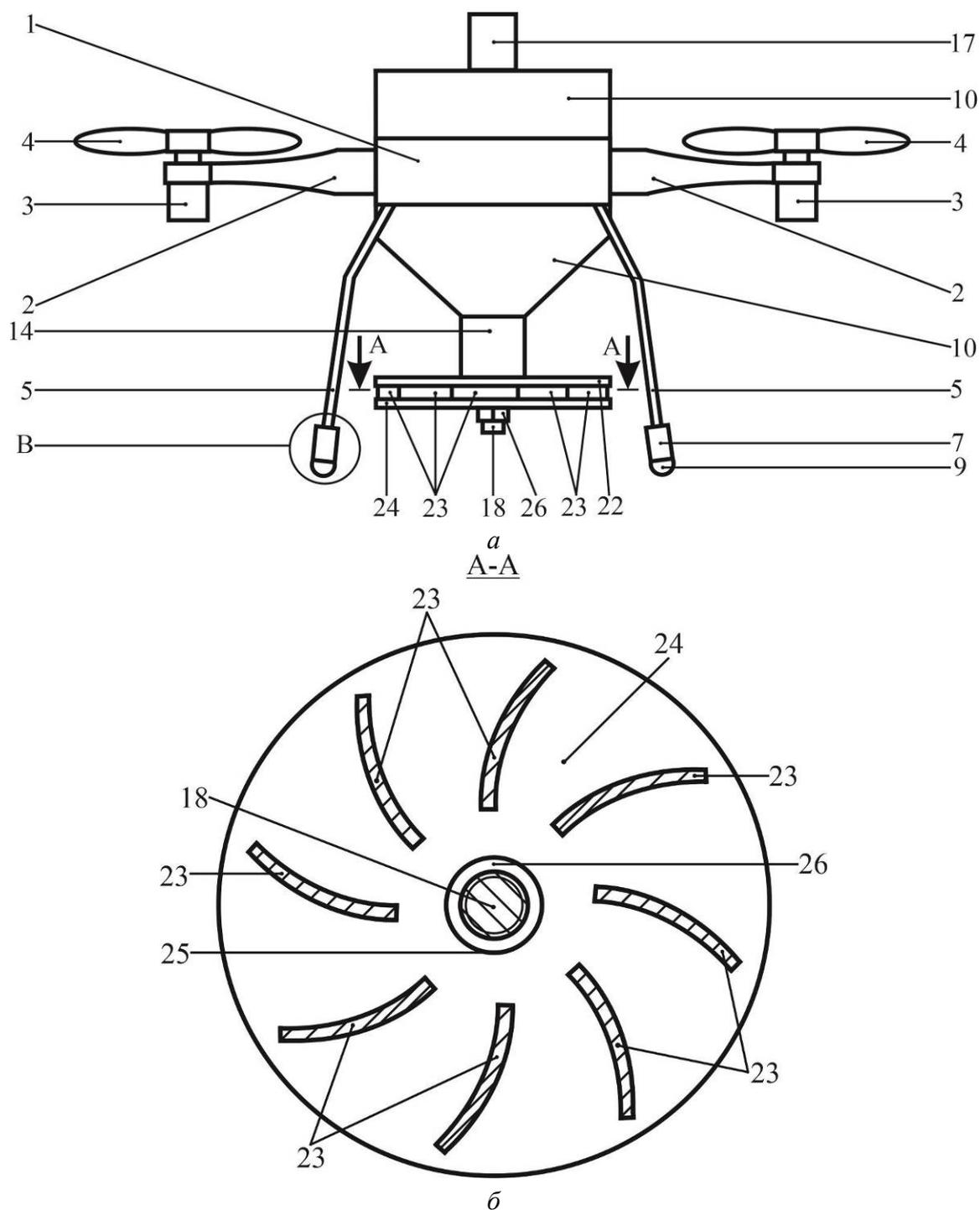


Рисунок 1. Беспилотный летательный аппарат для внесения удобрений: *a* — вид спереди; *б* — разрез А—А [33]

Figure 1. Unmanned aerial vehicle for fertilizer application: **(a)** front view; **(b)** section A—A [33]

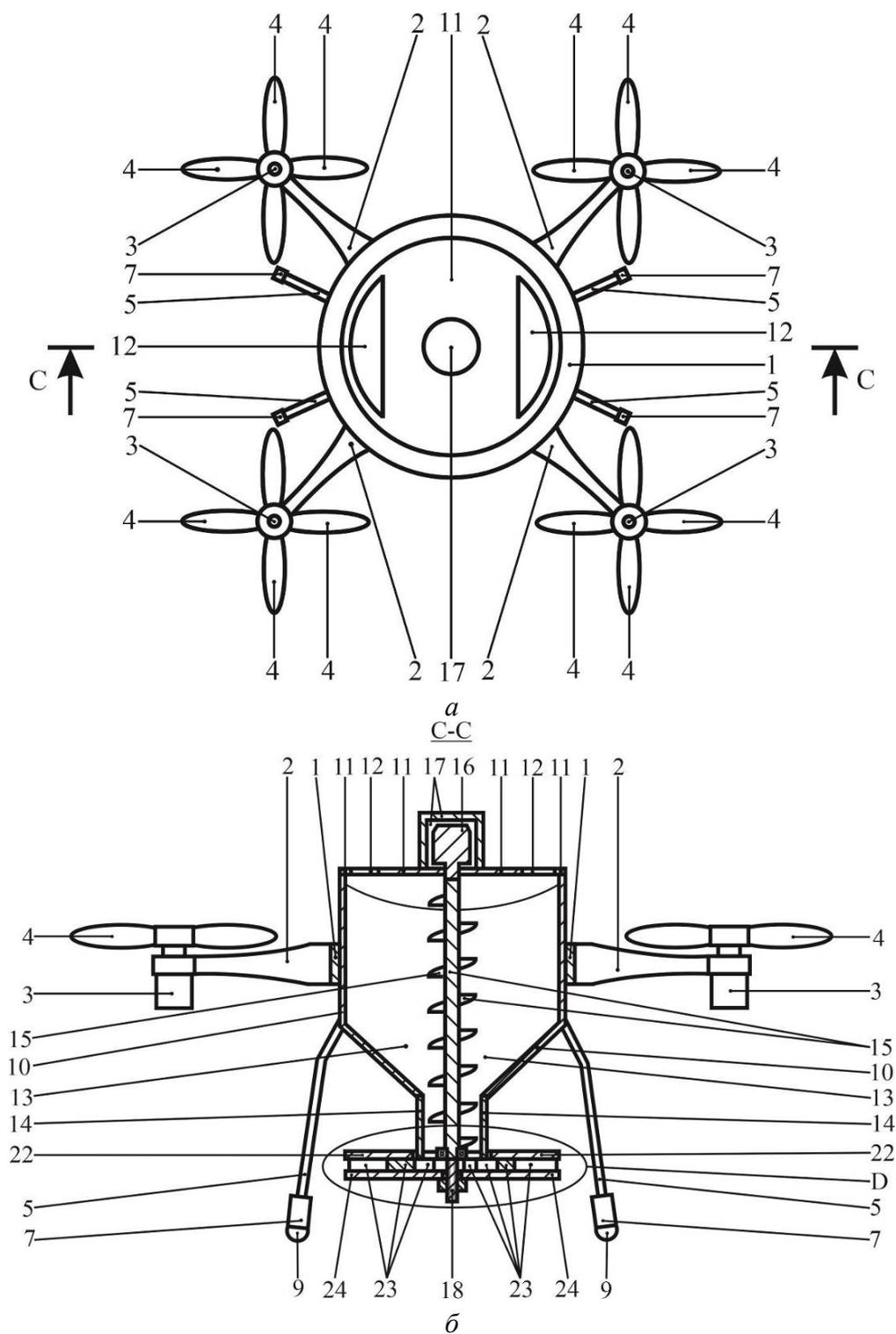


Рисунок 2. Беспилотный летательный аппарат для внесения удобрений: *a* — вид сверху; *б* — разрез С—С [33]

Figure 2. Unmanned aerial vehicle for fertilizer application: (a) top view; (b) section C—C [33]

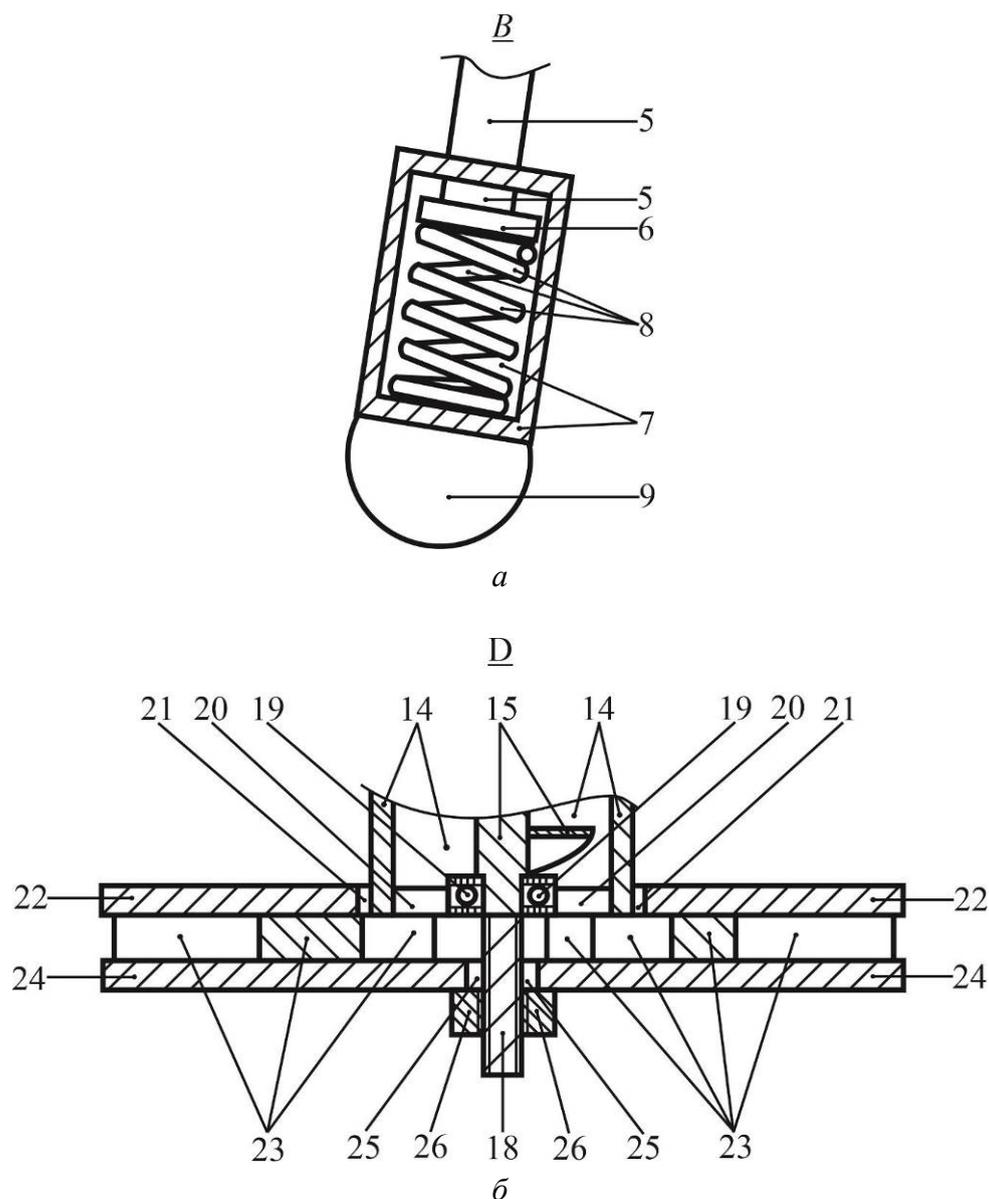


Рисунок 3. Узлы беспилотного летательного аппарата для внесения удобрений: *a* — узел В на рисунке 1*a*, с разрезом гильзы; *б* — узел D на рисунке 2*б* [33]

Figure 3. Unmanned aerial vehicle components for fertilizer application: **(a)** component B in Figure 1*a*, with a section of the sleeve; **(b)** component D in Figure 2*b* [33]

При входе БПЛА в зону внесения удобрений оператор с пульта управления устанавливает его по направлению разбрасывания удобрения таким образом, чтобы его центр располагался посередине ширины захвата (ширины разбрасывания). Затем оператор с пульта управления включает серводвигатель 16, который начинает вращать шнек 15, верхний подвижной диск 22, разделительные пластины 23 и нижний подвижной диск 24. В результате этого гранулы минерального удобрения 13 дозированно подаются шнеком 15 к разделительным пластинам 23, где минеральное удобрение 13 за счёт центробежной силы равномерно разбрасывается

на расчётную ширину. Одновременно с этим оператор ведёт БПЛА по маршруту с заданной скоростью и высотой над поверхностью земли, тем самым осуществляя распределение азотного удобрения на расчётную ширину захвата по посевам озимых зерновых культур. Израсходовав минеральное удобрение I_3 , оператор сигналами с пульта управления возвращает БПЛА к месту засыпки и обслуживания, где производится засыпка минерального удобрения I_3 , заменяются аккумуляторные батареи, выполняются операции технического диагностирования и технического обслуживания.

Эффективность применения усовершенствованного БПЛА при ранневесеннем внесении азотных удобрений на посевах озимых зерновых культур заключается в своевременном выполнении подкормки после схода снежного покрова и в период весеннего кушения, когда использование наземных разбрасывателей невозможно или экономически неэффективно. На основании сказанного должно выполняться следующее условие:

$$P_H \leq P_A, \quad (1)$$

где P_H — прибыль, получаемая от выращенной продукции, при использовании наземных разбрасывателей для ранневесеннего внесения удобрений, руб.; P_A — прибыль, получаемая от выращенной продукции, при использовании БПЛА для ранневесеннего внесения удобрений, руб.

В неравенстве (1) показатель P_H , с учётом рекомендаций [1], следует рассчитывать по формуле

$$P_H = B_H - Z_{III} - Z_{HCP} - Z_{HBK} - Z_{YII} - Z_{YV} - Z_{HXOT}, \quad (2)$$

где B_H — планируемая выручка от реализации выращенной озимой зерновой культуры при использовании наземных разбрасывателей для ранневесеннего внесения удобрений, руб.; Z_{III} — затраты на предпосевную подготовку и посев, руб.; Z_{HCP} — затраты на внесение минеральных удобрений наземными разбрасывателями по озимым зерновым культурам после схода снежного покрова, руб.; Z_{HBK} — затраты на внесение минеральных удобрений наземными разбрасывателями в период весеннего кушения озимых культур, руб.; Z_{YII} — затраты на весенне-летний уход за посевами озимых культур, руб.; Z_{YV} — затраты на уборку урожая, руб.; Z_{HXOT} — затраты на хранение, обработку и транспортировку урожая при использовании наземных разбрасывателей для ранневесеннего внесения удобрений, руб.

При этом в условии (1) показатель P_A следует рассчитывать по выражению

$$P_A = B_A - Z_{III} - Z_{ACP} - Z_{ABK} - Z_{YII} - Z_{YV} - Z_{AXOT}, \quad (3)$$

где B_A — планируемая выручка от реализации выращенной озимой зерновой культуры при использовании БПЛА для ранневесеннего внесения удобрений, руб.; Z_{ACP} — затраты на внесение минеральных удобрений БПЛА по озимым зерновым культурам после схода снежного покрова, руб.; Z_{ABK} — затраты на внесение минеральных удобрений БПЛА в период весеннего кушения озимых зерновых культур, руб.; Z_{AXOT} — затраты на хранение,

обработку и транспортировку урожая при использовании БПЛА для ранневесеннего внесения удобрений, руб.

Подставим равенства (2) и (3) в неравенство (1) и после преобразований получим следующее:

$$B_H - Z_{НСП} - Z_{НВК} - Z_{НХОТ} \leq B_A - Z_{АСП} - Z_{АВК} - Z_{АХОТ}. \quad (4)$$

В условии (4) планируемая выручка B_H от реализации выращенной озимой зерновой культуры при использовании наземных разбрасывателей для ранневесеннего внесения удобрений определяется по формуле

$$B_H = S_{ОЗК} Q_C C_{ОЗК} + S_{ОЗК} Q_{НСП} C_{ОЗК} + S_{ОЗК} Q_{НВК} C_{ОЗК}, \quad (5)$$

где $S_{ОЗК}$ — площадь посева озимой зерновой культуры, га; Q_C — средняя урожайность озимой зерновой культуры без учёта дополнительной урожайности от своевременной весенней подкормки, ц/га; $C_{ОЗК}$ — стоимость 1 ц озимой зерновой культуры, руб./ц; $Q_{НСП}$ — дополнительная урожайность озимой зерновой культуры при своевременном внесении минеральных удобрений наземными разбрасывателями после схода снежного покрова, ц/га; $Q_{НВК}$ — дополнительная урожайность озимой зерновой культуры при своевременном внесении минеральных удобрений наземными разбрасывателями в период весеннего кушения, ц/га.

Планируемая выручка B_A от реализации выращенной озимой зерновой культуры при использовании БПЛА для ранневесеннего внесения удобрений определяется из выражения

$$B_A = S_{ОЗК} Q_C C_{ОЗК} + S_{ОЗК} Q_{АСП} C_{ОЗК} + S_{ОЗК} Q_{АВК} C_{ОЗК}, \quad (6)$$

где $Q_{АСП}$ — дополнительная урожайность озимой зерновой культуры при своевременном внесении минеральных удобрений БПЛА после схода снежного покрова, ц/га; $Q_{АВК}$ — дополнительная урожайность озимой зерновой культуры при своевременном внесении минеральных удобрений БПЛА в период весеннего кушения, ц/га.

Затраты $Z_{НСП}$ на внесение минеральных удобрений наземными разбрасывателями по озимым зерновым культурам после схода снежного покрова составят:

$$Z_{НСП} = S_{ОЗК} Z_{НПОС} + S_{ОЗК} Z_{НПЕС}, \quad (7)$$

где $Z_{НПОС}$ — постоянные удельные затраты при внесении минеральных удобрений наземным транспортом по озимой зерновой культуре после схода снежного покрова, руб./га; $Z_{НПЕС}$ — переменные удельные затраты при внесении минеральных удобрений наземным транспортом по озимой зерновой культуре после схода снежного покрова, руб./га.

Затраты $Z_{НВК}$ на внесение минеральных удобрений наземными разбрасывателями в период весеннего кушения озимых зерновых культур равны:

$$Z_{НВК} = S_{ОЗК} Z_{НПОК} + S_{ОЗК} Z_{НПЕК}, \quad (8)$$

где $Z_{НПОК}$ — постоянные удельные затраты при внесении минеральных удобрений наземными разбрасывателями по озимой зерновой культуре в период весеннего кушения, руб./га; $Z_{НПЕК}$ — переменные удельные затраты при внесении минеральных удобрений наземными разбрасывателями по озимой зерновой культуре в период весеннего кушения, руб./га.

Затраты $Z_{НХОТ}$ на хранение, обработку и транспортировку урожая озимых зерновых культур при использовании наземных разбрасывателей для ранневесеннего внесения удобрений определяются по формуле

$$Z_{НХОТ} = (Q_C + Q_{НСП} + Q_{НВК}) Z_{НПОХ} + (Q_C + Q_{НСП} + Q_{НВК}) Z_{НПЕХ}, \quad (9)$$

где $Z_{НПОХ}$ — постоянные удельные затраты на хранение, обработку и транспортировку урожая озимых зерновых культур при внесении минеральных удобрений наземными разбрасывателями, руб./ц; $Z_{НПЕХ}$ — переменные удельные затраты на хранение, обработку и транспортировку урожая озимых зерновых культур при внесении минеральных удобрений наземными разбрасывателями, руб./ц.

В неравенстве (4) затраты $Z_{АСП}$ на внесение минеральных удобрений БПЛА по озимым зерновым культурам после схода снежного покрова необходимо рассчитывать по формуле

$$Z_{АСП} = S_{ОЗК} Z_{АПОС} + S_{ОЗК} Z_{АПЕС}, \quad (10)$$

где $Z_{АПОС}$ — постоянные удельные затраты при внесении минеральных удобрений БПЛА по озимой зерновой культуре после схода снежного покрова, руб./га; $Z_{АПЕС}$ — переменные удельные затраты при внесении минеральных удобрений БПЛА по озимой зерновой культуре после схода снежного покрова, руб./га.

Затраты $Z_{АВК}$ на внесение минеральных удобрений БПЛА в период весеннего кушения озимых зерновых культур рассчитываются из выражения

$$Z_{АВК} = S_{ОЗК} Z_{АПОК} + S_{ОЗК} Z_{АПЕК}, \quad (11)$$

где $Z_{АПОК}$ — постоянные удельные затраты при внесении минеральных удобрений БПЛА по озимой зерновой культуре в период весеннего кушения, руб./га; $Z_{АПЕК}$ — переменные удельные затраты при внесении минеральных удобрений БПЛА по озимой зерновой культуре в период весеннего кушения, руб./га.

Затраты $Z_{АХОТ}$ на хранение, обработку и транспортировку урожая озимых зерновых культур при использовании БПЛА для ранневесеннего внесения удобрений составят:

$$Z_{АХОТ} = (Q_C + Q_{АСП} + Q_{АВК}) Z_{АПОХ} + (Q_C + Q_{АСП} + Q_{АВК}) Z_{АПЕХ}, \quad (12)$$

где $Z_{АПОХ}$ — постоянные удельные затраты на хранение, обработку и транспортировку урожая озимых зерновых культур при внесении минеральных удобрений БПЛА, руб./ц;

$Z_{АПЕХ}$ — переменные удельные затраты на хранение, обработку и транспортировку урожая озимых зерновых культур при внесении минеральных удобрений БПЛА, руб./ц.

Подставим зависимости (5)—(12), в неравенство (4) и после определённых преобразований получим следующее неравенство:

$$S_{ОЗК}Q_{НСП}C_{ОЗК} + S_{ОЗК}Q_{НВК}C_{ОЗК} - S_{ОЗК}Z_{НПОС} - S_{ОЗК}Z_{НПЕС} - S_{ОЗК}Z_{НПОК} - S_{ОЗК}Z_{НПЕК} - \\ - (Q_{НСП} + Q_{НВК})Z_{НПОХ} - (Q_{НСП} + Q_{НВК})Z_{НПЕХ} \leq S_{ОЗК}Q_{АСП}C_{ОЗК} + S_{ОЗК}Q_{АВК}C_{ОЗК} - \\ - S_{ОЗК}Z_{АПОС} - S_{ОЗК}Z_{АПЕС} - S_{ОЗК}Z_{АПОК} - S_{ОЗК}Z_{АПЕК} - (Q_{АСП} + Q_{АВК})Z_{АПОХ} - (Q_{АСП} + Q_{АВК})Z_{АПЕХ}. \quad (13)$$

При первом условии, когда наземными разбрасывателями не выполнялась подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением после схода снежного покрова, а только выполнялась своевременная подкормка в период весеннего кушения, при этом подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением БПЛА выполнялась своевременно и в полном объёме, неравенство (13) примет следующий вид:

$$S_{ОЗК}Q_{НВК}C_{ОЗК} - S_{ОЗК}Z_{НПОК} - S_{ОЗК}Z_{НПЕК} - \\ - Q_{НВК}Z_{НПОХ} - Q_{НВК}Z_{НПЕХ} \leq S_{ОЗК}Q_{АСП}C_{ОЗК} + S_{ОЗК}Q_{АВК}C_{ОЗК} - \\ - S_{ОЗК}Z_{АПОС} - S_{ОЗК}Z_{АПЕС} - S_{ОЗК}Z_{АПОК} - S_{ОЗК}Z_{АПЕК} - (Q_{АСП} + Q_{АВК})Z_{АПОХ} - (Q_{АСП} + Q_{АВК})Z_{АПЕХ}. \quad (14)$$

Так как в практических условиях $Q_{НВК}Z_{НПОХ} = Q_{АВК}Z_{АПОХ}$, $Q_{НВК}Z_{НПЕХ} = Q_{АВК}Z_{АПЕХ}$, а $S_{ОЗК}Q_{НВК}C_{ОЗК} = S_{ОЗК}Q_{АВК}C_{ОЗК}$, то из выражения (14) экономический эффект от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимых зерновых культур по первому условию составит:

$$\Xi \Xi_1 = S_{ОЗК}Q_{АСП}C_{ОЗК} - S_{ОЗК}(Z_{АПОС} + Z_{АПЕС}) - S_{ОЗК}(Z_{АПОК} + Z_{АПЕК}) - \\ - Q_{АСП}(Z_{АПОХ} + Z_{АПЕХ}) + S_{ОЗК}(Z_{НПОК} + Z_{НПЕК}). \quad (15)$$

При втором условии, когда наземными разбрасывателями не выполнялась подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением после схода снежного покрова и в период весеннего кушения, при этом подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением БПЛА выполнялась своевременно и в полном объёме, неравенство (13) преобразуется к виду:

$$0 \leq S_{ОЗК}Q_{АСП}C_{ОЗК} + S_{ОЗК}Q_{АВК}C_{ОЗК} - S_{ОЗК}Z_{АПОС} - S_{ОЗК}Z_{АПЕС} - \\ - S_{ОЗК}Z_{АПОК} - S_{ОЗК}Z_{АПЕК} - (Q_{АСП} + Q_{АВК})Z_{АПОХ} - (Q_{АСП} + Q_{АВК})Z_{АПЕХ}. \quad (16)$$

Из данного неравенства экономический эффект от использования БПЛА взамен наземного транспорта при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимых зерновых культур по второму условию составит:

$$\Xi \Xi_2 = S_{ОЗК}Q_{АСП}C_{ОЗК} + S_{ОЗК}Q_{АВК}C_{ОЗК} - S_{ОЗК}(Z_{АПОС} + Z_{АПЕС}) - \\ - S_{ОЗК}(Z_{АПОК} + Z_{АПЕК}) - (Q_{АСП} + Q_{АВК})(Z_{АПОХ} + Z_{АПЕХ}). \quad (17)$$

В зависимостях (14)—(17) такие показатели, как $C_{ОЗК}$, $Z_{НПОК}$, $Z_{НПЕК}$, $Z_{НПОХ}$, $Z_{НПЕХ}$, $Z_{АПОС}$, $Z_{АПЕС}$, $Z_{АПОК}$, $Z_{АПЕК}$, $Z_{АПОХ}$ и $Z_{АПЕХ}$, зависят от многих факторов, но основными являются ценовая политика на сырьё, выращенную продукцию и спектр оказываемых услуг. При этом в зависимостях (14)—(17) такие показатели, как $Q_{АСП}$, $Q_{АВК}$, $Q_{НСП}$ и $Q_{НВК}$, напрямую зависят от условий произрастания озимых зерновых культур.

3. Результаты

Известно [3], [6], что при своевременном выполнении комплекса работ по ранневесеннему внесению минеральных удобрений на посевах озимых зерновых культур их урожайность увеличивается. Например, при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимых зерновых культур после схода снежного покрова урожайность озимой пшеницы увеличивается в среднем на 20 ц/га [6], а при внесении в период весеннего кущения её урожайность в среднем увеличивается на 7 ц/га [6]. Таким образом, $Q_{АСП} = Q_{НСП} = 20$ ц/га, а $Q_{АВК} = Q_{НВК} = 7$ ц/га. При этом стоимость 1 ц озимой зерновой культуры $C_{ОЗК}$ в данном случае составляет 1500 руб./ц (озимая пшеница). Принимаем, что сумма $Z_{АПОС} + Z_{АПЕС} = 8000$ руб./га, $Z_{АПОК} + Z_{АПЕК} = 6000$ руб./га, $Z_{АПОХ} + Z_{АПЕХ} = 3000$ руб./ц, $Z_{НПОК} + Z_{НПЕК} = 5000$ руб./га. Для дальнейшего расчёта экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы по первому и второму вариантам принимаем площадь посева озимой пшеницы от 100 до 1000 га с шагом 100 га. На основании приведённых данных выполнен расчёт экономического эффекта от использования усовершенствованного БПЛА при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы в зависимости от площади посева. Результаты расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы в зависимости от площади посева

Table 1. Results of calculating the economic effect from using an unmanned aerial vehicle instead of ground spreaders during early spring application of mineral fertilizers to winter wheat crops depending on the sowing area

Экономический эффект	$S_{ОЗК}$, га									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$ЭЭ_1$, тыс. руб.	2040	4140	6240	8340	10440	12540	14640	16740	18840	20940
$ЭЭ_2$, тыс. руб.	2569	5219	7869	10519	13169	15819	18469	21119	23769	26419

По данным таблицы 1 построили графики зависимости экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы от площади посева, которые представлены на рисунке 4.

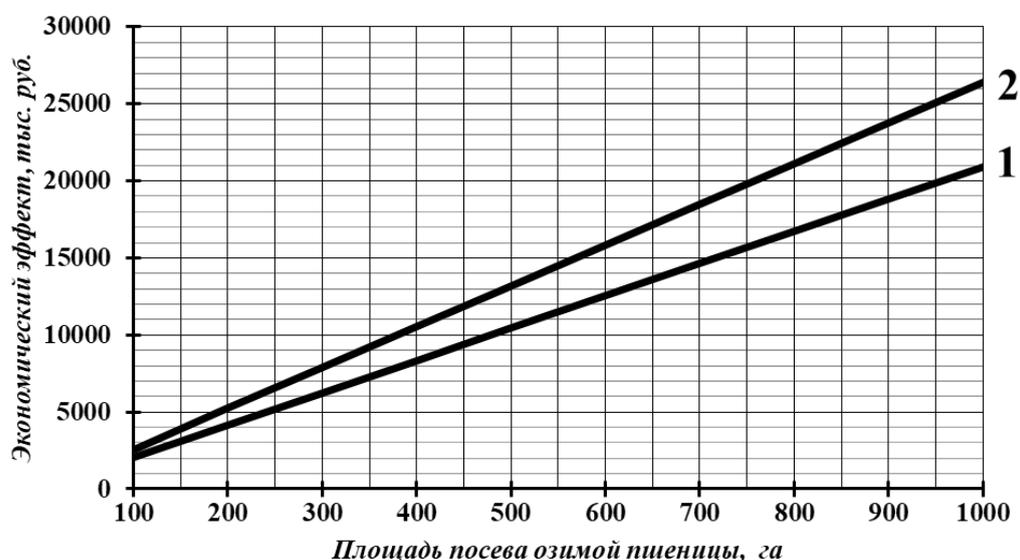


Рисунок 4. Графики зависимости экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей от площади посева озимой пшеницы: **1** — первый вариант; **2** — второй вариант [рисунок авторов]

Figure 4. Graphs of the economic effect of using unmanned aerial vehicles instead of ground-based spreaders, depending on the area of winter wheat sowing: **1** — first option; **2** — second option

Приведённые графики (рисунок 4) показывают, что зависимость экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей от площади посева озимой пшеницы является линейной и с увеличением площади экономический эффект возрастает.

В практических условиях стоимость озимой пшеницы может меняться в зависимости от её качества. Тогда целесообразно выполнить расчёт экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы по первому и второму вариантам в зависимости от рыночной стоимости озимой пшеницы. Принимаем стоимость озимой пшеницы от 1050 до 1500 руб./ц с шагом 50 руб./ц. При этом принимаем $Q_{АСП} = Q_{НСП} = 20$ ц/га, $Q_{АВК} = Q_{НВК} = 7$ ц/га, $S_{ОЗК} = 500$ га, сумма $Z_{АПОС} + Z_{АПЕС} = 8000$ руб./га, $Z_{АПОК} + Z_{АПЕК} = 6000$ руб./га, $Z_{АПОХ} + Z_{АПЕХ} = 3000$ руб./ц, $Z_{НПОК} + Z_{НПЕК} = 5000$ руб./га. Результаты расчёта представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчёта экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы в зависимости от её стоимости

Table 2. Results of calculating the economic effect of using unmanned aerial vehicles instead of ground-based spreaders for early spring application of mineral fertilizers on winter wheat crops, depending on their cost

Экономический эффект	$C_{OЗК}$, руб./ц									
	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500
$\mathcal{E}\mathcal{E}_1$, тыс. руб.	5940	6440	6940	7440	7940	8440	8940	9440	9940	10440
$\mathcal{E}\mathcal{E}_2$, тыс. руб.	7094	7769	8444	9119	9794	10469	11144	11819	12494	13169

Используя данные таблицы 2, построили графики зависимости экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы от её стоимости. Данные графики представлены на рисунке 5.

Изображённые на рисунке 5 графики — линейные. При минимальной стоимости озимой пшеницы экономический эффект от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы присутствует. Увеличение цены влечёт за собой соответствующее возрастание экономического эффекта.

Применение усовершенствованного БПЛА для внесения минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы является дорогостоящим мероприятием, где стоимость выполнения работ может варьироваться в широком диапазоне и для конкретных условий устанавливается индивидуально. При данных фактах рационально выполнить расчёт экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы по первому и второму вариантам в зависимости от затрат на внесение минеральных удобрений БПЛА. Принимаем соотношение затрат на внесение минеральных удобрений БПЛА: $(Z_{АПОС} + Z_{АПЕС}) / (Z_{АПОК} + Z_{АПЕК}) = 8000/6000$ руб./га, которые изменяются до $(Z_{АПОС} + Z_{АПЕС}) / (Z_{АПОК} + Z_{АПЕК}) = 17000/15000$ руб./га с шагом 1000 руб./га. При этом обуславливаемся, что $Q_{АСП} = Q_{НСП} = 20$ ц/га, $Q_{АВК} = Q_{НВК} = 7$ ц/га, $C_{OЗК} = 1300$ руб./ц, $S_{OЗК} = 500$ га, сумма $Z_{АПОХ} + Z_{АПЕХ} = 3000$ руб./ц, $Z_{НПОК} + Z_{НПЕК} = 5000$ руб./га. Результаты расчёта представлены в таблице 3.

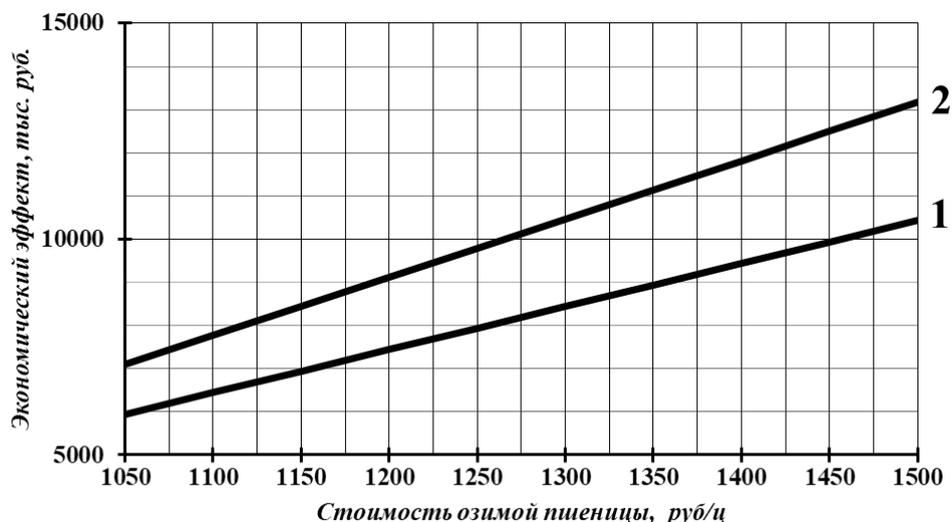


Рисунок 5. Графики зависимости экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей при ранне-весеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы от её стоимости: **1** — первый вариант; **2** — второй вариант [рисунок авторов]

Figure 5. Graphs of the economic effect of using unmanned aerial vehicles instead of ground-based spreaders for early spring application of mineral fertilizers on winter wheat crops, depending on the cost of the fertilizers: **1** — first option; **2** — second option

Таблица 3. Результаты расчёта экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей при ранне-весеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы в зависимости от затрат на внесение минеральных удобрений беспилотными летательными аппаратами

Table 3. Results of calculating the economic effect of using unmanned aerial vehicles instead of ground-based spreaders for early spring application of mineral fertilizers on winter wheat crops, depending on the costs of applying mineral fertilizers using unmanned aerial vehicles

Экономический эффект	$(Z_{АПОС} + Z_{АПЕС}) / (Z_{АПОК} + Z_{АПЕК})$, руб./Га									
	$\frac{8000}{6000}$	$\frac{9000}{7000}$	$\frac{10000}{8000}$	$\frac{11000}{9000}$	$\frac{12000}{10000}$	$\frac{13000}{11000}$	$\frac{14000}{12000}$	$\frac{15000}{13000}$	$\frac{16000}{14000}$	$\frac{17000}{15000}$
$\mathcal{E}\mathcal{E}_1$, тыс. руб.	8440	7440	6440	5440	4440	3440	2440	1440	440	-560
$\mathcal{E}\mathcal{E}_2$, тыс. руб.	10469	9469	8469	7469	6469	5469	4469	3469	2469	1469

По данным таблицы 3 построили графики зависимости экономического эффекта от использования БПЛА взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы в зависимости от затрат на внесение минеральных удобрений БПЛА. Указанные графики приведены на рисунке 6.

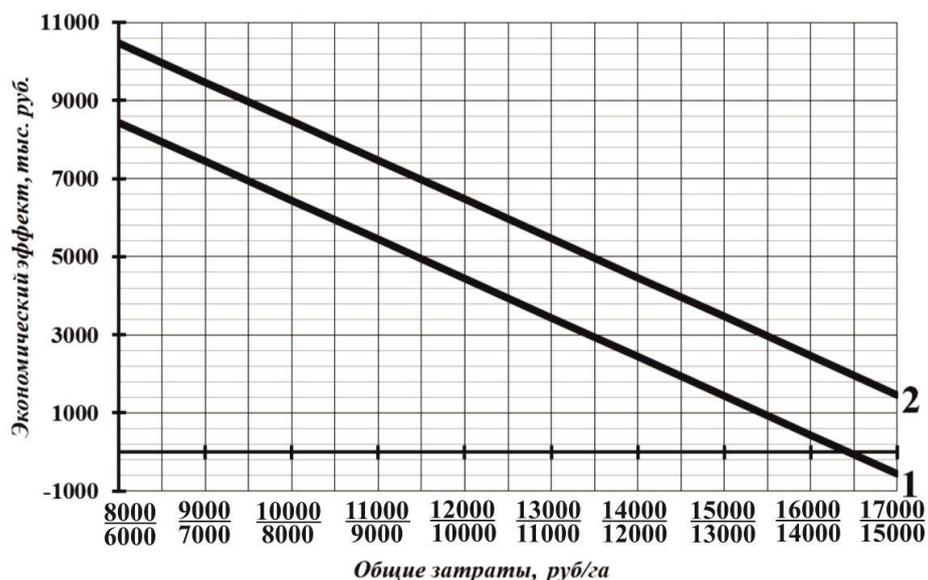


Рисунок 6. Графики зависимости экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей от затрат на внесение минеральных удобрений беспилотными летательными аппаратами: **1** — первый вариант; **2** — второй вариант [рисунок авторов]

Figure 6. Graphs of the economic effect of using unmanned aerial vehicles instead of ground-based spreaders and the cost of applying mineral fertilizers using unmanned aerial vehicles: **1** — first option; **2** — second option

Графики (рисунок 6) показывают, что экономический эффект по второму варианту присутствует в рамках установленных затрат на внесение минеральных удобрений БПЛА. При этом по первому варианту экономический эффект присутствует при следующих показателях: $(Z_{АПОС} + Z_{АПЕС}) / (Z_{АПОК} + Z_{АПЕК}) \leq 16500 / 14500$ руб./га.

4. Обсуждение и заключение

Усовершенствованный беспилотный летательный аппарат, защищённый патентом № 236184 РФ и предназначенный для посева сельскохозяйственных культур и внесения в почву сыпучих удобрений, имеет пониженную собственную массу, что позволяет увеличить объём ящика для загрузки семян или сыпучих минеральных удобрений и соответственно повышает эффективность использования этого БПЛА при посеве и внесении удобрений.

Предложенная методика оценки эффективности использования усовершенствованного беспилотного летательного аппарата при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на озимых зерновых культурах по отношению к наземным разбрасывателям предусматривает два варианта: первый — наземными разбрасывателями не выполняется подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением после схода снежного покрова, а только выполняется своевременная подкормка в период весеннего кушения, при этом подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением беспилотными летательными аппаратами выполняется своевременно и в полном объеме; второй — наземными разбрасывателями не выполняется подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением после схода снежного покрова и в период весеннего кушения, при этом подкормка озимых зерновых культур минеральным удобрением беспилотными летательными аппаратами выполняется своевременно и в полном объеме.

Выполненный расчёт экономического эффекта от использования беспилотных летательных аппаратов взамен наземных разбрасывателей при ранневесеннем внесении минеральных удобрений на посевах озимой пшеницы (в зависимости от площади посева, стоимости озимой пшеницы и затрат на внесение минеральных удобрений беспилотными летательными аппаратами) показывает, что при изменении площади посева озимой пшеницы от 100 до 1000 га для обоих вариантов экономический эффект присутствует и изменяется от 2040 до 26419 тыс. руб. В случае изменения стоимости озимой пшеницы от 1050 до 1500 руб./ц для обоих вариантов экономический эффект также присутствует и изменяется от 5940 до 13169 тыс. руб. При затратах на внесение минеральных удобрений беспилотными летательными аппаратами после схода снежного покрова и в период весеннего кушения соответственно 8000—16500 руб./га и 6000—14500 руб./га применение БПЛА целесообразно и характеризуется положительным экономическим эффектом — от 10469 до 1469 тыс. руб.; при больших затратах применение беспилотных летательных аппаратов становится невыгодным.

Список литературы

1. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Исследование параметров постоянной технологической колеи, предназначенной для ухода за посевами сельскохозяйственных культур в Центральном Черноземье // Наука в Центральной России. 2024. № 4 (70). С. 51—65. DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-51-65.
2. Циков В. С., Матюха Л. А. Интенсивная технология возделывания кукурузы. М.: Агропромиздат, 1989. 247 с.
3. Интенсивные технологии возделывания зерновых и технических культур / Под ред. А. И. Зинченко, И. М. Карасюка. Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1988. 327 с.
4. Интенсивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур / Под ред. Г. В. Коренева. М.: Агропромиздат, 1988. 301 с.
5. Интенсивные технологии возделывания яровой пшеницы в Новосибирской области: Рекомендации / В. И. Кирюшин, А. Н. Власенко, А. И. Южаков [и др.]. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ, 1987. 59 с.

6. *Шаганов И. А.* Практические рекомендации по освоению интенсивной технологии возделывания озимых зерновых культур. 2-е изд., доп. и перераб. Минск: Равноденствие, 2008. 180 с.
7. Практическое руководство по освоению интенсивной технологии возделывания проса / Б. П. Паршин [и др.]. М.: Агропромиздат, 1986. 72 с.
8. *Шиндин А. П., Лебедева Т. Б.* Сахарная свекла. Интенсивная технология возделывания. М.: ООО НПО «РосАгроХим», 2013. 168 с.
9. *Chandran C. S., Thomas S., Unni M. R.* Organic farming: new advances towards sustainable agricultural systems. Springer International Publishing, 2019. 140 p.
10. *Patra A. K.* Farming system and sustainable agriculture. New India Publishing Agency, 2023. 268 p.
11. *Filson G.* Intensive agriculture and sustainability: a farming systems analysis. UBC Press, 2004. 251 p.
12. *Халанский В. М., Горбачев И. В.* Сельскохозяйственные машины. М.: Колос С, 2004. 624 с.
13. *Chen G.* Advances in agricultural machinery and technologies. CRC Press, 2018. 472 p.
14. *Карпенко А. М., Халанский В. М.* Сельскохозяйственные машины. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1983. 495 с.
15. Машиностроение. Сельскохозяйственные машины и оборудование Т. IV-16 / Под ред. И. П. Ксеневи́ча. М.: Машиностроение, 2002. 720 с.
16. *Афоничев Д. Н., Васильев В. В.* Обоснование целесообразности использования беспилотных летательных аппаратов для ухода за посевами сельскохозяйственных культур // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 2 (85). С. 94—100. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_94.
17. Усовершенствованный беспилотный летательный аппарат сельскохозяйственного назначения / Д. Н. Афоничев, А. Н. Беляев, В. В. Васильев [и др.] // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: Материалы Междунар. науч.-практ. конф.; Россия, г. Воронеж, 29 нояб. 2024 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2024. С. 9—13.
18. *Krishna K. R.* Agricultural drones: a peaceful pursuit. Oakville: Apple Academic Press, CRC Press, 2018. 394 p.
19. Drone technology: future trends and practical applications / S. N. Mohanty, J. V. R. Ravindra, G. S. Narayana [et al.]. USA: Wiley-Scrivener, 2023. 467 с.
20. *Sundaravadivazhagan B., Natarajan G., Chelliah P. R.* Intelligent robots and drones for precision agriculture. Springer, 2024. 490 p.
21. Патент № 2843882 РФ, МПК В 64 U 101/40; В 64 D 1/18. Беспилотный летательный аппарат сельскохозяйственного назначения / Афоничев Д. Н., Васильев В. В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ». № 2025103525; заявл. 18.02.2025; опубл. 21.07.2025, бюл. № 21. 11 с.
22. Patent 220799743 U (CN), Int. Cl. A 01 G 13/00, A 01 M 7/00, B 05 B 1/14, B 64 D 1/18. Pesticide spraying device for rape disease and pest control / Chen J., Jiang Z., Wang N., Shao T., Wu C. (CN). Patent holder LANXI AGRICULTURAL TECH PROMOTION CENTER (CN). No. 202322736120.5; filed: 10.10.2023; date application 19.04.2024. 9 p.
23. Patent 210011891 U (CN), Int. Cl. A 01 M 7/00, B 64 D 1/18. Unmanned aerial vehicle pesticide omnibearing spraying device / Xie Y., Zhang C., Wang G. (CN). Patent holder UNIV YIBIN (CN). No. 201920639423.6; filed: 06.05.2019; date application 04.02.2020. 6 p.
24. Патент № 233622 РФ, МПК В 64 U 101/40; В 64 D 1/18. Беспилотный летательный аппарат сельскохозяйственного назначения / Васильев В. В., Афоничев Д. Н., Аксенов И. И.;

- заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ». № 2025102532; заявл. 06.02.2025; опублик. 28.04.2025, бюл. № 13. 8 с.
25. Патент № 2843881 РФ, МПК В 64 U 101/40; В 64 U 101/45; А 01 М 7/00; В 64 D 1/18. Опрыскивающее устройство для беспилотного летательного аппарата / Васильев В. В., Шкодин И. О., Афоничев Д. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ». № 2025101455; заявл. 24.01.2025; опублик. 21.07.2025, бюл. № 21. 12 с.
26. Васильев В. В., Папонов Н. Н., Аксенов И. И. Применение беспилотных летательных аппаратов с искусственным интеллектом в агропромышленном комплексе // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы Национал. науч.-практ. конф. Секция «Инновационные направления механизации и электрификации сельскохозяйственного производства»; 19—21 апр. 2022 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2022. Ч. I. С. 54—63.
27. Patent 218104130 U (CN), Int. Cl. A 01 C 7/08, 7/20, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle seeding device / Gao Y., Lu Y., Nie J., Zhang J., Liao Y., Wang Y. (CN). Patent holder HUNAN SOIL & FERTILIZER INST (CN). No. 202222677903.6; filed: 12.10.2022; date application 23.12.2022. 7 p.
28. Patent 106385880 A (CN), Int. Cl. A 01 C 7/08, 7/20, B 64 D 1/02. Sowing unmanned aerial vehicle for agricultural production / Ren X. (CN). Patent holder ZIBO ZHENGBOANG INTELLECTUAL PROPERTY PLANNING CO LTD (CN). No. 201610809796.4; filed: 08.09.2016; date application 15.02.2017. 7 p.
29. Patent 215622713 U (CN), Int. Cl. B 64 C 27/08, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle for agricultural sowing / Ren X. (CN). Patent holder ZHONGWEI HEYI ECOLOGICAL AGRICULTURE TECH CO LTD (CN). No. 202121366416.7; filed: 17.06.2021; date application 25.01.2022. 8 p.
30. Patent 216232984 U (CN), Int. Cl. A 01 C 17/00, B 64 C 39/02, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle for rice grain sowing / Wang Y. (CN). Patent holder Wang Y. (CN). No. 202122369495.3; filed: 29.09.2021; date application 08.04.2022. 7 p.
31. Patent 216611618 U (CN), Int. Cl. B 64 D 1/16. Agricultural sowing unmanned aerial vehicle / Zhao C., Ma X., Zhao R., Wang F. (CN). Patent holder SHENYANG FENGRUI UNMANNED AERIAL VEHICLE TECH LIMITED COMPANY (CN). No. 202220167108.X; filed: 21.01.2022; date application 27.05.2022. 7 p.
32. Patent 221689274 U (CN), Int. Cl. A 01 C 15/00, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle flying fertilization device / Chen H. (CN). Patent holder XIAYI XINCHENG AGRICULTURAL TECH CO LTD (CN). No. 202420214339.0; filed: 30.01.2024; date application 13.09.2024. 7 p.
33. Патент № 236184 РФ, МПК А 01 С 17/00; В 64 С 39/02; В 64 U 20/00; В 64 U 101/40. Посевной беспилотный летательный аппарат / Васильев В. В., Афоничев Д. Н., Еремин М. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ». № 2025112389; заявл. 13.05.2025; опублик. 30.07.2025, бюл. № 22. 8 с.

References

1. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Study of the parameters of a permanent technological track intended for the care of agricultural crops in the Central Black Earth Region. *Science in Central Russia*, 2024, no. 4 (70), pp. 51—65. doi: 10.35887/2305-2538-2024-4-51-65. (In Russ.)
2. Tsikov V. S., Matyukha L. A. *Intensive technology of corn cultivation*. Moscow, Agropromizdat, 1989. 247 p. (In Russ.)
3. *Intensive technologies for cultivation of grain and industrial crops*. Ed. by A. I. Zinchenko, I. M. Karasyuk. Kyiv, Vyshcha shk. Main publishing house, 1988. 327 p. (In Russ.)

4. *Intensive technologies of agricultural crop cultivation*. Ed. G. V. Korenev. Moscow, Agropromizdat, 1988. 301 p. (In Russ.)
5. Kiryushin V. I., Vlasenko A. N., Yuzhakov A. I. [et al.]. *Intensive technologies for growing spring wheat in the Novosibirsk region: recommendations*. Novosibirsk, SO VASKhNIL, 1987. 59 p. (In Russ.)
6. Shaganov I. A. *Practical recommendations for the development of intensive technology for the cultivation of winter grain crops*. 2nd ed., supplemented and revised. Minsk, Ravnodenstvie, 2008. 180 p. (In Russ.)
7. Parshin B. P. [et al.]. *Practical guide to mastering intensive millet cultivation technology*. Moscow, Agropromizdat, 1986. 72 p. (In Russ.)
8. Shindin A. P., Lebedeva T. B. *Sugar beet. Intensive cultivation technology*. Moscow, OOO NPO RosAgroKhim, 2013. 168 p. (In Russ.)
9. Chandran C. S., Thomas S., Unni M. R. *Organic farming: new advances towards sustainable agricultural systems*. Springer International Publishing, 2019. 140 p.
10. Patra A. K. *Farming system and sustainable agriculture*. New India Publishing Agency, 2023. 268 p.
11. Filson G. *Intensive agriculture and sustainability: a farming systems analysis*. UBC Press, 2004. 251 p.
12. Khalansky V. M., Gorbachev I. V. *Agricultural machines*. Moscow, Kolos S, 2004. 624 p. (In Russ.)
13. Chen G. *Advances in agricultural machinery and technologies*. CRC Press, 2018. 472 p.
14. Karpenko A. M., Khalansky V. M. *Agricultural machines*. 5th revised and enlarged ed. Moscow, Kolos, 1983. 495 p. (In Russ.)
15. *Mechanical Engineering. Agricultural Machinery and Equipment*. Vol. IV-16. Ed. by I. P. Ksenevich. Moscow, Mashinostroenie, 2002. 720 p. (In Russ.)
16. Afonichev D. N., Vasiliev V. V. Justification of the feasibility of using unmanned aerial vehicles for caring for agricultural crops. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, 2025, vol. 18, no. 2 (85), pp. 94—100. doi: 10.53914/issn2071-2243_2025_94. (In Russ.)
17. Afonichev D. N., Belyaev A. N., Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Improved unmanned aerial vehicle for agricultural purposes. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions for the agro-industrial complex: Materials of the international scientific and practical conference; Russia, Voronezh, November 29, 2024*. Voronezh, FGBOU VO Voronezh SAU, 2024, pp. 9—13. (In Russ.)
18. Krishna K. R. *Agricultural drones: a peaceful pursuit*. Oakville. Apple Academic Press, CRC Press, 2018. 394 p.
19. Mohanty S. N., Ravindra J. V. R., Narayana G. S. Pattnaik C. R., Sirajudeen Y. M. *Drone technology: future trends and practical applications*. USA, Wiley-Scrivener, 2023. 467 p.
20. Sundaravadivazhagan B., Natarajan G., Chelliah P. R. *Intelligent robots and drones for precision agriculture*. Springer, 2024. 490 p.
21. Afonichev D. N., Vasiliev V. V. Patent no. 2843882 R. F., IPC B 64 U 101/40; B 64 D 1/18. Unmanned aerial vehicle for agricultural purposes; applicant and patent holder FSBEI HE Voronezh State Agrarian University. No. 2025103525; application. 18.02.2025; publ. 21.07.2025, bul. no. 21. 11 p. (In Russ.)
22. Chen J., Jiang Z., Wang N., Shao T., Wu C. (CN). Patent 220799743 U (CN), Int. Cl. A 01 G 13/00, A 01 M 7/00, B 05 B 1/14, B 64 D 1/18. Pesticide spraying device for rape disease and pest control. Patent holder LANXI AGRICULTURAL TECH PROMOTION CENTER (CN). No. 202322736120.5; filed: 10.10.2023; date application 19.04.2024. 9 p.

23. Xie Y., Zhang C., Wang G. (CN). Patent 210011891 U (CN), Int. Cl. A 01 M 7/00, B 64 D 1/18. Unmanned aerial vehicle pesticide omnibearing spraying device. Patent holder UNIV YIBIN (CN). No. 201920639423.6; filed: 06.05.2019; date application 04.02.2020. 6 p.
24. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Aksenov I. I. Patent no. 233622 R. F., IPC B 64 U 101/40; B 64 D 1/18. Unmanned aerial vehicle for agricultural purposes; applicant and patent holder FSBEI HE Voronezh State Agrarian University. No. 2025102532; application. 06.02.2025; publ. 28.04.2025, bul. no. 13. 8 p. (In Russ.)
25. Vasiliev V. V., Shkodin I. O., Afonichev D. N. Patent no. 2843881 R. F., IPC B 64 U 101/40; B 64 U 101/45; A 01 M 7/00; B 64 D 1/18. Spraying device for an unmanned aerial vehicle; applicant and patent holder FSBEI HE Voronezh State Agrarian University. No. 2025101455; application. 24.01.2025; publ. 21.07.2025, bul. no. 21. 12 p. (In Russ.)
26. Vasiliev V. V., Paponov N. N., Aksenov I. I. Application of unmanned aerial vehicles with artificial intelligence in the agro-industrial complex. *Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: materials of the national scientific and practical conference. Section «Innovative directions of mechanization and electrification of agricultural production»*; April 19—21, 2022. Voronezh, Voronezh State Agricultural University, 2022, part I, pp. 54—63. (In Russ.)
27. Gao Y., Lu Y., Nie J., Zhang J., Liao Y., Wang Y. (CN). Patent 218104130 U (CN), Int. Cl. A 01 C 7/08, 7/20, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle seeding device. Patent holder HUNAN SOIL & FERTILIZER INST (CN). No. 202222677903.6; filed: 12.10.2022; date application 23.12.2022. 7 p.
28. Ren X. (CN). Patent 106385880 A (CN), Int. Cl. A 01 C 7/08, 7/20, B 64 D 1/02. Sowing unmanned aerial vehicle for agricultural production. Patent holder ZIBO ZHENGBANG INTELLECTUAL PROPERTY PLANNING CO LTD (CN). No. 201610809796.4; filed: 08.09.2016; date application 15.02.2017. 7 p.
29. Ren X. (CN). Patent 215622713 U (CN), Int. Cl. B 64 C 27/08, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle for agricultural sowing. Patent holder ZHONGWEI HEYI ECOLOGICAL AGRICULTURE TECH CO LTD (CN). No. 202121366416.7; filed: 17.06.2021; date application 25.01.2022. 8 p.
30. Wang Y. (CN). Patent 216232984 U (CN), Int. Cl. A 01 C 17/00, B 64 C 39/02, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle for rice grain sowing. Patent holder Wang Y. (CN). No. 202122369495.3; filed: 29.09.2021; date application 08.04.2022. 7 p.
31. Zhao C., Ma X., Zhao R., Wang F. (CN). Patent 216611618 U (CN), Int. Cl. B 64 D 1/16. Agricultural sowing unmanned aerial vehicle. Patent holder SHENYANG FENGRUI UNMANNED AERIAL VEHICLE TECH LIMITED COMPANY (CN). No. 202220167108.X; filed: 21.01.2022; date application 27.05.2022. 7 p.
32. Chen H. (CN). Patent 221689274 U (CN), Int. Cl. A 01 C 15/00, B 64 D 1/16. Unmanned aerial vehicle flying fertilization device. Patent holder XIAYI XINCHENG AGRICULTURAL TECH CO LTD (CN). No. 202420214339.0; filed: 30.01.2024; date application 13.09.2024. 7 p.
33. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Eremin M. Yu. Patent no. 236184 R. F., IPC A 01 C 17/00; B 64 C 39/02; B 64 U 20/00; B 64 U 101/40. Unmanned aerial vehicle for sowing; applicant and patent holder FSBEI HE Voronezh State Agrarian University. No. 2025112389; application. 13.05.2025; publ. 30.07.2025, bul. no. 22. 8 p. (In Russ.).