

Тип статьи: обзорная

УДК 631.563

DOI: 10.35887/2305-2538-2026-2-7-21

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ОПРЫСКИВАНИЯ РАСТЕНИЙ ПЕСТИЦИДАМИ

**Николай Константинович Толочко¹, Николай Николаевич Романюк²,
Валерий Николаевич Еднач³, Андрей Иванович Попов⁴, Сергей Михайлович Ведищев⁵**

^{1,2,3} Белорусский государственный аграрно-технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

^{4,5} Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

¹ n.tolochko1951@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3073-6313>

² romanyuk-nik@tut.by, <https://orcid.org/0000-0003-1580-9147>

³ valeryednatch@yandex.by, <https://orcid.org/0000-0002-1962-9242>

⁴ olimp_popov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0297-2076>

⁵ serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>

Автор ответственный за переписку: Николай Константинович Толочко, n.tolochko1951@mail.ru

Реферат. Применение жидкофазных средств защиты растений способствует увеличению урожайности сельскохозяйственных культур и уменьшению потери урожая. Перспективным направлением применения жидких средств защиты растений является технология использования аэрозольного опрыскивания на основе беспилотных летательных аппаратов. Данная работа посвящена изучению особенностей осуществления процессов аэрозольного опрыскивания пестицидов с помощью мультикоптеров-опрыскивателей, оснащенных аэрозольными баллонами. Выполнен сравнительный анализ различных видов известных показателей эффективности аэрозольного опрыскивания растений пестицидами, в том числе осуществляемого с помощью мультикоптеров-опрыскивателей. Предложен интегрированный показатель эффективности опрыскивания растений пестицидами, учитывающий биологическую эффективность действия пестицидов и эффективность использования пестицидов при опрыскивании. Обсуждены основные параметры процесса опрыскивания растений пестицидами, включая радиус капель распыляемой жидкости, степень покрытия и густоту покрытия, и характер их взаимосвязей, который следует учитывать на практике при выборе их приемлемых значений. Получено выражение степени покрытия поверхности растений, устанавливающее взаимосвязь между густотой покрытия и радиусом летящих капель. Обосновано оптимальное расстояние от сопла распылительного устройства до опрыскиваемого растения, состав системы распыления, монтируемой на мультикоптерах. Дано описание экспериментального образца навесного распылительного устройства, монтируемого на мультикоптере с возможными вариантами размещения баллона. Предложены конструктивные варианты баллона с возможностью выходящей аэрозольной струи вниз или горизонтально. Рассмотрены особенности практической реализации аэрозольного опрыскивания.

Ключевые слова: опрыскивание растений пестицидами, показатель эффективности, параметр, аэрозольный баллон, исполнительный механизм, мультикоптер.

Для цитирования: Толочко Н.К., Романюк Н.Н., Еднач В.Н., Попов А.И., Ведищев С.М. Применение беспилотных летательных аппаратов для аэрозольного опрыскивания растений пестицидами // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2026. Т. 80, № 2. С. 7-21. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2026-2-7-21>.

USING UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR AEROSOL SPRAYING OF PLANTS WITH PESTICIDES

Nikolai Tolochko¹, Nikolay Romanyuk², Valery Ednach³, Andrey Popov⁴, Sergey Vedishchev⁵

^{1,2,3} Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus

^{4,5} Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

¹ n.tolochko1951@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3073-6313>

² romanyuk-nik@tut.by, <https://orcid.org/0000-0003-1580-9147>

³ valeryednach@yandex.by, <https://orcid.org/0000-0002-1962-9242>

⁴ olimpopov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0297-2076>

⁵ serg666_65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3759-9809>

Corresponding author: Nikolai Tolochko, n.tolochko1951@mail.ru

Abstract. *The use of liquid-phase plant protection products contributes to increased crop yields and reduced crop losses. A promising area of application for liquid plant protection products is the use of aerosol spraying technology using unmanned aerial vehicles. This work is devoted to the study of the features of aerosol spraying processes with pesticides using multicopter sprayers equipped with aerosol cans. A comparative analysis of various types of known indicators of the effectiveness of aerosol spraying of plants with pesticides, including those carried out using multicopter sprayers, is completed. An integrated indicator of the effectiveness of plant spraying with pesticides is proposed, taking into account the biological effectiveness of pesticides and the efficiency of pesticide use during spraying. The main parameters of the process of spraying plants with pesticides, including the radius of droplets of the sprayed liquid, the degree of coverage and the density of the coating, and the nature of their interrelations, which should be taken into account in practice when choosing their acceptable values, are discussed. An expression for the degree of plant surface coverage, establishing a relationship between the coverage density and the radius of the ejected droplets, has been obtained. The optimal distance from the sprayer nozzle to the sprayed plant and the composition of the spraying system mounted on multicopters have been substantiated. A description of an experimental prototype of a suspended spraying device mounted on a multicopter, along with possible tank placement options, has been provided. Tank designs with downward or horizontal aerosol discharge options are proposed. Practical implementation considerations for aerosol spraying are discussed.*

Keywords: *pesticide spraying, efficiency index, parameter, aerosol can, actuator, multicopter.*

For citation: Tolochko N., Romanyuk N., Ednach V., Popov A., Vedishchev S. Using unmanned aerial vehicles for aerosol spraying of plants with pesticides. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2026; 80(2): 7-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2026-2-7-21>.

Введение. Для борьбы с сорняками, насекомыми-вредителями и заболеваниями растений большое распространение получило опрыскивание растений жидкофазными пестицидами. Однако, пестициды используются, как правило, крайне неэффективно, значительная их часть оседает за пределами обрабатываемых участков, в том числе сносится ветром и испаряется, что приводит не только к потерям пестицидов, но и к загрязнению окружающей среды. В связи с этим является весьма актуальным совершенствование технологий опрыскивания растений пестицидами. Среди них одной из наиболее перспективных является технология аэрозольного опрыскивания, которая имеет ряд преимуществ, в частности, позволяет существенно снизить расход пестицидов и увеличить производительность процесса опрыскивания. Кроме того, капли аэрозоля благодаря малости размеров способны легко проникать в крону растений и равномерно распределяться по всей обрабатываемой поверхности растений. Вместе с тем мелкие капли аэрозоля гораздо легче подвергаются сносу ветром и испарению. Таким образом, приобретает особую остроту проблема повышения эффективности аэрозольного опрыскивания.

В последние годы в сельском хозяйстве все большее применение получают беспилотные летательные аппараты. Среди них значительная роль отводится мультикоптерам-опрыскивателям, используемым для обработки растений пестицидами.

Данная статья посвящена изучению особенностей осуществления процессов аэрозольного опрыскивания пестицидов с помощью мультикоптеров-опрыскивателей, оснащенных аэрозольными баллонами. Особое внимание уделено вопросам повышения эффективности аэрозольного опрыскивания с учетом уникальных возможностей мультикоптеров обеспечивать точечное опрыскивание.

Материалы и методы.

Показатели эффективности опрыскивания.

Для успешного решения вопросов повышения эффективности процессов опрыскивания в целом, включая процессы аэрозольного опрыскивания, осуществляемые с помощью мультикоптеров, важно руководствоваться соответствующими методологическими подходами, которые, однако, до сих пор не получили должного развития. В частности, до сих пор отсутствует достаточно строгое, однозначное и общепринятое определение понятия «эффективность» применительно к процессам опрыскивания.

Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015 под эффективностью понимается обобщенная характеристика какого-либо процесса, устанавливающая «соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами». Такому определению понятия «эффективность» соответствует широко распространенный показатель экономической эффективности E_E , представляющий собой отношение стоимостного выражения результата C_r , полученного при осуществлении процесса, к стоимостному выражению затрат C_e , связанных с его получением [1]:

$$E_E = \frac{C_r}{C_e}. \quad (1)$$

Так, при анализе результатов процесса опрыскивания растений пестицидами используется показатель экономической эффективности, который представляет собой отношение стоимости прироста урожайности, полученного благодаря опрыскиванию, к стоимости затрат на опрыскивание (включая затраты на приготовление распыляемых жидкостей и обслуживание опрыскивающего оборудования, транспортные, накладные и другие расходы) [2].

Показатель E_E выражается в числовой форме и является безразмерной величиной, поскольку и стоимость результата C_r , и стоимость затрат C_e измеряются в одних и тех же – денежных единицах.

Особенностью показателя E_E является его представление в виде дроби, у которой в качестве числителя используется параметр, подлежащий увеличению (полезный эффект), а в качестве знаменателя – параметр, подлежащий уменьшению (затраты) [3, 4]. Тем самым затрудняется принятие однозначного решения задачи повышения эффективности, поскольку предполагается возможность двойственного подхода к ее решению: 1) максимизация полезного эффекта при обеспечении заданных затрат и 2) минимизация затрат при достижении заданного полезного эффекта.

При анализе результатов различных процессов, наряду с понятием «эффективность», используется понятие «результативность» [3]. Согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015 под результативностью R (так же, как и под эффективностью) понимается обобщенная характеристика какого-либо процесса, отличительная особенность которой состоит в том, что она устанавливает меру соответствия между результатом, полученным при осуществлении процесса, и запланированным результатом, т.е. определяет степень достижения запланированного результата [1]. Соответственно, показатель результативности R представляет собой отношение полученного результата R_o к запланированному результату R_p :

$$R = \frac{R_o}{R_p}, \quad (2)$$

где $R_o \leq R_p$ и, как следствие, $R \leq 1$.

Показатель R , по аналогии с показателем E_E , выражается в числовой форме и является безразмерной величиной, поскольку сравниваемые результаты – полученный и запланированный измеряются в одинаковых единицах.

С увеличением R_o , т.е. с приближением R_o к R_p , показатель R увеличивается и при $R_o = R_p$ принимает максимальное значений $R_{max} = 1$.

Показатель R используется при решении задач проектирования и модернизации различных процессов, улучшения организационных и технических условий их реализации [5, 6].

До сих пор понятие «результативность» не получило распространения при анализе результатов процесса опрыскивания растений пестицидами, но вместе с тем широко применяется понятие «биологическая эффективность действия пестицидов», под которой понимается обобщенная характеристика процесса опрыскивания растений пестицидами, устанавливающая меру соответствия между состоянием растений, не подвергавшихся воздействию пестицидов (контрольные образцы растений), и состоянием растений, подвергавшихся воздействию пестицидов (опытные образцы растений) [7-9].

Показатель биологической эффективности действия пестицидов E_B определяется по формуле

$$E_B = 1 - \frac{N_e}{N_k}, \quad (3)$$

где в случае гербицидов ($E_B \equiv E_{Bh}$) параметры $N_k \equiv N_{kh}$ и $N_e \equiv N_{eh}$ – количество сорняков [7], в случае инсектицидов ($E_B \equiv E_{Bi}$) параметры $N_{ki} \equiv N_{ki}$ и $N_{ei} \equiv N_{ei}$ – количество насекомых-вредителей [8] и в случае фунгицидов ($E_B \equiv E_{Bf}$) параметры $N_{kf} \equiv N_{kf}$ и $N_{ef} \equiv N_{ef}$ – количество пораженных болезнью растений [9] – соответственно, в контрольных и опытных образцах растений.

Параметры N_k и N_e имеют одинаковое смысловое значение и одинаковые единицы измерения, так что показатель E_B является безразмерной величиной. В общем случае $N_e \leq N_k$ и, соответственно, $E_B \leq 1$. С уменьшением N_e , т.е. с усилением эффекта опрыскивания, E_B увеличивается ($E_B \rightarrow E_{Bmax} = 1$ при $N_e \rightarrow 0$).

Рассмотрим показатель биологической эффективности действия пестицидов E_B в сравнении с показателем результативности R и показателем экономической эффективности E_E . Подобно показателю R , устанавливающему меру соответствия между полученным и запланированным результатами, показатель E_B определяет, в какой степени улучшается состояние растений после их опрыскивания пестицидами. Фактически в роли своеобразного показателя результативности выступает отношение N_e/N_k , находящееся в правой части формулы (3). В этом отношении параметр N_e , стоящий в числителе, количественно указывает на результат, полученный при опрыскивании растений пестицидами и заключающийся в частичном улучшении состояния растений, в то время как параметр N_k , стоящий в знаменателе, количественно указывает на результат, к достижению которого следует стремиться, поскольку он заключается в полном улучшении состояния растений, т.е. в полном уничтожении сорняков или насекомых-вредителей либо в полном преодолении заболеваний растений. Вместе с тем, в отличие от показателя E_E , показатель E_B , не учитывает затрат на осуществление процесса опрыскивания.

Среди различных затрат, которыми сопровождается процесс опрыскивания растений пестицидами, особого внимания заслуживают затраты на пестициды, используемые при опрыскивании, поскольку, как отмечалось выше, значительная часть пестицидов во время опрыскивания оседает за пределами обрабатываемых участков, что ведет не только к потерям пестицидов в стоимостном выражении, но и к загрязнению пестицидами окружающей среды. Соответствующий показатель эффективности использования пестицидов при опрыскивании растений определяется по формуле

$$E_U = \frac{M_r}{M} \quad (4)$$

где M_r – количество пестицидов, минимально необходимое для опрыскивания растений, т.е. такое количество пестицидов, которое требуется осадить без потерь в виде капель на поверхность растений для того, чтобы достигнуть требуемого улучшения состояния растений; M – общее количество пестицидов, которое приходится затрачивать при опрыскивании с учетом наличия потерь пестицидов.

С учетом того, что $M = M_r + M_l$, где M_l – потери пестицидов в процессе опрыскивания, выражение (4) можно представить в виде $E_U = 1 - (M_l/M)$ или $E_U = 1 - [1 + (M_r/M_l)]^{-1}$.

Параметры M , M_r и M_l имеют одинаковое смысловое значение и одинаковые единицы измерения, так что показатель E_U является безразмерной величиной. Будем для определенности считать, что эти параметры измеряются в единицах массы, в частности, M_r представляет собой массу рабочей жидкости пестицидов, минимально необходимую для опрыскивания. Соответственно, $M_r = \rho V_r$, где ρ – плотность рабочей жидкости пестицидов, V_r – объем рабочей жидкости пестицидов, минимально необходимый для опрыскивания.

В общем случае $M_r \leq M$ и $M_l \leq M$ и, соответственно, $E_U \leq 1$. Для конкретного процесса опрыскивания параметру M_r , как правило, задается некоторое фиксированное значение, в то время как параметр M_l может изменяться случайным образом, вызывая соответствующие изменения параметра M . С уменьшением M_l , т.е. с уменьшением потерь пестицидов, E_U увеличивается; $E_U \rightarrow E_{U,max} = 1$ при $M_l \rightarrow 0$.

Объединяя показатели E_B и E_U , можно получить интегрированный показатель эффективности опрыскивания растений пестицидами $E_{BU} = E_B E_U$, который учитывает и биологическую эффективность действия пестицидов, и эффективность использования пестицидов при опрыскивании растений.

$$E_{BU} = \left(1 - \frac{N_e}{N_k}\right) \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{M_r}{M_l}}\right), \quad (5)$$

где в случае гербицидов ($E_{BU} \equiv E_{BUh}$) параметры $M_r \equiv M_{rh}$ и $M_l \equiv M_{lh}$, в случае инсектицидов ($E_{BU} \equiv E_{BUi}$) параметры $M_r \equiv M_{ri}$ и $M_l \equiv M_{li}$ и в случае фунгицидов ($E_{BU} \equiv E_{BUf}$) параметры $M_r \equiv M_{rf}$ и $M_l \equiv M_{lf}$ – количество пестицидов (гербицидов, инсектицидов и фунгицидов), необходимое для опрыскивания, и потери пестицидов (гербицидов, инсектицидов и фунгицидов) в процессе опрыскивания, соответственно.

В общем случае $E_{BU} \leq 1$, поскольку $E_B \leq 1$ и $E_U \leq 1$. E_{BU} увеличивается с увеличением и E_B , и E_U . $E_{BU} \rightarrow E_{BU,max} = 1$ при $N_e \rightarrow 0$ и $M_l \rightarrow 0$.

Очевидно, что в формуле (5) параметры массы M_r и M_l можно заменить, соответственно, на параметры объема V_r и V_l .

Параметры процесса опрыскивания.

В ходе опрыскивания на поверхность растений наносят капли рабочей жидкости пестицидов, которую обычно готовят в виде водных растворов или водных эмульсий и распыляют с помощью форсунки.

Основными параметрами процесса опрыскивания являются радиус капель R_f , летящих из форсунки на поверхность растений, степень покрытия α и густота покрытия β . Между этими параметрами существуют определенные взаимосвязи, которые следует учитывать на практике при выборе приемлемых значений параметров. Поэтому изучение особенностей этих взаимосвязей представляет повышенный интерес.

Поскольку капли в факеле распыла сложным образом распределяются по размерам, то под параметром R_f подразумевается средний (медианно-массовый) радиус летящей капли [10]. Соответственно, средний объем летящей капли $V_f = (4/3)\pi R_f^3$.

Параметры α и β определяются по формулам

$$\alpha = \frac{S_r}{S}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{N_s}{S}, \quad (7)$$

где S_r – площадь поверхности растений, которая покрывается осевшими на нее каплями распыляемой рабочей жидкости, N_s – количество капель, осевших на поверхность опрыскиваемых растений, S – общая площадь поверхности опрыскиваемых растений (обычно под поверхностью опрыскиваемых растений понимается поверхность листьев) [11, 12].

При оседании капли на поверхность ее первоначально сферическая форма, которую она имела в факеле распыла, подвергается изменениям вследствие растекания капли по поверхности. Эти изменения определяются соотношением силы поверхностного натяжения и силы тяжести, а также

зависят от смачиваемости поверхности. Будем считать, что осевшая капля приобретает форму сферического сегмента, что обычно имеет место при ее оседании на горизонтальную поверхность, в этом случае площадь кругового следа осевшей капли $S_s = \pi R_s^2$, где R_s – радиус следа осевшей капли, т.е. радиус основания сферического сегмента.

Так, степень покрытия α зависит от площади следа осевших капель S_s и их количества на единице площади, т.е. густоты покрытия β : $\alpha = \beta S_s$ или

$$\alpha = \pi \beta R_s^2, \quad (8)$$

где радиус следа осевших капель R_s зависит от радиуса летящих капель R_f , причем зависимость $R_s(R_f)$ является прямо-пропорциональной и ее характер определяется значением угла смачивания θ согласно формуле [13]

$$R_s = R_f \left(\frac{4 \sin^3 \theta}{2 + \cos^3 \theta - 3 \cos \theta} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), получаем выражение, устанавливающее взаимосвязь между параметрами α , β и R_f :

$$\alpha = \pi \beta R_f^2 \left(\frac{4 \sin^3 \theta}{2 + \cos^3 \theta - 3 \cos \theta} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (10)$$

Согласно (11) степень покрытия α зависит от угла смачивания θ , который является количественной оценкой степени смачивания поверхности растения рабочей жидкостью, что находит свое отражение в характере растекания осевшей капли по поверхности, определяемом соотношением радиуса R_s и высоты h сферического сегмента, форму которого приобретает осевшая капля: при $\theta < 90^\circ$ поверхность гидрофильная ($R_s > h$), при $\theta > 90^\circ$ – гидрофобная ($R_s < h$). Особый случай представляет равновесное смачивание, когда $\theta = 90^\circ$ ($R_s = h$) и осевшая капля приобретает форму полусферы, так что формула (9) упрощается, принимая вид $R_s = \sqrt[2]{2} R_f$, который также можно получить, исходя из условия равенства объемов летящей и осевшей капли: $V_f = V_s$ или $(4/3)\pi R_f^3 = (2/3)\pi R_s^3$. Соответственно, выражение (10) преобразуется к более простому виду $\alpha = 2^{\frac{2}{3}} \pi \beta R_f^2$.

В ходе опрыскивания следует наносить капли на поверхность растений таким образом, чтобы они после оседания не сливались друг с другом [12]. Это возможно при условии, когда между соседними осевшими каплями имеются зазоры. Максимально возможная степень покрытия $\alpha_{\max}$ достигается при минимально возможных зазорах между каплями, т.е. при максимально возможной густоте покрытия β . Если величиной таких зазоров пренебречь в силу их малости, то можно считать, что значение $\alpha_{\max}$ достигается при условии, когда круговые следы осевших капель в своем взаимном расположении на поверхности образуют плотнейшую упаковку, характеризующуюся тем, что в ней каждый круг окружен шестью другими кругами. При этом значение $\alpha_{\max}$ равно плотности такой упаковки: $\alpha_{\max} = \pi / (2\sqrt{3}) \approx 0,9$. На практике обычно устанавливаются более низкие значения α , они определяются эмпирически с учетом биологического потенциала конкретных видов пестицидов и могут варьироваться в довольно широком диапазоне. Так, надежные результаты опрыскивания могут быть получены для большинства пестицидов при значениях α от 0,8 до 0,6 [13] и даже ниже – вплоть до 0,3 [14]. Критический предел α , ниже которого происходит резкое снижение эффективности применения пестицидов, составляет $\approx 0,01-0,02$ [12]. Аналогично, для большинства пестицидов могут в довольно широком диапазоне варьироваться значения β : от 20 до 90 капель/см² [12].

На практике при выборе приемлемых значений параметров α и β следует в соответствии с (10) учитывать их связь между собой, а также с размером распыляемых капель, т.е. со значением R_f , которое задается в зависимости от используемого для опрыскивания типа распылительного устройства, его технических характеристик и режимов работы.

Для более эффективного использования пестицидов при опрыскивании растений важно оценивать минимально необходимое для опрыскивания количество пестицидов, а именно: введенный выше параметр M_r . Будем для определенности считать, что этот параметр представляет собой массу рабочей жидкости пестицидов, необходимую для опрыскивания. Соответственно,

$M_r = \rho V_r$, где ρ – плотность рабочей жидкости, V_r – объем рабочей жидкости, необходимый для опрыскивания.

Значение V_r зависит от среднего объема распыляемых капель и количества капель, осевших на поверхность опрыскиваемых растений: $V_r = V_f N_s$ или, с учетом (8), $V_r = (4/3)\pi\beta R_f^3 S$, откуда

$$M_r = (4/3)\pi\beta\rho R_f^3 S. \quad (11)$$

Общая площадь поверхности опрыскиваемых растений (поверхности листьев) S в (11) оценивается эмпирически с использованием разнообразных методик [15, 16].

Особенности аэрозольного опрыскивания.

При аэрозольном, или высокодисперсном, опрыскивании растений капли распыляемой рабочей жидкости пестицидов обычно имеют радиус R_f в пределах от 20 до 50 мкм. Для проведения аэрозольного опрыскивания используют жидкие препараты на основе различных видов пестицидов, предназначенных для борьбы с вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур, а также с сорняками [17], которые распыляют с помощью специальных аэрозольных опрыскивателей, в частности, аэрозольных генераторов, обычно устанавливаемых на наземном транспорте (автомобилях) или летательных аппаратах (самолетах, вертолетах, мотодельтапланах) [18].

Капли аэрозоля благодаря своей малости длительное время находятся в воздухе во взвешенном состоянии, образуя мелкокапельную завесу, которая легко проникает в полог растений и равномерно распределяется по всей обрабатываемой поверхности. Как следствие, капли оседают не только на верхнюю, но и, что особенно важно, на нижнюю сторону листьев, на которой расположено большинство устьиц и сорбция пестицидов поэтому оказывается эффективнее [19]. Лучшему усвоению пестицидов растениями способствует также то обстоятельство, что капли аэрозоля по размеру меньше устьиц большинства сельскохозяйственных культур [20]. При распылении инсектицидов образование устойчивой аэрозольной завесы способствует тому, что губительному воздействию подвергаются насекомые, как находящиеся на поверхности растений, так и летающие в воздухе [17]. Итак, аэрозольная обработка является эффективным способом защиты растений, позволяющим «существенно снизить расход ядохимикатов, улучшить равномерность покрытия обрабатываемых поверхностей и значительно увеличить производительность процесса» [20].

Вместе с тем капли аэрозоля из-за своей малости легко сносятся ветром и быстро испаряются при высокой температуре и низкой влажности, порой не успевая осесть на поверхность растений [17, 19, 20]. Эти обстоятельства являются главной причиной, сдерживающей широкое применение аэрозольной обработки растений в сельском хозяйстве.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является уменьшение расстояния от сопла распылительного устройства до опрыскиваемого растения. Так, согласно экспериментальным данным [21], в умеренной климатической зоне, где средняя влажность воздуха весной и летом составляет ~60%, у аэрозольных капель на водной основе, имеющих $R_f = 30$ мкм, время испарения в летящем состоянии $t_e \approx 6$ с и скорость осаждения $v \approx 11$ см/с. Отсюда следует, такие капли, вылетевшие из сопла, смогут долететь до растения, не успев испариться, при условии, когда расстояние от сопла до растения $h \leq vt_e \approx 70$ см, т.е. когда время полета капли от сопла до растения t_f меньше времени ее испарения: $t_f = h/v \leq t_e$. Как показывает практика, такого значения времени полета капли t_f также оказывается достаточно для того, чтобы она не была снесена ветром. Так, при использовании аэрозольного штангового опрыскивателя КР-0295 на базе автомобиля Нисан, когда распылители размещены на штангах на расстоянии ~1 м от поверхности земли, влияние ветра оказывается незначительным, так что капли распыляемой рабочей жидкости пестицидов с $R_f = 10...25$ мкм практически не выносятся за полосу обработки, тогда как при использовании аэрозольных опрыскивателей КХ-00460 и МДР-50СХ на базе мотодельтапланов наблюдается значительный снос таких же капель за полосу обработки, поскольку высота полета мотодельтаплана при проведении аэрозольной обработки составляет около 5 м и, соответственно, время t_f значительно выше, чем у штанговых опрыскивателей [21].

Обычно используемые для аэрозольной обработки растений опрыскиватели (в том числе упомянутые выше) имеют сравнительно сложные по конструкции и техническому обслуживанию системы распыления, составными элементами которых являются: бак для распыляемой рабочей

жидкости, распылительная форсунка и насос со шлангами для перекачки жидкости из бака к форсунке. Гораздо более простыми и удобными для работы являются системы опрыскивания на основе аэрозольных баллонов, которые, однако, до сих пор имеют ограниченное применение для обработки растений пестицидами [22].

Аэрозольный баллон представляет собой устройство, состоящее из металлического контейнера, клапана с распылительной головкой и заборной трубки. В контейнер, емкость которого обычно варьируется от 100 мл до 1 л, закачиваются под давлением газ (пропеллент) и рабочая жидкость, подлежащая распылению. При нажатии на распылительную головку клапан открывается, позволяя рабочей жидкости, смешанной с газом, выходить через сопло в виде распыленной струи, длина которой достигает 3-4 м. Капли рабочей жидкости, распыляемые аэрозольным баллоном, имеют средний радиус $R_f = 30$ мкм, в целом же их радиус изменяется в диапазоне 1-60 мкм [22].

Аэрозольные баллоны производятся в массовых масштабах и широко применяются в самых разных сферах. С их помощью распыляют чистящие средства, освежители воздуха, смазочные материалы, средства для удаления ржавчины, краски, дезинфицирующие и обезболивающие средства, пищевые продукты-спреи, лаки для волос и др. В сельском хозяйстве с помощью аэрозольных баллонов в основном распыляют инсектициды для борьбы с различными насекомыми в животноводстве [23], а также гербициды как сплошного [24], так и селективного [25] действия, уничтожающие широкий спектр сорняков.

Результаты и их обсуждение. Типовые мультикоптеры-опрыскиватели имеют систему распыления, содержащую бак для распыляемой рабочей жидкости пестицидов, установленный в центральной части корпусной рамы, и несколько форсунок, размещенных на концах горизонтальных лучей рамы непосредственно под пропеллерами или же на горизонтальной штанге, закрепленной под баком, а также шланги для прокачки жидкости из бака к форсунке и насос, обеспечивающий прокачку жидкости и ее выход из сопел форсунок в виде аэрозольной струи. Такие мультикоптеры обычно формируют широкую (в несколько метров) полосу распыления рабочей жидкости, а потому служат в основном для сплошного опрыскивания больших по площади сельскохозяйственных угодий, на обработку которых требуется, соответственно, большое количество рабочей жидкости. При этом, однако, проявляется существенный недостаток мультикоптеров, отрицательно влияющий на производительность опрыскивания, который связан с необходимостью частой дозаправки бака рабочей жидкостью, а также частой перезарядки или смены аккумуляторных батарей, т.е. с проведением дополнительных взлетно-посадочных процедур, что приводит к усложнению и удлинению в целом работы по распылению жидкостей [26]. С учетом данного обстоятельства экономически оправдано проводить опрыскивание с помощью мультикоптеров при условии расходования пестицидов в относительно малых количествах [26].

Значительное снижение расходования пестицидов может быть достигнуто, если сельскохозяйственные угодья подвергаются не сплошной, а точечной обработке пестицидами [27]. На практике необходимость в проведении точечного опрыскивания возникает довольно часто, прежде всего в тех случаях, когда имеет место очаговый характер распространения по полю сорняков, вредителей или болезней растений, или же когда подвергаемые опрыскиванию растения, например, плодовые деревья, расположены на расстоянии друг от друга. Наибольший эффект точечного опрыскивания достигается, если мультикоптер оснащен автоматизированной системой управления, позволяющей непосредственно в полете выявлять на поле нужные для обработки места и селективно их опрыскивать, т.е. работать по так называемой технологии «see-and-spray» («видеть и распылять») [28]. Следует отметить, что точечное опрыскивание является оправданным не только с экономической точки зрения – за счет сокращения расхода пестицидов, но и с экологической – за счет уменьшения или предотвращения загрязнения пестицидами тех участков полей или прилегающей территории, которые не подлежат опрыскиванию.

В принципе точечное опрыскивание можно проводить с помощью мультикоптеров, предназначенных для сплошного опрыскивания и оснащенных типовой системой распыления, содержащей несколько форсунок, при условии, что работает только одна форсунка, однако в этом

случае использование мультикоптеров является малоэффективным, не соответствующим их основному назначению.

В этой связи для проведения точечного опрыскивания более предпочтительно оснащать мультикоптеры системой распыления, которая отличается наличием только одной форсунки, размещенной непосредственно под баком для рабочей жидкости или на нижнем конце вертикальной телескопической штанги, закрепленной на раме [29].

Вместе с тем следует заметить, что обычно монтируемая на мультикоптерах система распыления, состоящая из бака, форсунок (как нескольких, так и одной), насоса и шлангов, является довольно сложной по конструкции, из-за чего становится более сложным и длительным ее техническое обслуживание (промывка). Кроме того, такая система распыления обладает большой массой, что требует для ее использования мультикоптеров с повышенной мощностью.

С учетом перспектив использования системы опрыскивания растений пестицидами на основе аэрозольных баллонов, о чем упоминалось выше, представляет интерес изучение возможностей их монтажа на мультикоптерах. Вообще говоря, в последние годы начали разрабатываться мультикоптеры для точечного распыления жидкостей, содержащие систему распыления, выполненную в виде съемного аэрозольного баллона, заполненного жидкостью определенного типа и снабженного съемным механизмом регулирования подачи жидкости из баллона [30]. Однако такие мультикоптеры пока не получили широкого применения и в основном служат для проведения покрасочных работ, при этом аэрозольные баллоны заправляются соответствующими красками, которые тонкой струей наносятся на окрашиваемые поверхности (в частности, стены высотных зданий), создавая определенные рисунки.

В Белорусском государственном аграрном техническом университете (БГАТУ) в рамках изучения особенностей применения мультикоптеров для опрыскивания растений разработан экспериментальный образец навесного распылительного устройства, монтируемого на мультикоптере и работающего на основе использования легкоъемных сменных аэрозольных баллонов. Разработанное устройство представляет собой исполнительный механизм для аэрозольного баллона, обеспечивающий крепление аэрозольного баллона на мультикоптере и воздействие на распылительную головку аэрозольного баллона для осуществления распыления аэрозоля, и может быть использовано для автоматического дистанционного управления распылением аэрозоля.

На рисунке 1 схематично показан исполнительный механизм для аэрозольного баллона в сборе с баллоном. Он состоит из крепежного приспособления и спускового приспособления.

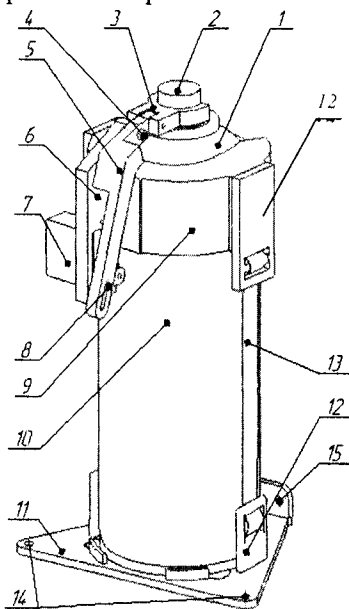


Рисунок 1 - Схема исполнительного механизма

Крепежное приспособление содержит опорную пластину 11, имеющую монтажные отверстия 14 для ее закрепления на мультикоптере и расположенную со стороны дна корпусного стакана 10 баллона, и держатель в форме полого цилиндра 9 с продольным разрезом и внутренним диаметром, соответствующим внешнему диаметру корпусного стакана 10 баллона, на внутренней поверхности которого выполнена кольцевая канавка, соответствующая по размерам кольцевому буртику в месте соединения корпусного стакана 10 и корпусной крышки 1 баллона, причем держатель 9 соединен с опорной пластиной 11 посредством натяжных ремней 13, проходящих через проушины, попарно выполненные в накладках 12, расположенных на диаметрально противоположных сторонах держателя 9 и опорной пластины 11.

Спусковое приспособление содержит стойку 6, закрепленную на держателе 9, на которой размещены электропривод 7 и двуплечий нажимной рычаг 5 с горизонтальной осью 4, на одном из плеч которого установлен нажимной элемент в форме вилки 3, выполненный с возможностью нажатия на нижний выступ распылительной головки 2, а на другом – выполнено продолговатое отверстие, в которое проходит штифт 8 приводного рычага электропривода 7.

Таким образом, в исполнительном механизме баллон закреплен с помощью натяжных ремней, которые обеспечивают надежное фиксированное закрепление баллона за счет прочного прижатия донной части корпусного стакана баллона к опорной пластине, установленной на мультикоптере, а также удобный и быстрый монтаж и демонтаж баллона, в том числе замену опорожненного баллона на заправленный, поскольку для монтажа или демонтажа баллона достаточно слегка оттянуть прижимные ремни.

В исполнительном механизме пространственная ориентация баллона определена в соответствии с той пространственной ориентацией опорной пластины, которую она приобретает, будучи закрепленной на мультикоптере. В частности, опорную пластину можно закрепить в нижней части корпуса мультикоптера параллельно плоскости расположения его пропеллеров, при этом баллон будет, соответственно, ориентирован перпендикулярно этой плоскости. Поскольку эта плоскость во время полета или зависания мультикоптера обычно находится в горизонтальном положении, то баллон будет, соответственно, находиться в вертикальном положении с ориентацией распылительной головки вниз, что позволяет с помощью мультикоптера обрабатывать растения пестицидной аэрозольной струей, направленной на растения сверху вниз – при условии использования конструктивного варианта баллона, в котором аэрозольная струя выходит из сопла параллельно продольной оси цилиндрического стакана баллона. Если же аэрозольная струя выходит из сопла перпендикулярно продольной оси цилиндрического стакана баллона, то она направлена на растения сбоку. Таким образом, устанавливая на мультикоптере баллоны разных конструктивных вариантов, можно всесторонне (и сверху, и сбоку) обрабатывать аэрозольными пестицидами различные виды растений (с учетом их характерных размеров и строения).

Держатель может быть выполнен из упругого материала (металла или пластика) с возможностью пружинного зажатия корпусного стакана баллона, благодаря чему облегчается процедура монтажа баллона: для того чтобы установить баллон в держатель достаточно слегка отогнуть дугообразные части полого цилиндра, и после того, как баллон примет фиксированное положение, его окончательно закрепляют в исполнительном механизме с помощью натяжных ремней.

Поскольку в исполнительном механизме имеется электропривод, то в нем обеспечены возможности для автоматического дистанционного управления распылением аэрозоля. Для повышения эффективности работы исполнительного механизма предпочтительно в качестве электропривода использовать сервопривод, объединяющий в едином конструктивном узле электродвигатель с редуктором и блоком управления. В последние годы сервоприводы получили распространение в различных навесных устройствах мультикоптеров.

На рисунке 2 представлен в разных ракурсах внешний вид изготовленного исполнительного механизма (на рисунке слева показан блок автоматического дистанционного управления работой исполнительного механизма, закрепленный на одном из натяжных ремней).

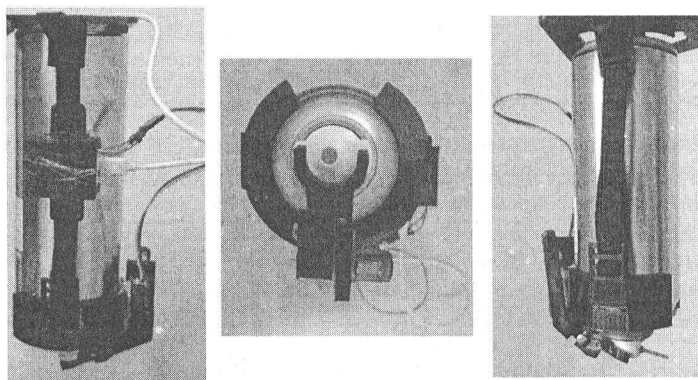


Рисунок 2 - Внешний вид исполнительного механизма

На рисунке 3 схематично показано возможное размещение баллона на мультикоптере с помощью исполнительного механизма для разных конструктивных вариантов баллона.

Основным элементом конструкции мультикоптера 16 является корпус 18, к нижней (донной) части которого прикреплена опорная пластина 11, так что во время полета или зависания мультикоптера, когда плоскость расположения его пропеллеров находится в горизонтальном положении, корпусной стакан 10 баллона оказывается ориентированным перпендикулярно, причем распылительная головка 2 направлена вниз и расположена выше уровня стоп опорных ног 17.

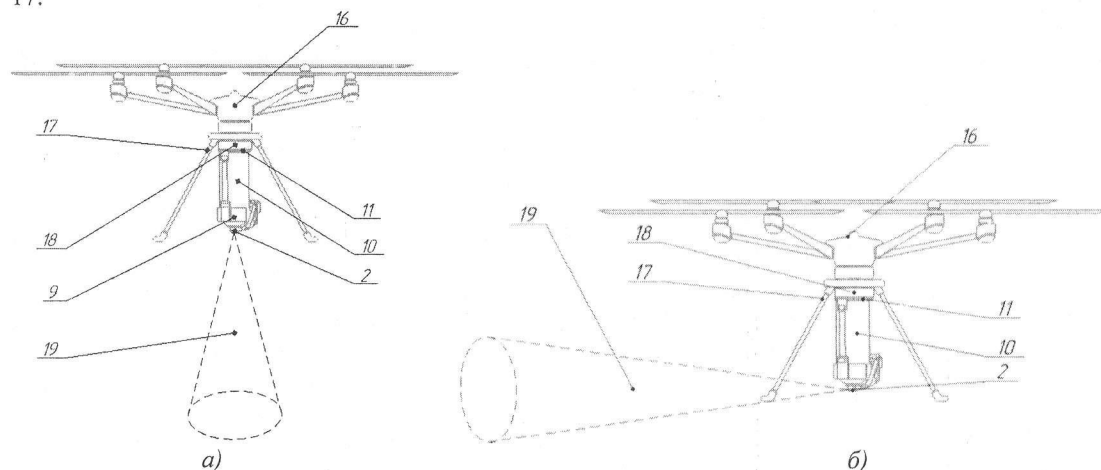


Рисунок 3 - Схемы размещения баллона на мультикоптере

В тех случаях, когда мультикоптер оснащен штатным навесным оборудованием, опорная пластина 11 прикрепляется к нижней (донной) части этого оборудования.

В разных конструктивных вариантах баллона ось сопла параллельно или перпендикулярна продольной оси корпусного стакана баллона, так что выходящая из сопла аэрозольная струя направлена, соответственно, вниз (рисунок 3, а) или вбок (горизонтально) (рисунок 3, б).

На рисунке 4 показан внешний вид изготовленного исполнительного механизма в процессе испытаний для разных конструктивных вариантов баллона: когда выходящая из сопла аэрозольная струя направлена вниз (рисунок 4, а) или вбок (горизонтально) (рисунок 4, б). Для проведения испытаний были специально приготовлены баллоны, содержащие воду в качестве распыляемой рабочей жидкости.

Таким образом, разработанный исполнительный механизм обеспечивает надежное фиксированное закрепление аэрозольного баллона на мультикоптере, удобный и быстрый монтаж и демонтаж баллона с возможностью его размещения с ориентацией распылительной головки вниз

при сохранении возможности автоматического дистанционного управления распылением аэрозоля, в том числе формирования аэрозольной струи, направленной как вниз, так и вбок.

Описаны конструктивные и функциональные характеристики разработанного навесного распылительного устройства, монтируемого на мультикоптере и работающего на основе использования легкосъёмных сменных аэрозольных баллонов, которое представляет собой исполнительный механизм для аэрозольного баллона, обеспечивающий крепление аэрозольного баллона на мультикоптере и воздействие на распылительную головку аэрозольного баллона для осуществления распыления аэрозоля, и может быть использован для автоматического дистанционного управления распылением аэрозоля.

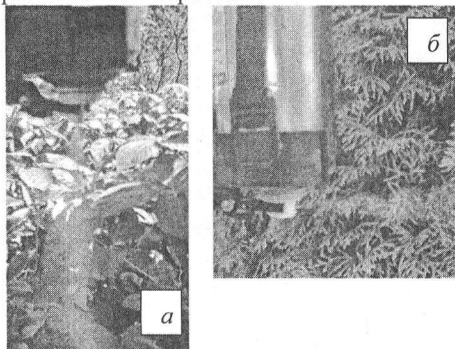


Рисунок 4 - Внешний вид исполнительного механизма в процессе испытаний

Выводы. Выполнен сравнительный анализа различных видов известных показателей эффективности аэрозольного опрыскивания растений пестицидами, в том числе осуществляемого с помощью мультикоптеров-опрыскивателей. Предложен интегрированный показатель эффективности опрыскивания растений пестицидами, учитывающий биологическую эффективность действия пестицидов и эффективность использования пестицидов при опрыскивании.

Обсуждены основные параметры процесса опрыскивания растений пестицидами, включая радиус капель распыляемой жидкости, степень покрытия и густоту покрытия, и характер их взаимосвязей, который следует учитывать на практике при выборе их приемлемых значений.

Рассмотрены особенности практической реализации аэрозольного опрыскивания, в частности, перспективы использования системы опрыскивания на основе аэрозольных баллонов, отличающиеся простотой и удобством работы.

Список источников

1. Юркова Т.И. Термин «эффективность процесса» и его экономическая интерпретация // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1. 6 с.
2. Калабашкина Е.В [и др.]. Экономическая эффективность опрыскивании гербицидами посевов озимой пшеницы сорта Немчиновская 17 // Вестник Тувинского гос. ун-та. 2020. Вып. 2. Естественные и сельскохозяйственные науки. № 2. С. 49-59.
3. Дедков В.К. Принципы формирования критериев и показателей эффективности функционирования сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 4. С. 3-8.
4. Голоскоков К.П. Губернаторов О.Н., Губернаторов М.О. Комплексная оценка качества и эффективности автоматизированных систем управления // Вестник Гос. ун-та. морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. 2023. Т. 15. № 1. С. 145-152.
5. Назаренко Ю.А., Степаненко С.М., Харченко В.Г. Оценка результативности процесса проектирования авиационных двигателей // Вестник двигателестроения. 2018. №2. С. 143-147.
6. Бортникова К.С., Спиридонов Д.М. Обзор методов оценки результативности на примере СМК // Сборник статей. VIII Междунар. молодеж. науч. конф.: Физика. Технологии. Инновации. – Екатеринбург. УрФУ. 2021. С. 77-87.

7. Аль-Малики А.А.С., Долженко В.И., Долженко Т.В. Биологическая эффективность гербицидов Тарзек, ВГ и U46-Комби флюид 6, ВР в посевах пшеницы озимой // Изв. Санкт-Петербург. ГАУ. 2022. № 2. С. 58-66.
8. Антипов Е.В., Созина Е.М. Сравнение биологической эффективности инсектицидов против тлей // Современные методы и подходы в защите растений: матер. II междунар. науч. конф. (Екатеринбург, 16-18 ноября 2020 г.). Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2020. С. 22-23.
9. Блинцов А. И. [и др.]. Биологическая эффективность фунгицидов в защите сеянцев дуба от мучнистой росы // Труды БГТУ. 2011. №1. Лесное хозяйство. С. 216-218.
10. Палапин А.В., Сопин Р.С. Методика экспериментальных исследований для определения качественных показателей работы ультрамалообъемного вентиляторного опрыскивателя // Наука, образование, молодежь: горизонты развития. Сб. тр. Нац. науч.-практ. конф. Керчь: Изд-во ФГБОУ ВО «Керч. гос. морской технолог. ун-т», 2021. С. 42-47.
11. Маркевич А.Е., Немировец Ю.Н. Основы эффективного применения пестицидов: Справочник в вопросах и ответах по механизации и контролю качества применения пестицидов в сельском хозяйстве. Горки: Могилевский гос. учеб. центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки кадров, консультирования и аграрной реформы. 2004. 60 с.
12. Ключков А., Новицкий П. Практические аспекты эффективного применения пестицидов // Земледелие и защита растений. 2015. № 4. С. 53-59.
13. Капустин А.Н. Основы теории и расчета машин для основной и поверхностной обработки почв, посевных машин и машин для внесения удобрений: курс лекций. Юргинский технолог. ин-т. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2013. 134 с.
14. Cieniawska B., Pentos K. Average degree of coverage and coverage unevenness coefficient as parameters for spraying quality assessment // Agriculture. 2021. No 11. P. 151. 14 pp.
15. Тарасенко С.А., Дорошкевич Е.И., Тарасенко Н.И. Задания к учебной практике по физиологии и биохимии растений для студентов агрономического факультета заочной формы обучения (специальность 1-74 02 01 «Агрономия. Гродно: ГГАУ, 2012. 8 с.
16. Дмитриев Н.Н., Хуснидинов Ш.К. Методика ускоренного определения площади листовой поверхности сельскохозяйственных культур с помощью компьютерной технологии // Вестник КрасГАУ. 2016. №7. С. 88-93.
17. Аэрозоли в сельском хозяйстве. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mehanika.ru/sbornik-statej/1270-aerозoli-v-selskom-khozyajstve.html> (дата обращения: 6.08.2025).
18. Ударцева О.В. Исследование различных технологий внесения пестицидов, используемых на территории алтайского края // Фундаментальные исследования. 2011. № 8-1. С. 185-187.
19. Горячкина И.Н. [и др.]. Лабораторные исследования дисперсности аэрозоля для механизированной обработки растений // Вестник РГАТУ. 2022. Т.14, №3. С. 85-93.
20. Тетерин В. С., Гапеева Н. Н., Панферов Н. С. Способ аэрозольной обработки пропашных культур // Вестник РГАТУ. 2020. № 1. С. 100-106.
21. Федоренко В.Ф., Аристов Э.Г., Краховецкий Н.Н. Экологические аспекты оптимизации применения средств защиты растений // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 1. С. 4-11
22. Matoba Y., J. Ohnishi, M. Matsuo. A simulation of insecticides in indoor aerosol space spraying // Chemosphere. 1993. No 26. P. 1167-1186
23. Перол. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://biohimfarm.ru/protivoparazitarnie/perol/> (дата обращения: 6.08.2025).
24. Total Solutions Barren Aerosol. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gemplers.com/products/total-solutions-barren-aerosol> (дата обращения: 6.08.2025).
25. Total Solutions Triple Treat Foaming Selective Herbicide Spray. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gemplers.com/products/total-solutions-triple-treat-foaming-selective-herbicide-spray> (дата обращения: 6.08.2025).
26. Эрдниев Л.П., Кузянов Д.А., Гусев Ю.С., Микеров А.Н. Проблемные вопросы применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 5. С. 513–521.
27. Zhou M. [et al]. Design and evaluation of the target spray platform // Int. J. Adv. Robotic Systems. 2021. No 2. P. 1-17.

28. See & Spray Technology™. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://extension.msstate.edu/sites/default/files/publications/publications/P3904_web.pdf. (дата обращения: 6.08.2025).
29. Oryctes. High Precision Agriculture Spraying. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aonic.com/my/oryctes/>. – Дата доступа: 8.02.2023. (дата обращения: 6.08.2025).
30. You Can Now Buy Your Own Spray Painting Drone Courtesy Of KATSU. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pinterest.com/pin/382031980877054180/>.

References

1. Yurkova T.I. The term "process efficiency" and its economic interpretation // Modern problems of science and education. 2014. No. 1. 6 p.
2. Kalabashkina E.V. [et al.]. Economic efficiency of spraying winter wheat crops of the Nemchinovskaya 17 variety with herbicides // Bulletin of Tuva State University. 2020. Issue 2. Natural and agricultural sciences. No. 2. pp. 49-59.
3. Dedkov V.K. Principles of formation of criteria and indicators of the functioning efficiency of complex technical systems // Reliability and quality of complex systems. 2013. No. 4. pp. 3-8.
4. Goloskokov K.P. Gubernatorov O.N., Gubernatorov M.O. Comprehensive Assessment of the Quality and Efficiency of Automated Control Systems // Bulletin of the State University of Maritime and Inland Shipping named after Adm. S. O. Makarov. 2023. Vol. 15. No. 1. pp. 145-152.
5. Nazarenko Yu. A., Stepanenko S. M., Kharchenko V. G. Evaluation of the Performance of the Aircraft Engine Design Process // Bulletin of Engine Building. 2018. No. 2. pp. 143-147.
6. Bortnikova K. S., Spiridonov D. M. Review of Performance Assessment Methods Using the Example of QMS // Collection of Articles. VIII Int. Youth Scientific Conf.: Physics. Technologies. Innovations. – Yekaterinburg. UrFU. 2021. pp. 77-87.
7. Al-Maliki A.A.S., Dolzhenko V.I., Dolzhenko T.V. Biological efficiency of herbicides Tarzek, VG and U46-Combi fluid 6, VR in winter wheat crops // Izvestia. Sankt-Peterburg. GA U. 2022. No. 2. pp. 58-66.
8. Antipov E.V., Sozina E.M. Comparison of biological efficiency of insecticides against aphids // Modern methods and approaches in plant protection: proc. II int. scientific conf. (Ekaterinburg, November 16-18, 2020). Ekaterinburg: AMB Publishing House, 2020. pp. 22-23.
9. Blintsov A.I. [et al.]. Biological efficiency of fungicides in oak seedlings protection from powdery mildew // Proceedings of BSTU. 2011. No. 1. Forestry. pp. 216-218.
10. Palapin AV, Sopin RS Methodology of experimental studies to determine the qualitative performance indicators of an ultra-low-volume fan sprayer // Science, education, youth: development horizons. Coll. proc. Nat. sci.-pract. conf. Kerch: Publishing house of FSBEI HE "Kerch State Marine Technological University", 2021. pp. 42-47.
11. Markevich AE, Nemirovets Yu.N. Fundamentals of the effective use of pesticides: A handbook of questions and answers on the mechanization and quality control of pesticide application in agriculture. Gorki: Mogilev State Educational Center for Training, Advanced Training, Retraining of Personnel, Consulting, and Agrarian Reform. 2004. 60 p.
12. Klochkov A., Novitsky P. Practical Aspects of the Effective Use of Pesticides // Agriculture and Plant Protection. 2015. No. 4. pp. 53-59.
13. Kapustin A.N. Fundamentals of the Theory and Calculation of Machines for Primary and Surface Tillage, Seeding Machines, and Fertilizer Application Machines: A Lecture Course. Yurginsky Technological Institute. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2013. 134 p.
14. Cieniawska B., Pentos K. Average Degree of Coverage and Coverage Unevenness Coefficient as Parameters for Spraying Quality Assessment // Agriculture. 2021. No. 11. P. 151. 14 pp.
15. Tarasenko S.A., Doroshkevich E.I., Tarasenko N.I. Assignments for educational practice in plant physiology and biochemistry for students of the agronomy faculty of the correspondence course (specialty 1-74 02 01 "Agronomy". Grodno: GSU, 2012. 8 p.
16. Dmitriev N.N., Khusnidinov Sh.K. Methodology for accelerated determination of the leaf surface area of agricultural crops using computer technology // Bulletin of KrasSAU. 2016. No. 7. pp. 88-93.

17. Aerosols in agriculture. [Electronic resource]. - Access mode: <https://mehanik-ua.ru/sbornik-statej/1270-aerozoli-v-selskom-khozyajstve.html> (date of access: 6.08.2025).
18. Udartseva O.V. Study of various technologies for applying pesticides used in the Altai Territory // Fundamental Research. 2011. No. 8-1. Pp. 185-187.
19. Goryachkina I.N. [et al.]. Laboratory studies of aerosol dispersion for mechanized treatment of plants // Bulletin of RSATU. 2022. Vol. 14, No. 3. Pp. 85-93.
20. Teterin V.S., Gapeeva N.N., Panferov N.S. Method of aerosol treatment of row crops // Bulletin of RSATU. 2020. No. 1. Pp. 100-106.
21. Fedorenko V.F., Aristov E.G., Krakhovetsky N.N. Environmental aspects of optimizing the use of plant protection products // Agroengineering. 2022. Vol. 24, No. 1. P. 4-11
22. Matoba Y., J. Ohnishi, M. Matsuo. A simulation of insecticides in indoor aerosol space spraying // Chemosphere. 1993. No. 26. P. 1167-1186
23. Perol. [Electronic resource]. - Access mode: <https://biohimfarm.ru/protivoparazitarnie/perol/> (accessed: 6.08.2025).
24. Total Solutions Barren Aerosol. [Electronic resource]. - Access mode: <https://gemplers.com/products/total-solutions-barren-aerosol> (accessed: 6.08.2025).
25. Total Solutions Triple Treat Foaming Selective Herbicide Spray. [Electronic resource]. - Access mode: <https://gemplers.com/products/total-solutions-triple-treat-foaming-selective-herbicide-spray> (accessed 08/06/2025).
26. Erdniev L.P., Kuzyanov D.A., Gusev Yu.S., Mikerov, A.N. "Problematic issues of using unmanned aerial vehicles in agriculture" // Tractors and agricultural machinery. 2024. Vol. 91, No. 5. pp. 513-521.
27. Zhou, M. [et al]. "Design and evaluation of the target spray platform" // Int. J. Adv. Robotic Systems. 2021. No. 2. pp. 1-17.
28. See & Spray Technology™. [Electronic resource]. - Available at: https://extension.msstate.edu/sites/default/files/publications/publications/P3904_web.pdf. (Accessed: August 6, 2025).
29. Oryctes. High Precision Agriculture Spraying. [Electronic resource]. - Available at: <https://www.aonic.com/my/oryctes/>. - Accessed: February 8, 2023. (Accessed: August 6, 2025).
30. You Can Now Buy Your Own Spray Painting Drone. Courtesy of KATSU. [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.pinterest.com/pin/382031980877054180/>. (Accessed: August 6, 2025).

Информация об авторах

Н.К. Толочко – доктор физико-математических наук, профессор; Н.Н. Романюк – кандидат технических наук, доцент; В.Н. Еднач – кандидат технических наук, доцент; А.И. Попов – кандидат педагогических наук, доцент; С.М. Ведищев – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

N. Tolochko – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor; N. Romanyuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; V. Ednach – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; A. Popov - Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor; S. Vedishchev - Doctor of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 11.12.2025

Принята к публикации (Accepted): 14.03.2026