

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ  
И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МУЛЬТИКОПТЕРОВ-ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ**

**Н. К. Толочко<sup>1</sup>, Н. Н. Романюк<sup>2</sup>, В. Н. Еднач<sup>2</sup>, А. И. Попов<sup>3</sup>**

*Кафедры: «Технологии и организация технического сервиса» (1),  
«Механика материалов и детали машин» (2),  
УО «Белорусский государственный аграрный технический  
университет», Минск, Республика Беларусь;  
кафедра «Техника и технологии производства нанопроductов» (3),  
olimp\_porov@mail.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов Россия*

**Ключевые слова:** мультикоптеры-опрыскиватели; пестициды; сельскохозяйственное машиностроение; струя распыла; точечное и сплошное опрыскивание; форсунка.

**Аннотация:** Показано, что обработка полей пестицидами (гербицидами, инсектицидами, фунгицидами) обеспечивает повышение урожайности растениеводства АПК. Предприятия сельскохозяйственного машиностроения предлагают различные конструкции мультикоптеров-опрыскивателей. Сформулированы критерии оценки эффективности опрыскивания с помощью мультикоптеров.

Исследованы конструкции мультикоптеров для сплошного и точечного опрыскивания, предложены конструктивные решения для расширения круга выполняемых оборудованием задач при точечном опрыскивании. Рассмотрены процессы точечного и сплошного опрыскивания. Исследовано влияние воздушных потоков, создаваемых пропеллерами мультикоптера, на формирование струи распыла. Проанализированы особенности распыления эмульсий и указано на перспективность использования ультразвуковых форсунок. Обоснована необходимость учета скоростных и высотных режимов работы мультикоптера для повышения эффективности обработки растений пестицидами. Определены рекомендации по выбору оптимальных режимов эксплуатации мультикоптеров-опрыскивателей в различных условиях.

---

**Введение**

В последние годы в сельском хозяйстве все большее распространение получают беспилотные летательные аппараты (дроны). Среди них особое внимание уделяется мультикоптерам-опрыскивателям, способным обеспечивать высокоэффективную обработку полей жидкофазными пестицидами, в том числе гербицидами, инсектицидами, фунгицидами, служащими для борьбы, соответственно, с сорняками, насекомыми-вредителями, грибковыми и другими заболеваниями растений.

Обработка полей пестицидами способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Однако пестициды используются весьма неэффективно, значительная их часть в процессе опрыскивания не попадает на подлежащие обработке растения, а оседает на почву, сносится воздушными потоками за пределы обрабатываемых участков, испаряется. Это приводит не только к их бесполезному расходу, но и загрязнению ими и продуктами распада окружающей среды.

Рациональное использование пестицидов в процессе опрыскивания можно обеспечить с помощью мультикоптеров-опрыскивателей, потенциал которых до сих пор до конца не исчерпан. В частности, особого внимания заслуживают возможности их применения для реализации процессов точечного опрыскивания, предусматривающего внесение строго дозированных порций пестицидов только на определенные участки полей и, более того, в ряде случаев, на строго определенных участках растений. Такое избирательное внесение пестицидов в узко ограниченные места называется локальным или точечным опрыскиванием (в отличие от сплошного).

В данной статье кратко рассматриваются возможные пути решения проблем рационального использования пестицидов, связанные с совершенствованием конструкции и условий эксплуатации мультикоптеров-опрыскивателей, в том числе направленные на реализацию процессов точечного опрыскивания.

### Критерии оценки эффективности опрыскивания

Оценка эффективности процесса опрыскивания растений пестицидами с помощью мультикоптеров проводится на основе следующих критериев:

– локализации опрыскивания

$$E_{\text{л}} = V_{\text{л}} / V_{\text{о}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{л}}$  – объем рабочей жидкости, осажженной на растения, подлежащие пестицидной обработке;  $V_{\text{о}}$  – общий объем распыленной рабочей жидкости;

– оценки достижения рабочей жидкостью целевых участков поверхности растений (верхнего, среднего или нижнего ярусов стеблестоя, стеблей или листьев, верхней или нижней сторон листьев; у деревьев – ствола, кроны, грунта под деревом)

$$E_{\text{д}} = V_{\text{д}} / V_{\text{л}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{д}}$  – объем рабочей жидкости, осажженной на участки поверхности растений, подлежащие пестицидной обработке;

– оценки эффективности действия пестицидов определенного вида на обработанные растения (в общем случае)

$$E_{\text{в}} = (N - N_{*}) / N, \quad (3)$$

где  $N$  и  $N_{*}$  – количественные характеристики состояния обрабатываемых объектов до и после обработки соответственно.

В частности, можно выделить разновидности этого критерия применительно к оценке действия:

– гербицидов

$$E_{\text{в(г)}} = (N_{\text{г}} - N_{\text{г}*}) / N_{\text{г}},$$

где  $N_{\text{г}}$  и  $N_{\text{г}*}$  – число сорняков до и после гербицидной обработки соответственно;

– инсектицидов

$$E_{\text{в(и)}} = (N_{\text{и}} - N_{\text{и}*}) / N,$$

где  $N_{\text{и}}$  и  $N_{\text{и}*}$  – число насекомых-вредителей до и после инсектицидной обработки соответственно;

– фунгицидов

$$E_{в(ф)} = (N_{ф} - N_{ф*}) / N_{ф} ,$$

где  $N_{ф}$  и  $N_{ф*}$  – число больных растений до и после фунгицидной обработки соответственно.

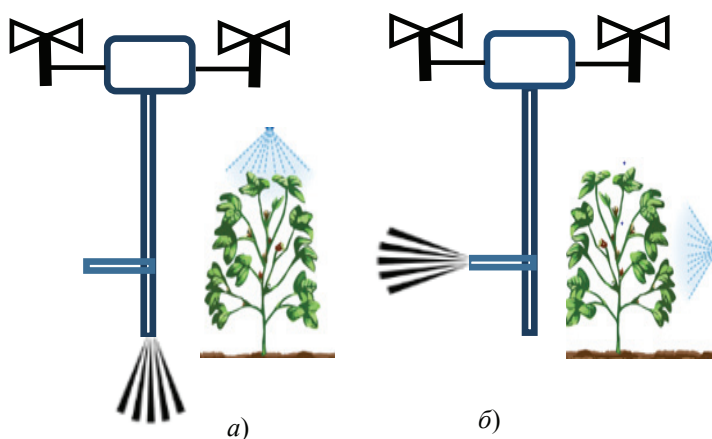
Значения критериев  $E_{л}$  и  $E_{д}$  зависят от особенностей конструкции и условий эксплуатации мультикоптеров-опрыскивателей. Ими оценивается точечный характер опрыскивания. Значение критерия  $E_{в}$  зависит от состава и, соответственно, биологической активности конкретного вида распыляемого пестицида, количества и характера его осаждения на конкретных участках поверхности, подвергнутой обработке.

### Конструкции мультикоптеров-опрыскивателей

Большинство современных видов мультикоптеров-опрыскивателей имеет типовую конструкцию, содержащую несколько форсунок, размещенных на концах горизонтальных лучей рамы непосредственно под пропеллерами (рис. 1, *а*) [1]. В некоторых их видах форсунки размещаются на горизонтальной штанге, установленной в нижней части под баком с рабочей жидкостью (рис. 1, *в*) [2]. Такие мультикоптеры обычно применяются для сплошного опрыскивания, поскольку формируют широкую (в несколько метров) полосу распыления рабочей жидкости. Точечное опрыскивание осуществляется мультикоптерами особой конструкции, отличающейся наличием только одной форсунки, которая размещается непосредственно под баком с рабочей жидкостью (рис. 1, *б*) или устанавливается на нижнем конце вертикальной распылительной телескопической штанги, закрепленной на раме (рис. 1, *з*, форсунка показана на отдельной вставке) [3]. Используя такие мультикоптеры, можно проводить опрыскивание с разной степенью локализации (критерий  $E_{л}$  (1)): путем перемещения мультикоптера вдоль линий расположения отстоящих друг от друга растений, подлежащих обработке, при постоянно включенной форсунке, так что непрерывно выходящая струя распыла попадает



Рис. 1. Мультикоптеры-опрыскиватели, применяемые для сплошного (*а*, *в*) и точечного (*б*, *з*) опрыскивания



**Рис. 2.** Схема мультикоптера-опрыскивателя с вертикальной распылительной штангой, снабженной двумя автономно включающимися форсунками с соплами, ориентированными вниз и в сторону и предназначенными для опрыскивания соответственно верхнего (а) и нижнего (б) ярусов растения

как на растения, так и участки почвы между ними (линейное опрыскивание), либо при включении форсунки только лишь над отдельно расположенными растениями (точечное опрыскивание). Особенно перспективно применять такие мультикоптеры для гербицидной обработки сорняков, распределенных по полю небольшими разрозненными участками, когда точечный характер опрыскивания позволяет снизить опасность попадания гербицидов на сельскохозяйственные культуры. Наибольший эффект такой обработки достигается, если мультикоптер оснащен автоматизированной системой управления, позволяющей непосредственно в полете выявлять сорняки и селективно их опрыскивать, то есть работать по так называемой технологии see-and-spray («видеть и распылять»).

Мультикоптеры, оснащенные вертикальной распылительной штангой, на которой устанавливается форсунка, позволяют значительно расширить круг выполняемых задач по точечному опрыскиванию в результате совершенствования своей конструкции и порядка работы. Так, размещая на штанге не одну, а две автономно включающиеся форсунки с разной ориентацией сопел, так что из одного сопла струя распыла направляется вертикально вниз, а из другого – горизонтально в сторону, можно обеспечить опрыскивание разных ярусов растений (рис. 2). При этом с учетом высоты расположения опрыскиваемых ярусов можно регулировать высоту подъема мультикоптера. Кроме того, ориентируя сопло так, чтобы струя распыла была направлена под углом вверх, можно обеспечивать инсектицидную обработку нижней стороны листьев, где обычно скапливаются вредители.

### Процессы опрыскивания

Качество обработки растений в процессе опрыскивания оценивается степенью покрытия  $C$ , численно равной массе рабочей жидкости, осажженной на единицу площади обрабатываемой (опрыскиваемой) поверхности:

$$C = m / S, \quad (4)$$

где  $m$  – масса рабочей жидкости, осажженной на обрабатываемую поверхность растения, кг;  $S$  – площадь обрабатываемой поверхности,  $m^2$  [4].

В случае сплошного опрыскивания, когда мультикоптер летит над всем полем на постоянной высоте и с постоянной скоростью и в течение всего полета непрерывно распыляет рабочую жидкость, формулу (4) можно представить в следующем виде:

$$C = Q/(vb), \quad (5)$$

где  $Q$  – массовый расход рабочей жидкости в процессе опрыскивания (масса жидкости, выливаемой из бака в единицу времени), кг/с;  $v$  – скорость полета мультикоптера, м/с;  $b$  – ширина распыла, м.

Анализ формулы (5) позволяет сделать определенные заключения относительно выбора возможных скоростных режимов полета мультикоптера, осуществляющего сплошное опрыскивание [4]. С увеличением скорости полета  $v$  увеличивается площадь обрабатываемой поверхности  $S$ . Поэтому, если ставится цель максимально увеличить  $S$ , то  $v$  также следует увеличивать. Однако при этом уменьшается  $C$ . Это означает, что при постоянном расходе  $Q$ , скорость полета  $v$  можно увеличивать не беспрельдно, а только до тех пор, пока  $C$  не уменьшится до некоторого порога, необходимого для достижения требуемого эффекта пестицидной обработки. Для сохранения заданной степени покрытия  $C$  в течение всего процесса опрыскивания следует одновременно увеличивать и  $v$  и  $Q$ .

В случае точечного опрыскивания режимы процесса опрыскивания радикально изменяются: поскольку обработке подлежит не все поле, а только его отдельные, разрозненные участки, то регулировка значений  $v$  и  $Q$  становится принципиально необходимой лишь при пролете мультикоптера над этими участками. Поскольку размеры участков часто бывают довольно малы, то для того чтобы обеспечивать заданную степень их покрытия  $C$  и при этом не допускать попадания рабочей жидкости за их пределы, желательно, чтобы мультикоптер, опрыскивая эти участки, пролетал над ними с довольно малой скоростью или же находился над ними в состоянии зависания, то есть при  $v = 0$ . При этом полет мультикоптера за пределами данных участков, когда опрыскивание не проводится, может идти с любыми значениями  $v$ , в том числе довольно большими.

При рассмотрении скоростных режимов полета мультикоптера предполагалось, что высота его полета  $h$  является постоянной. Между тем ее изменение может оказывать значительное влияние на степень покрытия  $C$ . Данное обстоятельство следует учитывать при обосновании выбора возможных высотных режимов полета мультикоптера [4].

Будем считать, что струя распыла имеет коническую форму, так что площадь поверхности, находящейся в зоне действия струи, определяется как

$$S = \pi h^2 \operatorname{tg}^2(\alpha/2), \quad (6)$$

где  $\alpha$  – угол распыла.

С учетом (6) формулу (4) можно представить в следующем виде:

$$C = \frac{m}{\pi h^2 \operatorname{tg}^2(\alpha/2)}. \quad (7)$$

Согласно (6) с увеличением высоты полета  $h$  увеличивается площадь обрабатываемой поверхности  $S$  (при условии, что угол распыла  $\alpha$  не изменяется). Поэтому, если ставится цель максимально увеличить  $S$ , то  $h$  также следует увеличивать. Однако при этом, согласно формуле (4), уменьшается  $C$  (при условии, что масса осаждаемой жидкости  $m$  не изменяется). Отсюда следует, что высоту полета  $h$ , как и скорость полета  $v$ , можно увеличивать не беспрельдно, а только до тех пор, пока  $C$  не уменьшится до некоторого порога, необходимого для достижения требуемого эффекта пестицидной обработки. Для сохранения заданной степени покрытия  $C$  в течение всего процесса опрыскивания следует одновременно увеличивать и  $h$  и  $Q$ .

Данное заключение в принципе справедливо для мультикоптеров, осуществляющих как сплошное, так и точечное опрыскивание. Вместе с тем в случае точечного опрыскивания следует учитывать размеры отдельных опрыскиваемых участков  $L$ , для которых должно выполняться условие  $L > D$ , где  $D$  – диаметр

площади поверхности, охватываемой струей распыла ( $D = 2\sqrt{S/\pi}$ ). В противном случае рабочая жидкость будет попадать за пределы этих участков. Отсюда, с учетом формулы (6), следует, что в процессе точечного опрыскивания мультикоптер должен находиться как можно ближе к обрабатываемой поверхности, то есть быть на малой высоте над полем. В общем случае, когда струя форсунки может направляться и вниз, и в сторону (см. рис. 2), мультикоптер следует располагать так, чтобы расстояние от сопла форсунки до обрабатываемой поверхности было, по возможности, минимальным.

Струи распыла, выходящие из сопел форсунок при опрыскивании, подвергаются воздействию нисходящих воздушных потоков, создаваемых вращающимися пропеллерами мультикоптеров. Величина такого воздействия определяется скоростью потоков и зависит от особенностей конструкции мультикоптеров [5 – 7].

Рассмотрим мультикоптеры, предназначенные для сплошного опрыскивания и содержащие несколько форсунок. Если форсунки расположены непосредственно под пропеллерами, где скорость воздушных потоков наибольшая, то, соответственно, является наибольшей и величина воздействия потоков на струи распыла (см. рис. 1, а). Если же форсунки расположены на горизонтальной штанге, установленной в нижней части мультикоптера (см. рис. 1, в), то есть находятся на удалении от пропеллеров, где скорость воздушных потоков затухает, то величина воздействия потоков также уменьшается. Иная ситуация имеет место в отношении мультикоптеров, предназначенных для точечного опрыскивания и содержащих одну форсунку. Если форсунка размещена непосредственно под баком (см. рис. 1, б), то воздействие потоков существенно ослабляется из-за удаления форсунки от пропеллеров, а также из-за экранирующей роли бака. Если же форсунка размещена на вертикальной штанге (см. рис. 1, г), то есть значительно удалена от пропеллеров, то воздействие потоков ослабляется еще более существенно.

В связи с этим представляется интересным рассмотреть закономерности влияния воздушных потоков, создаваемых вращающимися пропеллерами мультикоптеров, на формирование струи распыла в процессе опрыскивания. В случае применения мультикоптеров, предназначенных для сплошного опрыскивания, эти потоки, будучи нисходящими, способствуют ускоренному движению струи распыла вниз. Следствием повышения скорости движения капель является сокращение времени их полета от форсунки к растениям, что в свою очередь ведет к уменьшению опасности их сноса ветром, а также опасности их испарения до того, как они достигнут растений. В случае применения мультикоптеров, предназначенных для точечного опрыскивания, ускоряющее воздействие потоков на струю распыла уменьшается. Однако, поскольку точечное опрыскивание осуществляется при сравнительно малом расстоянии между форсункой и обрабатываемыми растениями и, соответственно, при сравнительно малом времени полета капель, то опасность их сноса и испарения также мала.

Применяя мультикоптеры-опрыскиватели, надо учитывать, что скорость воздушных потоков, создаваемых вращающимися пропеллерами, не является постоянной в течение всего процесса опрыскивания. По мере расходования рабочей жидкости общая масса мультикоптера уменьшается, поэтому, чтобы поддерживать требуемую высоту полета, следует снижать скорость вращения пропеллеров, что в свою очередь ведет к ослаблению воздействия идущих от них воздушных потоков на струи распыла и, как следствие, повышает опасность сноса осаждаемых капель ветром [5, 6].

Воздушные потоки, идущие от пропеллеров, оказывают наибольшее воздействие на те струи распыла, которые содержат преимущественно мелкие капли [7, 8]. Эти потоки, будучи сильно турбулентными, вызывают повышенную турбулентность мелкокапельных струй распыла, благодаря чему улучшается их проникновение к целевым участкам поверхности растений, в том числе во все ярусы стеблестоя, на нижнюю сторону листьев (критерий  $E_d$  (2)).



Следует отметить, что мелкокапельные струи распыла не только хорошо проникают к поверхности растений, но также более полно и равномерно покрывают ее, повышая тем самым эффективность воздействия пестицидов на растения (критерий  $E_v$  (3)) [8]. Причем, для обработки растений мелкокапельными струями распыла наиболее целесообразно применять мультикоптеры, предназначенные для точечного опрыскивания [9].

### Распыление эмульсий

Для опрыскивания растений используются жидкофазные пестициды в разных препаративных формах. Среди них большее распространение получили эмульсии типа масло-в-воде (МВ), в которых активный пестицидный компонент находится в масляной фазе [10]. В последние годы для распыления пестицидов в виде эмульсий все шире применяются дроны [11].

Распыление МВ-эмульсий в сравнении с распылением воды или водных растворов является более сложным процессом, который имеет свои отличительные черты и до сих пор исследован недостаточно [11]. Так, установлено, что капли эмульсии в результате распыления становятся крупнее, чем капли воды, причем размер капель эмульсии увеличивается с увеличением концентрации масла в исходной эмульсии [12 – 14]. Также выявлено, что в результате распыления эмульсии размеры капель масла становятся меньше тех, которые были в исходной эмульсии до распыления [13]. Таким образом, при распылении эмульсии происходит не только образование капель эмульсии, то есть капель воды, содержащих капли масла, но и дробление капель масла.

Важной особенностью пестицидных МВ-эмульсий является способность их капель сравнительно хорошо удерживаться на гидрофобной поверхности листьев благодаря тому, что масляная фаза может частично пропитывать поверхность, проникать в структуру листьев [10]. Поэтому, регулируя концентрацию масла в распыляемой эмульсии, а также размер капель и скорость их удара о поверхность, можно значительно улучшить их удержание на листьях, предотвращая их срыв с листьев и тем самым уменьшая загрязнение окружающей среды пестицидами.

Предполагается, что в результате распыления МВ-эмульсий образуются не только капли эмульсии, но и капли воды [14]. Такое предположение является вполне допустимым с учетом того, что концентрация исходных пестицидных МВ-эмульсий, используемых для опрыскивания, обычно довольно мала и не превышает единиц процентов [11, 15], а размеры капель масла в них не превышают единиц микрометров [10]. Поскольку, как упоминалось выше, активный пестицидный компонент находится в масляной фазе эмульсий, то в практическом отношении желательно, чтобы при распылении эмульсии возникало как можно больше эмульсионных капель. Очевидно, что для этого следует стремиться к выполнению условия  $n \geq n^*$ , где  $n$  – количество капель масла в некотором фиксированном объеме эмульсии до распыления;  $n^*$  – количество капель масла, образующихся в результате распыления этого объема эмульсии. Для выполнения данного условия необходимо увеличивать  $n$ , что можно обеспечить ультразвуковым диспергированием пестицидных эмульсий, приводящим к повышению биоактивности их пестицидных компонентов [16]. Ультразвук также применяется для мелкодисперсного распыления пестицидных эмульсий, в результате чего усиливается токсическое воздействие пестицидов на растения [17]. В связи с этим представляет интерес изучение перспектив использования ультразвуковых форсунок на мультикоптерах-опрыскивателях.

### Заключение

Рассмотрены основные направления совершенствования конструкций и условий эксплуатации мультикоптеров-опрыскивателей с целью более рационального использования пестицидов в сельском хозяйстве, прежде всего, за счет реализации процессов точечного опрыскивания.

Для повышения эффективности технического обеспечения реализации процессов точечного опрыскивания целесообразно применять мультикоптеры специальной конструкции, отличающейся наличием одиночной форсунки, устанавливаемой непосредственно под баком мультикоптера или на нижнем конце вертикальной распылительной телескопической штанги, закрепленной на раме мультикоптера. Дальнейшее совершенствование конструкции таких мультикоптеров должно быть связано в первую очередь с улучшением их функциональных характеристик.

Для повышения качества обработки растений в ходе опрыскивания, как сплошного, так и точечного, необходимо уделять особое внимание оптимизации скоростных и высотных режимов работы мультикоптеров, при которых достигается требуемая степень покрытия обрабатываемых растений пестицидами. При этом дальнейшее совершенствование процессов точечного опрыскивания должно быть связано не только с повышением локализация опрыскивания, но и обеспечением более полного и глубокого проникновения распыляемых пестицидов в труднодоступные зоны обработки растений.

Особое внимание следует уделять технике распыления, прежде всего оптимизации параметров струй распыла (направленности, скорости, конусности, плотности распределения и размеров капель), а также улучшению свойств распыляемых жидкостей, в том числе использованию их в виде мелкодисперсных эмульсий.

#### *Список литературы*

1. Дашковский, И. Робот над полем. Растущая потребность АПК в беспилотниках подталкивает ученых на разработку специализированных дронов для сельского хозяйства / И. Дашковский, И. Шивков // Агротехника и технологии. – 2017. – № 6. – С. 32 – 35.
2. Роль дронов в аграрном секторе: новые помощники фермеров. – Текст : электрон. – 2019. – URL : <https://mentamore.com/covremennye-texnologii/rol-dronov-v-agrarnom-sektore.html> (дата обращения : 08.02.2023).
3. Oryctes. High Precision Agriculture Spraying. – 2022. – URL : <https://www.aonic.com/my/oryctes/> (дата обращения : 08.02.2023).
4. Restas, A. Drone Application for Spraying Disinfection Liquid Fighting against the COVID-19 Pandemic – Examining Drone Related Parameters Influencing Effectiveness / A. Restas, I. Szalkai, G. Ovari // Drones. – 2021. – No. 5. – P. 58 – 75.
5. Berner, B. Use of Drones in Crop Protection / B. Berner, J. Chojnaski // Proc. IX Int. Sci. Symp. Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture. Poland, Lublin, 2017. – P. 46 – 51.
6. UAV Applications in Agriculture 4.0 / L. R. Do Amaral [et al.] // Rev. Ciênc. Agron. – 2020. – Vol. 51. – 15 p.
7. UAV-Spray Application in Vineyards: Flight Modes and Spray System Adjustment Effects on Canopy Deposit, Coverage, and Off-Target Losses / A. Biglia [et al.] // Sci. Total Environment. – 2022. – Vol. 845. – 17 p.
8. Effect of Droplet Size Parameters on Droplet Deposition and Drift of Aerial Spraying by Using Plant Protection UAV / S. Chen [et al.] // Agronomy. – 2020. – No. 10. – P. 195 – 201.
9. Droplet Deposition and Control of Planthoppers of Different Nozzles in Two-Stage Rice with a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle / S. Chen [et al.] // Agronomy. – 2020. – No. 10. – P. 303 – 317.
10. Dynamics of an Impacting Emulsion Droplet / M. Damak [et al.] // Sci. Adv. – 2022. – Vol. 8, No. 11. – 9 p.
11. Effect of Physical Properties of an Emulsion Pesticide on the Atomisation Process and the Spatial Distribution of Droplet Size / W. Yang [et al.] // Agriculture. – 2022. – No. 12. – P. 949 – 963.
12. The Atomization of Water-Oil Emulsions / L. Broniarz-Press [et al.] // Exp. Thermal and Fluid. Sc. – 2009. – Vol. 33, Iss. 6. – P. 955 – 962.



13. Impact of Effervescent Atomization on Oil Drop Size Distribution of Atomized Oil-in-Water Emulsions / J. Schröder [et al.] // 11th Int. Cong. Eng. Food (ICEF11). Proc. Food Sci. – 2011. – No. 1. – P. 138 – 144.

14. Experimental Study of Mist Generated from Metalworking Fluids Emulsions / D. S. Sokolovic [et al.] // Journal of Aerosol Science. – 2013. – Vol. 61. – P. 70 – 80.

15. Пат. 2380904 Российская Федерация, МПК A01N 37/00, A01N 25/04, A01P 7/04, A01P 13/00. Композиция масла для опрыскивания для применения в сельском хозяйстве / Бхатнагар П., Похрияль Н. К., Сивасуриан Н., Тивари А. К., Дешмух В. П., Кандиссериль Д. Ч., Тяджи Б. Р., Малхотра Р. К., Верма Р. П., Радже Н. Р. ; заявитель и патентообладатель Индиан Оил Корпорейшн Лимитед (In). – № 2007142933/15 ; заявл. 29.11.2005 ; опубл. 10.02.2010, Бюл. 4. – 17 с.

16. Пат. 2443111 Российская Федерация, МПК A01N 65/00, A01N 27/00. Эмульсионное средство из пихты сибирской для борьбы с болезнями, стимулирования роста и корнеобразования зерновых, овощных и декоративных культур в открытом и закрытом грунте / Морозов С. В., Черняк Е. И., Митасов М. М., Коломникова В. И., Бехтольд В. В., Орлова Е. А. ; заявитель и патентообладатель Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН. – № 2010124306/10 ; заявл. 15.06.2010 ; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6. – 13 с.

17. Верещагин, А. Л. Повышение фитотоксичности N-фосфонометилглицина при ультразвуковом распылении со сверхмалыми дозами органических кислот / А. Л. Верещагин, Ю. И. Захарьева, В. Н. Хмелев // XII Междунар. конф.-семинар молодых специалистов по микро- и нанотехнологиям и электронным устройствам EDM-2011. – Бийск, АлтГТУ, 2011. – 3 с.

---

## Improvement of Designs and Optimization of Operation Modes of Multicopter-Sprayers

N. K. Tolochko<sup>1</sup>, N. N. Romanyuk<sup>2</sup>, V. N. Ednach<sup>2</sup>, A. I. Popov<sup>3</sup>

*Departments: Technologies and Management of Technical Service (1),  
Mechanics of Materials and Machine Parts (2),*

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus;*

*Department of Equipment and Technology for the Nanoproducts Manufacturing (3),  
olimp\_popov@mail.ru, TSTU, Tambov Russia*

**Keywords:** multicopter sprayers; pesticides; agricultural engineering; spray jet; spot and continuous spraying; nozzle.

**Abstract:** It is shown that the treatment of fields with pesticides (herbicides, insecticides, fungicides) provides an increase in the yield of crop production in the agro-industrial complex. Agricultural engineering enterprises offer various designs of multicopter sprayers. Criteria for evaluating the effectiveness of spraying with the help of multicopters are formulated.

The designs of multicopters for continuous and spot spraying have been studied; constructive solutions to expand the range of tasks performed by the equipment during spot spraying have been proposed. The processes of point and continuous spraying are considered. The effect of air flows generated by the propellers of the multicopter on the formation of the spray jet has been studied. The features of spraying emulsions are analyzed and the prospects of using ultrasonic nozzles are indicated. The necessity of taking into account the speed and altitude modes of operation of the multicopter to improve the efficiency of plant treatment with pesticides is substantiated. Recommendations for choosing the optimal modes of operation of multicopter sprayers in various conditions are determined.

## References

1. Dashkovskiy I., Shivkov I. [Robot over the field. The growing need of the agro-industrial complex for drones is pushing scientists to develop specialized drones for agriculture], *Agrotekhnika i tekhnologii* [Agrotechnics and technologies], 2017, no. 6, pp. 32-35. (In Russ., abstract in Eng.).
2. Available at: <https://mentamore.com/covremennye-tekhnologii/rol-dronov-v-agrarnom-sektore.html> (accessed 08 February 2023).
3. Oryctes. High Precision Agriculture Spraying. 2022. available at: <https://www.aonic.com/my/oryctes/> (accessed 08 February 2023).
4. Restas A., Szalkai I., Ovari G. Drone Application for Spraying Disinfection Liquid Fighting against the COVID-19 Pandemic – Examining Drone Related Parameters Influencing Effectiveness, *Drones*, 2021, no. 5, pp. 58-75.
5. Berner B., Chojnaski J. Use of Drones in Crop Protection, *Proc. IX Int. Sci. Symp. Farm Machinery and Processes Management in Sustainable Agriculture*. Poland, Lublin, 2017, pp. 46-51.
6. Amaral Do L.R. [et al.]. UAV Applications in Agriculture 4.0, *Rev. Ciênc. Agron.*, 2020, vol. 51, 15 p.
7. Biglia A. [et al.]. UAV-Spray Application in Vineyards: Flight Modes and Spray System Adjustment Effects on Canopy Deposit, Coverage, and Off-Target Losses, *Sci. Total Environment*, 2022, vol. 845, 17 p.
8. Chen S. [et al.]. Effect of Droplet Size Parameters on Droplet Deposition and Drift of Aerial Spraying by Using Plant Protection UAV, *Agronomy*, 2020, no. 10, pp. 195-201.
9. Chen S. [et al.]. Droplet Deposition and Control of Planthoppers of Different Nozzles in Two-Stage Rice with a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle, *Agronomy*, 2020, no. 10, pp. 303-317.
10. Damak M. [et al.]. Dynamics of an Impacting Emulsion Droplet, *Sci. Adv.*, 2022, vol. 8, no. 11, 9 p.
11. Yang W. [et al.]. Effect of Physical Properties of an Emulsion Pesticide on the Atomisation Process and the Spatial Distribution of Droplet Size, *Agriculture*, 2022, no. 12, pp. 949-963.
12. Broniarz-Press L. [et al.]. The Atomization of Water-Oil Emulsions, *Exp. Thermal and Fluid. Sci.*, 2009, vol. 33, iss. 6, pp. 955-962.
13. Schröder J. [et al.]. Impact of Effervescent Atomization on Oil Drop Size Distribution of Atomized Oil-in-Water Emulsions, *11th Int. Cong. Eng. Food (ICEF11). Proc. Food Sci.*, 2011, no. 1, pp. 138-144.
14. Sokolovic D.S. [et al.]. Experimental Study of Mist Generated from Metalworking Fluids Emulsions, *Journal of Aerosol Science*, 2013, vol. 61, pp. 70-80.
15. Bkhatnagar P., Pokhriyal' N. K., Sivasurian N., Tivari A.K., Deshmukh V.P., Kandisseril' D.Ch., Tyadzhi B.R., Malkhotra R.K., Verma R.P., Radzhe N.R. *Kompozitsiya masla dlya opryskivaniya dlya primeneniya v sel'skom khozyaystve* [Spray oil composition for agricultural use], Russian Federation, 2010, Pat. 2380904 (In Russ.).
16. Morozov S.V., Chernyak Ye.I., Mitasov M.M., Kolomnikova V.I., Bekhtol'd V.V., Orlova Ye.A. *Emul'sionnoye sredstvo iz pikhty sibirskoy dlya bor'by s boleznyami, stimulirovaniya rosta i korneobrazovaniya zernovykh, ovoshchnykh i dekorativnykh kul'tur v otkrytom i zakrytom grunte* [An emulsion agent from Siberian fir to fight diseases, stimulate the growth and root formation of grain, vegetable and ornamental crops in open and protected ground], Russian Federation, 2012, Pat. 2443111 (In Russ.).
17. Vereshchagin A.L., Zakhar'yeva Yu.I., Khmelev V.N. [Increasing the phytotoxicity of N-phosphonomethylglycine during ultrasonic spraying with ultra-low doses of organic acids], *XII Mezhdunar. konf.-seminar molodykh spetsialistov po mikro- i nanotekhnologiyam i elektronnyim ustroystvam EDM-2011* [XII Intern. conference-seminar of young specialists in micro- and nanotechnologies and electronic devices EDM-2011], Biysk, AltGTU, 2011, 3 p. (In Russ., abstract in Eng.).

## **Verbesserung der Konstruktionen und Optimierung der Betriebsarten der Multikopter-Sprühgeräte**

**Zusammenfassung:** Es ist gezeigt, dass die Behandlung von Feldern mit Pestiziden (Herbizide, Insektizide, Fungizide) zu einer Ertragssteigerung der Pflanzenproduktion im agroindustriellen Komplex führt. Agrartechnikunternehmen bieten Multikopter-Sprühgeräte in verschiedenen Ausführungen an. Es sind Kriterien zur Bewertung der Wirksamkeit des Sprühens mit Hilfe von Multikoptern formuliert.

Die Konstruktionen von Multikoptern für kontinuierliches und punktuell Sprühen sind untersucht und konstruktive Lösungen sind vorgeschlagen, um den Aufgabenbereich der Geräte beim punktuellen Sprühen zu erweitern. Betrachtet sind die Verfahren des punktuellen und kontinuierlichen Sprühens. Es ist der Einfluss der von den Propellern des Multikopters erzeugten Luftströme auf die Bildung des Sprühstrahls untersucht. Die Eigenschaften von Sprühemulsionen sind analysiert und die Perspektiven des Einsatzes von Ultraschalldüsen aufgezeigt. Die Notwendigkeit, die Geschwindigkeits- und Flughöhenmodi des Multikopters zu berücksichtigen, um die Effizienz der Pflanzenbehandlung mit Pestiziden zu verbessern, ist begründet. Es sind Empfehlungen zur Auswahl der optimalen Betriebsarten von Multikopter-Sprühgeräten unter verschiedenen Bedingungen ermittelt.

---

## **Perfectionnement de la conception et de l'optimisation des modes du fonctionnement des pulvérisateurs multicoptères**

**Résumé:** Est montré que le traitement des champs avec des pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) permet d'augmenter le rendement des plantes du complexe agroindustriel. Les entreprises de génie agricole proposent de différentes conceptions des pulvérisateurs multicoptères. Sont définis les critères pour évaluer l'efficacité de la pulvérisation multicoptère.

Est étudiée la conception des multicoptères pour la pulvérisation continue et ponctuelle; sont été proposes des solutions constructives pour élargir la gamme des tâches effectuées par l'équipement lors de la pulvérisation ponctuelle. Sont examinés les processus de pulvérisation ponctuelle et continue Est étudiée l'influence des flux d'air générés par les hélices multicoptères sur la formation du jet de pulvérisation. Sont analysées les caractéristiques de la pulvérisation des émulsions; est indiquée la perspective d'utiliser des atomiseurs à ultrasons Il est nécessaire de prendre en compte les modes de fonctionnement à grande vitesse et à haute altitude du multi-copteur afin d'améliorer l'efficacité du traitement des plantes par les pesticides. Sont établies les recommandations pour choisir les modes de fonctionnement optimaux des pulvérisateurs multicopters dans diverses conditions.

---

**Авторы:** *Толочко Николай Константинович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Технологии и организация технического сервиса»; *Романюк Николай Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, ректор; *Еднач Валерий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механика материалов и детали машин», УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь; *Попов Андрей Иванович* – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.