

УДК 629.735

**Н.К. Толочко, Н.Н. Романюк, В.Н. Еднач, Е.Ю. Колесниченко, И.В. Партолин, В.И. Желтухина**

## **ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПЛОДОВЫХ КУЛЬТУР ОТ ЗАМОРОЗКОВ**

**Аннотация.** Для защиты плодовых культур от весенних радиационных заморозков методами перемешивания воздуха и дымления перспективно применять дроны-мультикоптеры. В данной статье выполнен сравнительный анализ особенностей осуществления этих методов с помощью мультикоптеров, определены рациональные пути использования дронов, обеспечивающие повышение эффективности борьбы с заморозками на плодовых культурах. Основное внимание уделено выявлению закономерностей формирования нисходящего воздушного потока, создаваемого пропеллерами мультикоптера, а также роли этого потока в реализации механизмов борьбы с заморозками, присущих указанным методам. Показано, что в каждом из методов поток играет особую роль: в одном методе он воздействует на приземный слой воздуха, в другом – на дымовую завесу, причём степень этого воздействия в каждом из методов довольно различная. Установлены соотношения между высотой расположения дрона над поверхностью почвы, длиной нисходящего воздушного потока, а также высотой приземного слоя воздуха или слоя дымовой завесы, подвергаемых воздействию нисходящим воздушным потоком, при которых обеспечивается повышение эффективности борьбы с заморозками. Обсуждены практические вопросы создания дымовых завес с помощью дронов. Для создания дымовых завес с помощью дронов при реализации метода дымления предпочтительно оснащать дрон дымовыми шашками, поджигаемыми во время полета с помощью электровоспламенителей в комплекте с системами дистанционного (беспроводного) управления их работой. Предложены технические решения по оснащению дронов дымовыми шашками с последующей возможностью дистанционного ввода их в действие во время полёта дронов.

**Ключевые слова:** защита от заморозков, плодовые культуры, перемешивание воздуха, дымление, дрон, нисходящий воздушный поток.

### **USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES TO PROTECT FRUIT CROPS FROM FROST**

**Abstract.** Multicopter drones offer promising applications for protecting fruit crops from spring radiation frosts using air mixing and smoke generation methods. This article provides a comparative analysis of the implementation of these methods using multicopters and identifies rational ways to use drones to increase the effectiveness of frost control on fruit crops. The focus is on identifying the patterns of formation of the downward airflow generated by the multicopter propellers, as well as the role of this flow in implementing the frost control mechanisms inherent in these methods. It is shown that the flow plays a unique role in each method: in one method, it affects the ground air layer, while in another, it affects the smoke screen, with the degree of this effect varying significantly in each method. Relationships between the drone's height above the soil surface, the length of the downward airflow, and the height of the ground air layer or smoke screen layer exposed to the downward airflow are established, which ensure increased frost control effectiveness. Practical issues of creating smoke screens using drones were discussed. To create smoke screens using drones, using the smoke-generating method, it is preferable to equip the drone with smoke bombs ignited during flight using electric igniters, complete with remote (wireless) control systems. Technical solutions for equipping drones with smoke bombs and then remotely detonating them during flight were proposed.

**Keywords:** frost protection, fruit crops, air mixing, smoking, drone, descending air flow.

**Введение.** Плодовые культуры с наступлением весны, когда начинается цветение и образуется завязь плодов, становятся весьма чувствительными к заморозкам, т.е. к понижению температуры воздуха ниже 0 °C на фоне устойчивой положительной среднесуточной температуры. Такие заморозки, происходящие в периоды весенних кратковременных похолоданий, могут вызывать повреждение бутонов, цветков и завязей и тем самым приводить к гибели всего будущего урожая. Нередко могут быть опасными даже слабые заморозки (до -2 °C) [1].

Различают адvectionные и радиационные заморозки [2-4]. Адvectionные заморозки возникают при вторжении в регион больших масс холодного воздуха. Обычно они делятся несколько суток, охватывают обширные территории, сопровождаются облачной и ветреной погодой. Бороться с ними весьма трудно.

Радиационные заморозки бывают в ясные тихие ночи, когда земля, нагретая солнцем днём, теряет тепло путём излучения. При этом тёплый воздух поднимается, а холодный опускается, так что земная поверхность и приземный слой воздуха охлаждаются ниже 0 °C. Чаще всего такие заморозки возникают в предрассветное время (перед восходом солнца), когда земная поверхность и приземный слой воздуха охлаждаются наиболее сильно, а ветра нет или он очень слаб, благодаря чему турбулентность мала, что затрудняет перемешивание охлаждающегося приземного слоя воздуха с более тёплыми высокими слоями. Они делятся недолго (несколько часов), занимают небольшие по площади территории, легко поддаются контролю и с ними активно борются.

Для борьбы с радиационными заморозками применяют метод перемешивания воздуха и метод дымления. В первом методе тёплый воздух с верхних слоёв принудительно перемещают к охлаждённой земле с помощью ветровых машин и, в меньшей мере, вертолётов, которые используют ограниченно из-за опасности ночных полётов на малых высотах и большой стоимости эксплуатации. Во втором методе создают дымовую завесу, задерживающую тепловое излучение земной поверхности. При сильныхочных заморозках дымление проводят как ночью, так и утром, после восхода солнца, когда дымовая завеса, закрывая растения от прямых солнечных лучей, способствует более медленному и равномерному оттаиванию подмерзших за ночь тканей растений и тем самым уменьшает степень их повреждения. Обычно дымовая завеса создаётся сжиганием дымовых куч или дымовых шашек и стелется у самой поверхности земли.

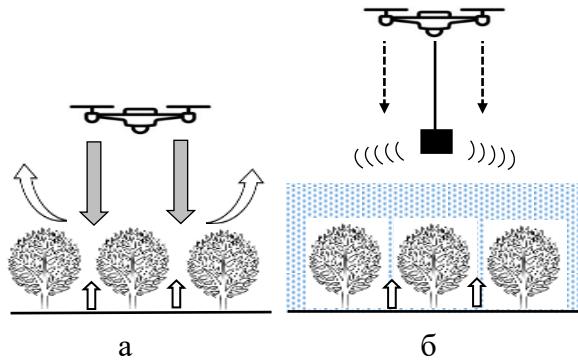
В последние годы для борьбы с радиационными заморозками применяют беспилотные летательные аппараты (дроны), в основном мультикоптеры. В методе перемешивания воздуха мультикоптер, поднимаясь над плодовыми культурами, создаёт нисходящие воздушные потоки, благодаря чему верхние тёплые слои воздуха перемещаются вниз, вытесняя приземные холодные слои [4]. В методе дымления мультикоптер, оснащенный дымовыми шашками, поднимаясь над плодовыми

ми культурами, создает дымовую завесу, которая под действием нисходящих воздушных потоков, идущих от мультикоптера, простирается вниз, постепенно закрывая от холодного воздуха полог растений (корону деревьев или кустарников) [6].

В данной статье проанализированы особенности использования мультикоптеров для защиты плодовых культур от радиационных заморозков методами перемешивания воздуха и дымления, рассмотрены пути повышения эффективности борьбы с заморозками с помощью дронов. Главное внимание уделено закономерностям формирования нисходящего воздушного потока, идущего от мультикоптера, и его роли в изменении температурного состояния приземного слоя воздуха в рамках реализации указанных методов борьбы с заморозками. Также обсуждены практические вопросы создания дымовых завес с помощью дронов.

**Особенности применения дронов в борьбе с заморозками.** При использовании мультикоптера для защиты плодовых культур от радиационных заморозков методом перемешивания воздуха или методом дымления нисходящий воздушный поток, создаваемый мультикоптером, играет в каждом методе разную роль: в первом методе он служит для интенсивного перемешивания воздуха в приземном слое и потому должен быть довольно сильным, во втором методе он призван обеспечивать распространение дымовой завесы в пределах приземного слоя и потому должен быть, наоборот, слабым, не способным чрезмерно перемешивать воздух и, как следствие, рассеивать дым. Эти различия в роли нисходящего воздушного потока поясняются схемами его воздействия на приземный слой воздуха, показанными на рисунке 1.

Для повышения эффективности воздействия нисходящего воздушного потока, создаваемого дроном, на приземный слой воздуха, следует подобрать высоту расположения дрона над землей с учетом характера изменения скорости потока по мере удаления от дрона, т.е. по мере приближения к земле, а также с учётом характера распределения температуры по высоте в приземном слое воздуха, прежде всего в той его части, где наблюдается инверсия температуры, так чтобы обеспечить требуемый теплообмен и тем самым реализацию механизмов защиты растений от заморозков, присущих методу перемешивания воздуха или методу дымления.



а – метод перемешивания воздуха (тёмные стрелки – сильный поток теплого воздуха, нагнетаемый дроном, светлые стрелки – поток холодного воздуха, вытесняемого из приземного слоя); б – метод дымления (пунктирные стрелки – слабый поток теплого воздуха, идущий от дрона и обеспечивающий смешение вниз дымовой завесы, создаваемой дымовой шашкой, закрепленной на дроне)

**Рис. 1 – Схемы воздействия нисходящего воздушного потока, созданного мультикоптером, на приземный слой воздуха в разных методах борьбы с радиационными заморозками**

**Создание нисходящего воздушного потока.** При использовании мультикоптера для защиты плодовых культур от заморозков методами перемешивания воздуха или дымления следует учитывать такие параметры нисходящего воздушного потока, создаваемого дроном, как размеры потока и распределение скоростей потока, поскольку этими параметрами в основном определяется то, как влияет поток на приземный слой воздуха или дымовую завесу.

В последние годы опубликован ряд исследований свойств нисходящего воздушного потока, созданного мультикоптером. Эти исследования проводили методами вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics, CFD), позволяющими моделировать динамическое поведение воздушного потока, а также путём постановки экспериментов, в том числе с помощью серийно выпускаемых дронов, включая квадрокоптеры Matrice 300, Mavic 3E, Elios 3 [7, 8], F450 [9, 10, 11], Pinexri 20 [12]; гексакоптеры Harvest-1 [13, 14], JF01-10 (с шестью пропеллерами, установленными попарно на трёх двигателях) [15]; октокоптер Foxtech D130 X8 (с восемью пропеллерами, установленными попарно на четырёх двигателях) [16, 17] и др.

Большинство экспериментов проводили в лабораторных условиях, в том числе на специально разработанных испытательных стенах [10, 16, 18]. Скоростные параметры воздушного потока, идущего от дрона, измеряли анемометрами [5, 7, 13] или лидарами [17]. Границы воздушного потока определяли путём его дымовой визуализации [6]. Также для определения границ воздушного потока использовали оригинальный метод визуализации потока с помощью множества легких пенополистирольных шариков, подвешенных на нитях и рассредоточенных в воздушном пространстве под дроном [9]. При этом о расположении границ потока судили по состояниям шариков (движению или покою) внутри потока и за его пределами, которые фиксировали видеокамерой.

Отдельного внимания заслуживают эксперименты с дронами-опрыскивателями, в которых с целью исследования свойств нисходящего воздушного потока анализировали картину пространственного распределения капель распыленной жидкости, для чего использовали лазерный анализатор размера аэрозольных частиц [13]; готовили набор мерных чашек, распределённых по сечению потока, в которые собирали оседавшие капли с последующим определением их относительного объёма в каждой чашке [9]; визуализировали поток капель путём добавления в распыляемую жидкость красителя [18] или флуоресцентных трассеров, подвергавшихся ультрафиолетовому освещению [19].

Согласно результатам опубликованных исследований, включая CFD-моделирование и эксперименты, нисходящие воздушные потоки, создаваемые мультикоптерами, характеризуются типовыми скоростными параметрами, что обусловлено типовой структурой потока.

Ниже в качестве примера рассмотрены результаты CFD-моделирования распределения скоростей в объеме нисходящего воздушного потока, идущего от квадрокоптера F450 [9]. Каждый пропеллер квадрокоптера создавал одиничный поток, который развивался наиболее интенсивно непосредственно вблизи пропеллера. На уровне 0,2 м ниже пропеллера скорость каждого одиничного потока вдоль оси вращения пропеллера составляла 5 м/с и постепенно уменьшалась к периферии; между осями вращения пропеллеров, т.е. под центром дрона образовывалась область потока с низкой скоростью. Поперечное сечение общего потока, создаваемого четырьмя пропеллерами дрона, представляло собой по форме «четырехточечную модель», при этом значения скорости по сечению общего потока изменялись в интервале от 5 м/с до 1 м/с. На уровне 0,6 м ниже пропеллера у каждого одиничного потока скорость вдоль оси вращения пропеллера уменьшалась до 3 м/с, в то время как поперечное сечение расширялось, так что одиничные потоки начинали сливаться в сплошной. Как следствие, поперечное сечение общего потока дрона приобретало форму квадрата с округленными углами, при этом значения скорости по сечению общего потока изменялись в интервале от 3 м/с до 1 м/с. С переходом на уровень 1,2 м ниже плоскости размещения пропеллеров общий сплошной поток дрона продолжал расширяться, все сильнее вовлекая в себя одиничные потоки. В результате поперечное сечение общего потока становилось все более овальным, а скорость распределялась по сечению потока все более однородно, становясь в центральной части сечения равной 2 м/с и уменьшаясь к периферии до 1 м/с. Наконец, на уровнях 1,8 м и далее 2 м ниже плоскости размещения пропеллеров скорость общего сплошного потока дрона уменьшалась до 1 м/с, выравниваясь по всему поперечному сечению потока, а сам поток, продолжая расширяться, окончательно приобретал овальную форму.

Представленные выше значения скоростей нисходящего воздушного потока, создаваемого дроном, и соответствующие им расстояния от плоскости размещения пропеллеров в направлении распространения потока связаны определённой функциональной зависимостью, с учетом которой можно сделать заключение о том, что скорость потока на уровне 2,5 м ниже плоскости размещения пропеллеров будет менее 0,5 м/с, а на уровне 3,0 м ниже пропеллера будет близка к нулю. Таким образом, длина потока, т.е. расстояние в направлении распространения потока от плоскости размещения пропеллеров, где поток берет начало, до нижней части потока, где он почти полностью затухает,  $L_{\text{п}} \approx 3$  м.

Учет длины  $L_{\text{п}}$  нисходящего воздушного потока позволяет непосредственно решать задачи подбора требуемой высоты  $H_{\text{д}}$  полета (зависания) дрона над земной поверхностью при выполнении работ по борьбе с заморозками методами перемешивания воздуха или дымления. Так, варьируя  $H_{\text{д}}$ , можно регулировать степень воздействия потока на приземный слой воздуха высотой  $H_{\text{пв}}$  в методе перемешивания воздуха или на слой дымовой завесы высотой  $H_{\text{дз}}$  в методе дымления, как показано на рис. 2.

В методе перемешивания воздуха поток, создаваемый дроном, оказывает турбулизующее воздействие на приземный слой воздуха, если

$$H_{\text{д}} < (L_{\text{п}} + H_{\text{пв}}) \quad (1)$$

(рис. 2, а), и, наоборот, не оказывает никакого воздействия, если

$$H_{\text{д}} > (L_{\text{п}} + H_{\text{пв}}) \quad (2)$$

(рис. 2, б).

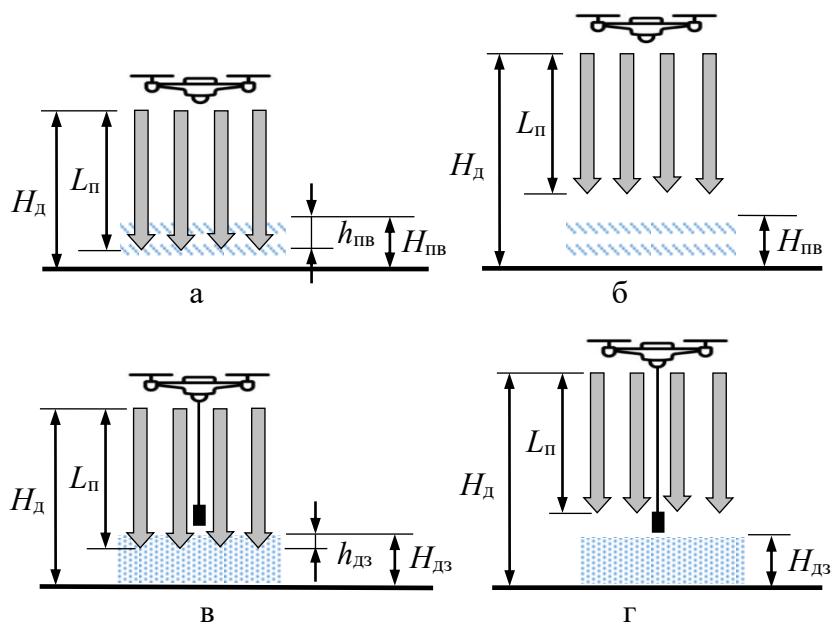
Аналогично, в методе дымления поток, создаваемый дроном, оказывает смещающее воздействие на слой дымовой завесы, если

$$H_{\text{д}} < (L_{\text{п}} + H_{\text{дз}}) \quad (3)$$

(рис. 2, в), и, наоборот, не оказывает никакого воздействия, если

$$H_{\text{д}} > (L_{\text{п}} + H_{\text{дз}}) \quad (4)$$

(рис. 2, г).



**Рис. 2 – Условия воздействия нисходящего воздушного потока, создаваемого дроном, на приземный слой воздуха в методе перемешивания воздуха (а, б) и на слой дымовой завесы в методе дымления (в, г)**

Степень воздействия нисходящего воздушного потока на приземный слой воздуха или на слой дымовой завесы тем больше, чем большие глубина проникновения потока, соответственно, в приземный слой воздуха  $h_{nv}$  или в слой дымовой завесы  $h_{dz}$ , где

$$h_{nv} = H_{nv} - (H_d - L_n) \quad (5)$$

и

$$h_{dz} = H_{dz} - (H_d - L_n). \quad (6)$$

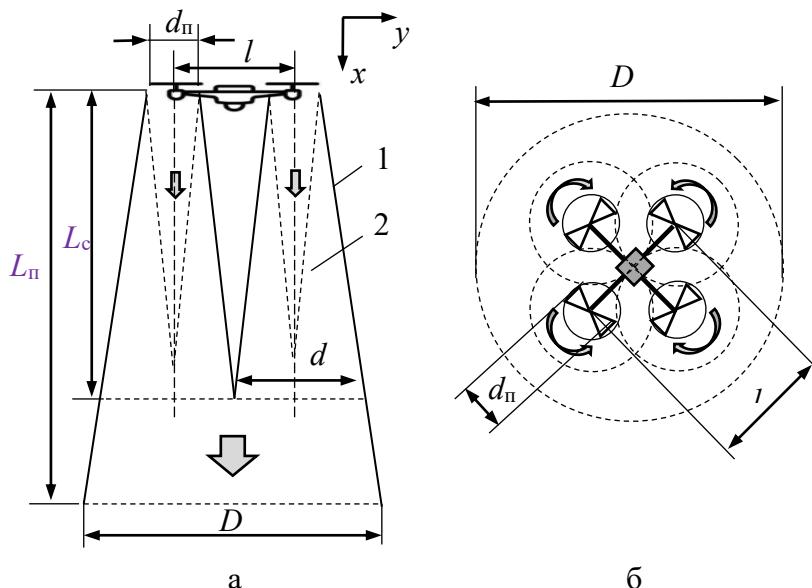
Это обусловлено тем, что с увеличением  $h_{nv}$  и  $h_{dz}$ , во-первых, более значительная часть объема приземного слоя воздуха или слоя дымовой завесы подвергается непосредственному воздействию со стороны потока и, во-вторых, более скользкие части потока принимают участие в этом воздействии.

В методе перемешивания воздуха нисходящий воздушный поток должен оказывать сильное турбулизующее воздействие на приземный слой воздуха, в то время как в методе дымления – слабое смещающее воздействие на слой дымовой завесы, поэтому должно выполняться соотношение

$$(h_{nv}/H_{nv}) \gg (h_{dz}/H_{dz}). \quad (7)$$

Итак, длина  $L_n$  нисходящего воздушного потока, создаваемого мультикоптером, является важным параметром потока, который следует учитывать при подборе высоты полета (захисания) мультикоптера в ходе выполнения работ по борьбе с заморозками. Численное значение этого параметра может быть установлено в результате CFD-моделирования или натурных экспериментов в рамках исследований свойств потока, однако проведение таких исследований является довольно длительным и дорогостоящим [7, 20]. Кроме того, при проведении таких исследований возникают проблемы методологического характера, обусловленные сложностью и недостаточной изученностью структуры нисходящего воздушного потока.

Типичная схема формирования нисходящего воздушного потока, создаваемого квадрокоптером, показана на рис. 3. От всех четырех пропеллеров квадрокоптера развиваются в отдельности одиночные потоки типа затопленных струй. В исходном сечении каждой струи с диаметром, равным диаметру пропеллера  $d_n$ , профиль скоростей близок к равномерному. В начале развития струи сохраняется ядро постоянных скоростей, диаметр которого линейно уменьшается от  $d_n$  до нуля. За пределами ядра скорость струи закономерно уменьшается по сечению (в направлении  $y$ ) и по длине (в направлении  $x$ ), что обусловлено вовлечением струй воздуха из окружающей среды, вследствие чего одиночный поток по мере распространения не только тормозится, но и расширяется, увеличиваясь в диаметре  $d$ . Окружающий воздух захватывается всеми одиночными потоками, а затем и общим сплошным потоком, образующимся в результате слияния одиночных потоков на расстоянии  $L_c$  от плоскости размещения пропеллеров, что ведет к дальнейшему торможению и расширению потока. Развитие потока полностью прекращается, т.е. его скорость становится равной нулю на расстоянии  $L_n$  от плоскости размещения пропеллеров, которое соответствует длине потока. При этом диаметр потока достигает значения  $D$ . На всем своем протяжении поток подвергается закручиванию, которое вызывается врачающимися пропеллерами. Наиболее сильно закручиваются одиночные потоки, причем в смежных одиночных потоках направления закрутки противоположны (по часовой и против часовой стрелки) в соответствии с направлениями вращения пропеллеров. По мере слияния одиночных потоков процессы закручивания охватывают весь общий поток.



а – вид сбоку, б – вид сверху; 1 – граница одиночных потоков (затопленных струй) и общего потока, 2 – граница ядра затопленной струи, 3 – направление закручивания струи; стрелками указаны направления распространения и закручивания одиночных потоков, а также направление распространения общего потока

**Рис. 3 – Схема формирования нисходящего воздушного потока, создаваемого квадрокоптером**

В нисходящем воздушном потоке, идущем от мультикоптера, в результате захвата окружающего воздуха развивается турбулентность, проявляющаяся в образовании многочисленных вихрей, из-за чего распределение скоростей в потоке приобретает флюктуирующий характер. Вихреобразованию способствует закручивание потока. Таким образом, в потоке в ходе его развития формируется сложная турбулентная структура, которая не поддается строгому математическому описанию или экспериментальному обоснованию [21]. С учётом данных обстоятельств при проведении исследований нисходящего воздушного потока ввиду высокой степени его турбулентности рассматриваются не мгновенные, усредненные значения скорости потока [7].

Турбулизующее действие нисходящего воздушного потока, создаваемого мультикоптером, на приземный слой воздуха усиливается с увеличением глубины проникновения потока в приземный слой воздуха  $h_{\text{пв}}$ , т.е. с уменьшением высоты  $H_d$  расположения дрона над земной поверхностью – согласно (5) при условии, что высота  $H_{\text{пв}}$  приземного слоя воздуха и длина  $L_n$  нисходящего воздушного потока имеют фиксированные значения, а поток распространяется в свободном пространстве, не ограниченном преградами. Однако при значительном сближении дрона с землей, когда начинает выполняться соотношение  $H_d < L_n$ , земля становится преградой для потока и поток вступает во взаимодействие с ней, в результате чего резко усиливается турбулизация потока (имеет место так называемый «эффект земли») [10].

Особый интерес представляют исследования особенностей взаимодействия нисходящего воздушного потока, создаваемого дроном, с пологом растений, который у разных видов растений может иметь различные характеристики. Например, полог томатов образован редко расположенными листьями малых размеров, так что воздушный поток проходит сквозь него почти беспрепятственно, в то время как полог риса является довольно плотным и поэтому, подобно земле, играет роль преграды для потока, вызывая его турбулизацию [22]. Исследование турбулизации нисходящего воздушного потока, идущего от дрона, находящегося вблизи полога растений, интересны для практики опрыскивания растений жидкими химикатами, поскольку параметры потока существенно влияют на характер движения капель распыляемой жидкости, в частности, более высокая турбулентность потока способствует проникновению капель в полог растений [19] и осаждению их на нижней стороне листьев [15].

Нисходящий воздушный поток, идущий от мультикоптера, способен вызывать трепет листьев, т.е. их непрерывное колебательное движение. Причины этого явления связаны с турбулентностью потока, в частности, с его закручиванием, из-за чего поток, нисходя по спиральной траектории, порождает перепад давления между верхней и нижней поверхностями листа растения, генерируя крутящий момент на листе, что и приводит к его колебанию [26].

Трепет листьев вызывается нисходящим воздушным потоком при условии  $H_d < L_n$ . Регистрируя визуально момент начала трепета листьев под действием потока в ходе снижения высоты расположения дрона, можно определять длину потока по формуле

$$L_n = H_{d(0)} - H_{\text{пв}}, \quad (7)$$

где  $H_{d(0)}$  – высота расположения дрона над земной поверхностью в момент начала трепета листьев,  $H_{\text{пв}}$  – высота полога растений (или же высота кроны отдельно стоящих деревьев и кустарников). Такой способ определения значения  $L_n$  является технически простым и может применяться в естественных условиях при защите плодовых культур от заморозков методами перемешивания воздуха или дымления.

Подобным образом можно определять длину потока, регистрируя момент начала колебаний травы. Если трава низкорослая и ее высотой можно пренебречь, то длина потока оказывается приблизительно равной высоте расположения дрона ( $L_n \approx H_{d(0)}$ ).

Явление трепета листьев под действием нисходящего воздушного потока, идущего от мультикоптера, подобно явлению локального волнения на спокойной водной поверхности. Такое волнение наблюдалось на водной глади озера, над кото-

рым зависал на разной высоте  $H_d$  квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK [12]. При  $H_d = 15l$ , где  $l$  – колесная база квадрокоптера (расстояние между осями противоположно установленных пропеллеров), нисходящий поток не достигает водной поверхности и, соответственно, не оказывает на нее возмущающего воздействия. При  $H_d = 7l$  на водной поверхности видна четкая зона волнения, соответствующая воздействию общего нисходящего потока, которая при  $H_d = 4l$  трансформируется в четыре отдельные зоны, соответствующие воздействию одиночных потоков.

**Создание дымовой завесы.** Для создания дымовой завесы при борьбе с заморозками методом дымления применяют дымовые шашки, которые размещают на мультикоптерах. Следует заметить, что на сегодняшний день накоплен немалый опыт применения дронов для создания дымовых завес в самых разных целях, в том числе для разгона незаконных массовых собраний и демонстраций, для подавления преступников, скрывающихся в зданиях, для уничтожения вредителей на сельскохозяйственных угодьях, для организации праздничных мероприятий и т.д. В последние годы дроны все больше применяют для создания дымовых завес в военных целях – для скрытия живой силы и техники от вражеских атак, для ослепления огневых точек врага с целью затруднения ему наблюдения и ведения прицельного огня. Учет этого опыта может быть полезен и в борьбе с заморозками.

Различают два способа ввода в действие дымовых шашек для создания дымовых завес с помощью дронов: в первом способе дымовые шашки сбрасывают с дронов, после чего они поджигаются, во втором – дымовые шашки находятся на дронах и в момент поджигания, и все дальнейшее время до полного сгорания.

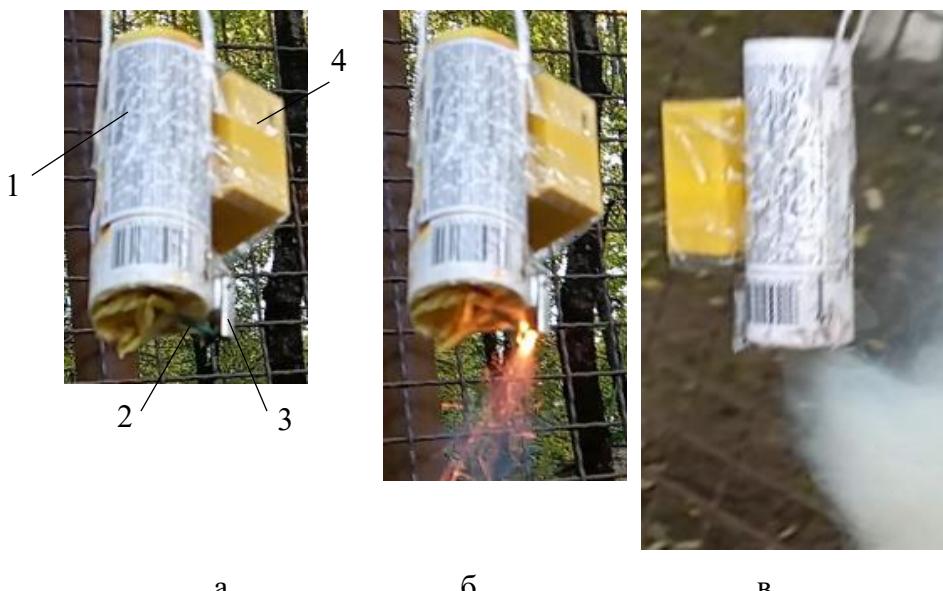
Для реализации первого способа дроны оснащают системамиброса дымовых шашек, которые содержат кассеты с несколькими (обычно шестью-восемью) шашками [24]. Сброс шашек осуществляют как в автоматическом режиме, по заранее созданному полетному заданию, так и в ручном режиме с помощью команды принудительногоброса. Недостатком этого способа является ограниченная площадь задымления, а также действие дымовых завес только над поверхностью почвы, в то время как у цветущих плодовых растений, которые нужно защитить от весенних заморозков, листва может быть на значительной высоте над землей.

Более эффективен второй способ [6]. В результате его реализации создается мобильная сплошная дымовая завеса, характер распространения которой определяется направлением движения дрона относительно ветра. В частности, движение дрона в ветреную погоду под углом 90° к направлению ветра способствует повышению дальности распространения дыма, созданию дымовой завесы в виде сплошной полосы дыма. В этом способе дрон движется непосредственно над задымляемым объектом на определенной высоте с учетом скорости осаждения дыма на объект за счет сил гравитации, а также с учетом работы пропеллеров дрона.

Многие виды шашек вводятся в действие вручную. Для этого в них встраивается запальная спичка, которую поджигают чирканьем теркой по ее головке, либо легковоспламеняющийся фитиль, который поджигают от пламени обычной спички или зажигалки. При использовании шашек такого типа совместно с дронами сначала устанавливают шашку на дроне, затем поджигают ее вручную, после чего дрон с дымящейся шашкой запускают в полет [25]. При защите растений от заморозков более эффективно оснащать дроны шашками, поджигаемыми во время полета дрона с помощью электровоспламенителей в комплекте с системами дистанционного (беспроводного) управления их работой (включением/выключением) [26]. Эти системы могут быть автономными или сопряженными с бортовыми системами управления дронами.

Различают электровоспламенители электроспирального и электроразрядного типов. В первом случае фитиль поджигается от проволоки, раскаленной пропусканием через нее электрического тока (проводка сворачивается в спираль, внутри которой помещается конец фитиля). Во втором случае фитиль поджигается от электрического разряда, возникающего между электродами (конец фитиля располагается в межэлектродном зазоре).

В Белорусском государственном аграрном техническом университете (БГАТУ) в рамках изучения перспектив применения дронов в сельском хозяйстве разработаны различные варианты экспериментальных образцов электровоспламенителей и систем дистанционного управления их работой, с помощью которых осуществляли ввод в действие дымовых шашек. На рисунке 4 показаны в качестве примера разные стадии проводившихся в БГАТУ испытаний дымовой шашки.



а – шашка в исходном состоянии, б – шашка в момент поджигания, в – шашка во время дымления; 1 – шашка, 2 – фитиль, 3 – электроразрядный электровоспламенитель, 4 – система дистанционного управления электровоспламенителем

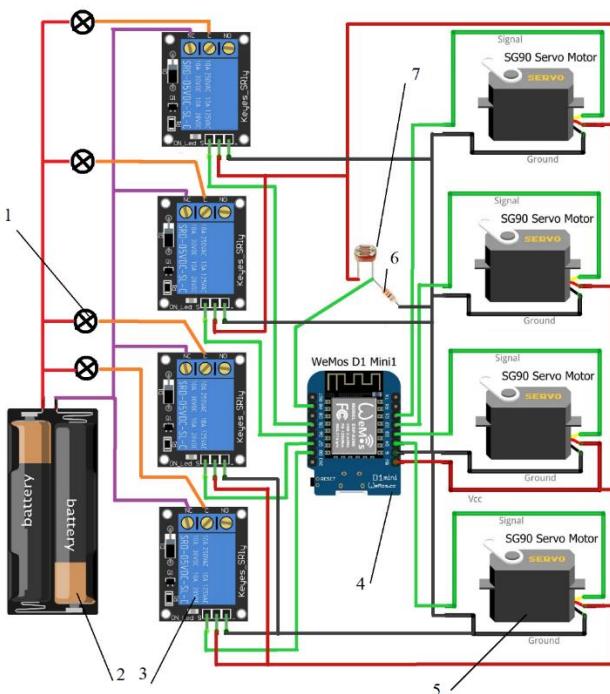
Рис. 4 – Испытания дымовой шашки

С целью универсализации навесного оборудования для разных типов дронов предлагается схема управления оборудованием, показанная на рис. 5. Особенность этой схемы состоит в том, что она включается или отключается с помощью штатной светодиодной подсветки дрона. Как правило, такими подсветками оснащаются разные типы серийно выпускаемых дронов, благодаря чему становится возможным устанавливать навесное оборудование на дронах без специального сопряжения его работы со штатными бортовыми системами управления дронов.

Функционирование компонентов навесного оборудования осуществляется контроллером ESP8266, установленным на плате WeMos D1 Mini, позиция 4. Работа контроллера программируется, так что перед вылетом дрона может включаться один из двух сценариев создания дымовых завес, описанных выше.

В первом сценарии дымовая шашка зажигается и сбрасывается дроном в заданную точку. Оборудование работает в следующей последовательности: оператор с пульта включает штатную подсветку дрона, фоторезистор 6 подает сигнал на контроллер 4 и срабатывает реле 3, после чего от батареи 2 подается напряжение на зажигательный элемент 1, который поджигает фитиль дымовой шашки, после чего оператор выключает штатную подсветку. Когда он включает ее снова, повторный сигнал от фоторезистора 7 идет на контроллер, который подает питание на сервопривод 5, что приводит к сбросу дымовой шашки.

Требуемая последовательность работы всех элементов схемы управления навесным оборудованием обеспечивается специальной программой, загружаемой в контроллер. Реле и сервоприводы подключены попарно, так чтобы, когда отработала первая пара, последующие сигналы оператора вначале включали зажигательный элемент, а затем сервопривод второй пары и т.д. Контроллер, реле и сервоприводы запитаны через кабель от дрона напряжением 5 В, а зажигательный элемент – от дополнительной батареи 1.

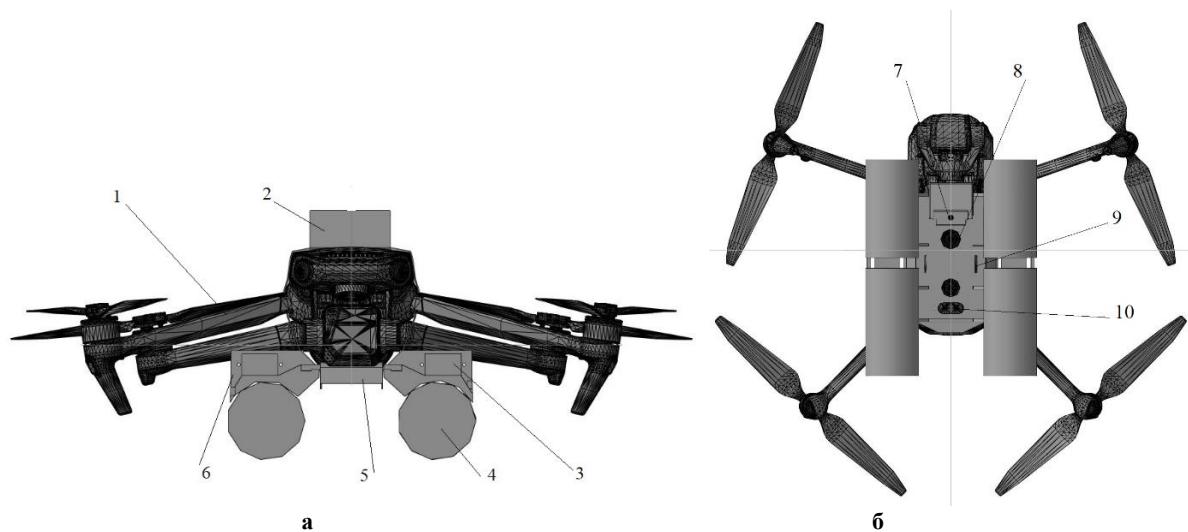


1 – зажигательный элемент, 2 – батарея, 3 – реле, 4 – контроллер, 5 – сервопривод, 6, 7 – фоторезисторы

**Рис. 5 – Схема управления навесным оборудованием**

Во втором сценарии дрон может двигаться по заданной траектории, проводя окуривание растений, и сбрасывать шашку после ее сгорания. При необходимости сгоревшие шашки можно не сбрасывать, для чего следует отключить сервоприводы.

Разработанная схема навесного оборудования представлена на рисунке 6.



а – вид дрона спереди, б – вид дрона снизу,  
1 – дрон, 2 – блок реле, 3 – механизм сброса, 4 – дымовая шашка, 5 – контроллер, 6 – система подвеса, 7 – датчик включения света, 8 – система нижнего обзора, 9 – крепление боковой обвязки к дрону, 10 – система нижних инфракрасных датчиков

**Рис. 6 – Схема навесного оборудования, смонтированного на дроне**

Учитывая большое количество задач, разработанное навесное оборудование представляет собой ряд отдельных блоков и может быть легко установлено или снято. Так, на дрон 1 оборудование крепится путем боковой обвязки 9 (хомутом) вне рабочих узлов дрона, в верней части закреплен блок реле 2, в нижней системе подвеса 6. На системе подвеса расположен механизм сброса 3 с четырьмя сервоприводами и дымовыми шашками 4, контроллер 5 с датчиком включения света 7. Для стабильной работы дрона в системе подвеса есть отверстия для системы нижнего обзора 8 и системы нижних инфракрасных датчиков 10.

Для обеспечения качественной работы дрона масса навесного оборудования должна распределяться симметрично относительно центра тяжести дрона.

На рисунках 5 и 6 представлены в качестве примера схемы, рассчитанные на работу с четырьмя дымовыми шашками. При необходимости количество дымовых шашек может быть изменено (уменьшено или увеличено), но для этого в контроллер должны быть прописаны сценарии с поджиганием и сбрасыванием соответствующего количества шашек.

**Заключение.** Эффективность защиты плодовых культур от радиационных заморозков методами перемешивания воздуха или дымления может быть существенно повышенена благодаря применению дронов-мультикоптеров. При реализации каждого из этих методов с использованием дронов особая роль отводится нисходящему воздушному потоку, создаваемому пропеллерами дрона, причем для каждого метода эта роль оказывается различной: в одном методе поток должен оказывать сильное возмущающее воздействие на приземный слой воздуха, в другом – слабое смещающее воздействие на слой дымовой завесы. На основе анализа особенностей формирования нисходящего воздушного потока установлены рациональные условия применения дронов для каждого из этих методов с учетом определенных соотношений таких параметров, как высота расположения дрона над землей; длина нисходящего воздушного потока, создаваемого дроном; высота приземного слоя воздуха или слоя дымовой завесы, подвергаемых воздействию со стороны нисходящего воздушного потока. Для создания дымовых завес с помощью дронов при реализации метода дымления предпочтительно оснащать дрон дымовыми шашками, поджигаемыми во время полета с помощью электровоспламенителей в комплекте с системами дистанционного (беспроводного) управления их работой.

#### Библиография

- Медведев М.А., Крюков А.Н. Проблемы и пути развития интенсивного садоводства в Белгородской области // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы VI Международной студенческой научной конференции, Майский, 13–15 марта 2024 года. – Майский : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 78–79.
- Юрин А.Н., Кострома С.П., Викторович В.В. Обзор и анализ известных способов защиты плодовых деревьев от заморозков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2022. – № 55. – С. 75–81.
- Tadic V. Agricultural engineering technologies in the control of frost damage in permanent plantations // AgriEngineering 2023, 5, 2079-2111. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040128>.
- Абшаев А.М., Малкаров Х.Ж. Оптимизация методов защиты от радиационных заморозков // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2008. – № 1. – С. 115–121.
- Qiao B. [et al]. Effects of airflow disturbance from a multi-rotor unmanned aerial vehicle on fruit tree frost protection // Biosystems Engineering. – 2024. – Vol. 241. – P. 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.001>.
- Патент № 2 683 730 РФ. Способ борьбы с весенними заморозками в садах. Авторы: Хабаров М. Ю., Колесова Н. Г. Опубл. 01.04.2019.
- Bauersfeld L. [et al]. Robotics meets Fluid Dynamics: A characterization of the induced airflow below a quadrotor as a turbulent jet // IEEE Robotics and automation letters. Preprint version. Accepted Dec. – 2024. – P. 1–8.
- Медведев М.А., Крюков А.Н. Эффективность использования БПЛА для внесения пестицидов в промышленном садоводстве и питомниководстве // Наука и молодёжь: актуальные вопросы и пути инновационного развития АПК : Материалы национальной научно-практической студенческой конференции «Наука и молодёжь: актуальные вопросы и пути инновационного развития АПК», посвященной 95-летию заслуженного агронома Российской Федерации Н.Р. Асыки, Майский, 24 сентября 2024 года. – Майский : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 208.

9. Liu Z. [et al]. Study on the characteristics of downwash field range and consistency of spray deposition of agricultural UAVs. *Agriculture*. 2024, 14, 931. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060931>.
10. Luo Y. [et al]. Numerical simulation and analysis of a ducted-fan drone hovering in confined environments // *Advances in Aerodynamics*. 2024, 6:18. <https://doi.org/10.1186/s42774-024-00179-z>.
11. Палий А.О., Линков С.А. Перспективы применения БПЛА в АПК России // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы VI Международной студенческой научной конференции, Майский, 13–15 марта 2024 года. – Майский : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 101–102.
12. Fung K.V., Marwah O.M.F., Saleh S.J.M.M., Rahim M.Z. Airflow behavior of quadcopter fertilizer drone for pineapple plantation by using CFD // *Journal of Complex Flow*. – 2022. – Vol. 4. – № 2. – P. 6–12.
13. Wang B., Zhang Y., Wang C., Teng G. Droplet deposition distribution prediction method for a six-rotor plant protection UAV based on inverse distance weighting. *Sensors*. 2022, 22, 7425. <https://doi.org/10.3390/s22197425>.
14. Палий А.О., Линков С.А. Применение БПЛА при расчёте объёма кагатов сахарной свёклы // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы VII Международной студенческой научной конференции, Майский, 25–27 февраля 2025 года. – Майский : ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2025. – С. 122.
15. Zheng Y. The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV // *Front. Agr. Sci. Eng.* – 2018. – Vol. 5. – № 2. – P. 159–167. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018216>.
16. Flem A.A. [et al]. Experimental characterization of propeller-induced flow (PIF) below a multi-rotor UAV // *Atmosphere*. 2024, 15, 242. <https://doi.org/10.3390/atmos15030242>.
17. Jin L. [et al]. Rotary-wing drone-induced flow-Comparison of simulations with lidar measurements // *Atmos. Meas. Tech.* – 2024. – Vol.17. – P. 2721–2737. <https://doi.org/10.5194/amt-17-2721-2024>.
18. Raparelli T., Ivanov A., Eula G. Pesticide spraying systems for vineyards using drones // *Int. J. Mech.&Control*. – 2024. – Vol. 25. – № 2. – P. 53–60. <https://doi.org/10.69076/jomac.2024.0028>.
19. Yang S. [et al]. CFD models and verification of the downwash airflow of an eight-rotor UAV // 2019 ASABE Ann. Int. Meeting, Boston, Massachusetts, July 7-10, 2019. Paper No: 1901018. <https://doi.org/10.13031/aim.20 1901018>.
20. Hu X., Liu J., Yang F., Yuan M. Application of CFD numerical simulation methods in the field of UAV research // ICMTAE-2022. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2457. 2023. doi:10.1088/1742-6596/2457/1/012046.
21. Сугак Е.В., Сугак А.В. Моделирование турбулентных закрученных потоков [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8312> (дата обращения: 11.04.2025).
22. Shi Q. [et al]. The Airflow Field Characteristics of UAV Flight in a Greenhouse // *Agriculture*. – 2021. – № 11. – P. 634. – <https://doi.org/10.3390/agriculture11070634>.
23. Wang Q. [et al]. Research on UAV Downwash Airflow and Wind-Induced Response Characteristics of Rapeseed Seeding Stage Based on Computational Fluid Dynamics Simulation // *Agriculture*. – 2024. – № 14. – P. 1326. – <https://doi.org/10.3390/agriculture14081326>.
24. Drone smoke grenades tear gas launcher system for DJI Matrice 600 Pro [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.uavfordrone.com/product/drone-smoke-bomb-tear-gas-launcher-system/> (дата обращения: 11.04.2025).
25. Crazy smoke torches and drones [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.google.com/search?q=drones+smoke+bomb&oq=drones+smoke+bomb&g> (дата обращения: 16.04.2025).
26. Пиротехнический пульт 4 канала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pirosklad.by/shop/dlya-pirotehnika/pirotehnicheskij-pult-4-kanala/> (дата обращения: 16.04.2025).

### References

1. Medvedev M.A., Kryukov A.N. Problems and ways of development of intensive horticulture in the Belgorod region // Gorin readings. Innovative solutions for agriculture: Proceedings of the VI International Student Scientific Conference, Maysky, March 13-15, 2024. – Maisky : Belgorod State Agrarian University, 2024. – Pp. 78–79.
2. Yurin A.N., Kostroma S.P., Viktorovich V.V. Obzor i analiz izvestnyh sposobov zashity plodovyh dereviev ot zamorozkov // Mehanizaciya i elektrifikaciya selskogo hozyajstva. – 2022. – № 55. – S. 75–81.
3. Tadic V. Agricultural engineering technologies in the control of frost damage in permanent plantations // *AgriEngineering* 2023, 5, 2079-2111. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5040128>.
4. Abshaev A.M., Malkarov H.Zh. Optimizaciya metodov zashity ot radiacionnyh za-morozkov // *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskij region. Estestvennye nauki*. – 2008. – № 1. – S. 115–121.
5. Qiao B. [et al]. Effects of airflow disturbance from a multi-rotor unmanned aerial vehicle on fruit tree frost protection // *Biosystems Engineering*. – 2024. – Vol. 241. – P. 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.001>.
6. Patent № 2 683 730 RF. Sposob borby s vesennimi zamorozkami v sadah. Avtory: Habarov M. Yu., Kolesova N. G. Opubl. 01.04.2019.
7. Bauersfeld L. [et al]. Robotics meets Fluid Dynamics: A characterization of the induced airflow below a quadrotor as a turbulent jet // *IEEE Robotics and automation letters*. Preprint version. Accepted Dec, 2024. P. 1–8.
8. Medvedev M.A., Kryukov A.N. The Effectiveness of Using UAVs for Applying Pesticides in Industrial Horticulture and Nurseries // *Science and Youth: Current Issues and Ways of Innovative Development in the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Student Conference «Science and Youth: Current Issues and Ways of Innovative Development in the Agro-Industrial Complex»*, dedicated to the 95th Anniversary of N.R. Asyka, Honored Agronomist of the Russian Federation, Maisky, September 24, 2024. – May : Belgorod State Agrarian University, 2024. – P. 208.
9. Liu Z. [et al]. Study on the characteristics of downwash field range and consistency of spray deposition of agricultural UAVs. *Agriculture*. 2024, 14, 931. <https://doi.org/10.3390/agriculture14060931>.
10. Luo Y. [et al]. Numerical simulation and analysis of a ducted-fan drone hovering in confined environments // *Advances in Aerodynamics*. 2024, 6:18. <https://doi.org/10.1186/s42774-024-00179-z>.
11. Палий А.О., Linkov S.A. Prospects for the Use of UAVs in the Russian Agro-Industrial Complex // Gorinsky Readings. Innovative Solutions for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the VI International Student Scientific Conference, Maisky, March 13–15, 2024. – Maisky : Belgorod State Agrarian University, 2024. – Pp. 101–102.

12. Fung K.V., Marwah O.M.F., Saleh S.J.M.M., Rahim M.Z. Airflow behavior of quadcopter fertilizer drone for pineapple plantation by using CFD // Journal of Complex Flow. 2022, Vol. 4. № 2. P. 6–12.
13. Wang B., Zhang Y., Wang C., Teng G. Droplet deposition distribution prediction method for a six-rotor plant protection UAV based on inverse distance weighting. Sensors. 2022, 22, 7425. <https://doi.org/10.3390/s22197425>.
14. Palyi A.O., Linkov S.A. Application of UAVs in calculating the volume of sugar beet kagats // Gorinsky Readings. Innovative Solutions for the AIC: Proceedings of the VII International Student Scientific Conference, Maisky, February 25–27, 2025. – Maisky : Belgorod State Agrarian University, 2025. – P. 122.
15. Zheng Y. The computational fluid dynamic modeling of downwash flow field for a six-rotor UAV // Front. Agr. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 5. – № 2. – P. 159–167. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2018216>.
16. Flem A.A. [et al]. Experimental characterization of propeller-induced flow (PIF) below a multi-rotor UAV // Atmosphere. 2024, 15, 242. <https://doi.org/10.3390/atmos15030242>.
17. Jin L. [et al]. Rotary-wing drone-induced flow – Comparison of simulations with lidar measurements // Atmos. Meas. Tech. – 2024. – Vol.17. – P. 2721–2737. – <https://doi.org/10.5194/amt-17-2721-2024>.
18. Raparelli T., Ivanov A., Eula G. Pesticide spraying systems for vineyards using drones // Int. J. Mech.&Control. – 2024. – Vol. 25. – № 2. – P. 53–60. – <https://doi.org/10.69076/jomac.2024.0028>.
19. Yang S. [et al]. CFD models and verification of the downwash airflow of an eight-rotor UAV // 2019 ASABE Ann. Int. Meeting, Boston, Massachusetts, July 7-10, 2019. Paper №: 1901018. <https://doi.org/10.13031/aim.20 1901018>.
20. Hu X., Liu J., Yang F., Yuan M. Application of CFD numerical simulation methods in the field of UAV research // ICMTAE-2022. J. Phys.: Conf. Ser. 2457. 2023. doi:10.1088/1742-6596/2457/1/012046.
21. Sugak E.V., Sugak A.V. Modelirovaniye turbulentnykh zakruchennykh potokov [Elektronniy resurs] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2013. – № 1. – Rejim dostupa: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=8312> (data obrashcheniya: 11.04.2025).
22. Shi Q. [et al]. The Airflow Field Characteristics of UAV Flight in a Greenhouse // Agriculture 2021, 11, 634. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070634>.
23. Wang, Q. [et al]. Research on UAV Downwash Airflow and Wind-Induced Response Characteristics of Rapeseed Seeding Stage Based on Computational Fluid Dynamics Simulation // Agriculture 2024, 14, 1326. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081326>.
24. Drone smoke grenades tear gas launcher system for DJI Matrice 600 Pro [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupa: <https://www.uavfordrone.com/product/drone-smoke-bomb-tear-gas-launcher-system/> (data obrashcheniya: 11.04.2025).
25. Crazy smoke torches and drones [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupa: <https://www.google.com/search?q=drones+smoke+bomb&oq=drones+smoke+bomb&g> (data obrashcheniya: 16.04.2025).
26. Pirotehnicheskii pult 4 kanala [Elektronniy resurs]. – Rejim dostupa: <https://pirosklad.by/shop/dlya-pirotehnikov/pirotehnicheskij-pult-4-kanala/> (data obrashcheniya: 16.04.2025).

#### Сведения об авторах

Толочко Николай Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технологий и организации технического сервиса, УО Белорусский государственный аграрный технический университет, просп. Независимости, 92/2, г. Минск, Беларусь, 220023, тел. +375-44-5572518, e-mail: n.tolochko1951@mail.ru;

Романюк Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ректор УО Белорусский государственный аграрный технический университет, просп. Независимости, 92/2, г. Минск, Беларусь, 220023, тел. + 375 44 776-26-63, e-mail: romanuk-nik@tut.by;

Еднач Валерий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, декан факультета «Технический сервис в АПК», УО Белорусский государственный аграрный технический университет, просп. Независимости, 92/2, г. Минск, Беларусь, 220023, тел. +375 29 310-31-94, e-mail: valeryednatch@yandex.by;

Колесниченко Елена Юрьевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, ул. Вавилова, д. 1, п. Майский, Белгородский район, Белгородская обл., Россия, 308503, тел. +79511425596, e-mail: kolesnichenko\_ej@belgau.ru;

Партолин Иван Васильевич, кандидат биологических наук, доцент, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, тел. +79040828964, e-mail: piv2004@rambler.ru;

Желтухина Валентина Ивановна, кандидат биологических наук, доцент, доцент агрономического факультета, ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, тел. +79517619137, e-mail: zheltuhina\_vii@belgau.ru.

#### Information about authors

Tolochko Nikolay Konstantinovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technologies and Organization of Technical Service, Educational Institution Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti Ave., 92/2, Minsk, Belarus, 220023, tel. +375-44-5572518, e-mail: n.tolochko1951@mail.ru;

Romanuk Nikolay Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Rector, Educational Institution Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti Ave., 92/2, Minsk, Belarus, 220023, Tel. + 375 44 776-26-63, e-mail: romanuk-nik@tut.by;

Yednach Valery Nikolaevich, PhD in Engineering, Associate Professor, Dean of the Faculty of Technical Service in the Agro-Industrial Complex, Educational Institution Belarusian State Agrarian Technical University, Nezavisimosti Ave., 92/2, Minsk, Belarus, 220023, tel. +375 29 310-31-94, e-mail: valeryednatch@yandex.by;

Kolesnichenko Elena Yuryevna, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Faculty of Agronomy, Belgorod State Agrarian University, 1 Vavilova St., Maysky settlement, Belgorod region, Russia, 308503, tel. +79511425596, e-mail: kolesnichenko\_ej@belgau.ru;

Partolin Ivan Vasilievich, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Faculty of Agronomy, Belgorod State Agrarian University, tel. +79040828964, e-mail: piv2004@rambler.ru;

Zheltuhina Valentina Ivanovna, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Faculty of Agronomy, Belgorod State Agrarian University, tel. +79517619137, zheltuhina\_vii@belgau.ru.