

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК: 631.348.45

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-27-36>**Концепция применения адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного одноопорного опрыскивателя***И.А. Дембовский¹, С.А. Родимцев²*¹ Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; Орел, Россия² Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева; Орел, Россия¹ emilyenn@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>² rodimcew@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>

Аннотация. Малогабаритный опрыскиватель при вертикальных колебаниях распределительной штанги без сложных копирующих и компенсационных устройств не обеспечивает качественное опрыскивание. Для первичного семеноводства требуется разработка новых подходов к обеспечению равномерности распределения средств защиты растений (СЗР). С этой целью предложена и теоретически обоснована концепция применения адаптивной распределительной системы малогабаритного штангового опрыскивателя. Представлены полевые эксперименты с использованием одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа. Приведено теоретическое описание условий выполнения операции опрыскивания применительно к нарушению схемы распределения рабочей жидкости. Произведена оптимизация значений текущих фронтальных углов факела распыла. Установлено, что средний размах вертикальных колебаний штанги одноопорного опрыскивателя тачечного типа составляет от 16 до 29°. Выдвинута гипотеза о повышении равномерности распределения СЗР путем управления геометрией факела распыла и предложена конструкция мультирежимного дефлекторного распылителя. Найдены аналитические зависимости влияния геометрических параметров опрыскивателя и угла его поперечного наклона на формируемую распылителем ширину обрабатываемой полосы и требуемый угол факела распыла. Разработаны номограмма и операционный график режимов работы распылителей адаптивной распределительной системы опрыскивателя. При базовом угле распыла 110° допустимые пределы ширины полосы обработки одним распылителем при нижнем наклоне штанги обеспечиваются углом распыла 85°, при верхнем – углом 135...145°. Использование оригинального уравнивающего устройства позволяет снизить размах вертикальных колебаний штанги до 14°. Разность значений коэффициента вариации поперечного распределения рабочей жидкости при типовом и адаптивном ориентировании плоскостей факела распыла в модельном эксперименте составила 9,5%. Выдвинутая гипотеза подтверждена.

Ключевые слова: опрыскиватель, малогабаритный опрыскиватель, распределительная штанга, факел распыла, угол факела распыла, распылитель

Для цитирования: Дембовский И.А., Родимцев С.А. Концепция применения адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного селекционного опрыскивателя // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 3. С. 27-36. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-27-36>

ORIGINAL PAPER

Application concept of an adaptive boom distribution system for a small-size single-leg sprayer*I.A. Dembovskiy¹, S.A. Rodimtsev²*¹ Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Orel, Russia² Orel State University named after I.S. Turgenev; Orel, Russia¹ emilyenn@rambler.ru; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>² rodimcew@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>

Abstract. A small-size sprayer with vertical oscillations of the distributor boom without complex copying and compensating devices does not provide quality spraying. Primary seed production requires the development of new approaches to ensure the spreading accuracy of plant protection products (PPP). For this purpose the concept of application of adaptive distribution system of a small-size boom sprayer is proposed and theoretically

substantiated. Field experiments with the use of a single-axis boom sprayer of the wheelbarrow type were carried out. The theoretical description of conditions of fulfillment of the spraying operation in relation to violation of the scheme of distribution of working liquid is given. Optimization of values of current frontal angles of the spraying torch is carried out. It has been established that the average range of vertical vibrations of the boom of a single-legged sprayer, like a wheelbarrow, ranges from 16° to 29°. A hypothesis has been proposed to increase the uniformity of distribution of liquid preparations. This is achieved by controlling the geometry of the spray pattern. Analytical dependences of the influence of the geometric parameters of the sprayer and the angle of its transverse inclination on the formed width of the processed strip and the required spray pattern angle were found. A nomogram and operational schedule of sprayer operating modes for the adaptive sprayer distribution system have been developed. With a base spray angle of 110°, the permissible limits for the width of the processing strip; with a lower tilt of the boom, a spray angle of 85° is provided, and with an upper tilt, 135 to 145°. The use of the original balancing device reduces the vertical boom oscillation range up to 14°. The difference in the values of the coefficient of variation of the transverse distribution of the working fluid, at typical and adaptive orientation of the planes of the spray-cone angle in the model experiment was 9.5%. The proposed hypothesis is confirmed.

Keywords: field sprayer, small-size sprayer, distribution boom, spray cone, spray-cone angle, sprayer

For citation: Dembovskiy I.A., Rodimtsev S.A. Application concept of an adaptive boom distribution system for a small-size single-leg sprayer. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(3):27-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-3-27-36>

Введение

Повышение урожайности, сокращение затрат на производство сельхозпродукции и снижение ее потерь во многом обеспечиваются использованием средств защиты растений (СЗР), различных стимуляторов роста и удобрений. Борьба с возбудителями и болезнями растений способствует увеличению урожайности культур в 1,5...2,0 раза [1]. Мировой рынок химических препаратов для защиты растений будет расти, к 2027 г. достигнет 94,4 млрд долл.¹, и в обозримой перспективе преимущественное использование пестицидов и удобрений останется безальтернативным.

При операции опрыскивания лишь 10...80% препарата попадает на объект² защиты [2], до 40% СЗР распределяется по обрабатываемой поверхности крайне неравномерно [2]. В реальных производственных условиях коэффициент вариации распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги даже при правильно подобранных распылителях, отсутствии износа и технически исправных базовых узлах опрыскивателя способен превышать более 50% [3] (при нормативе до 25% для малообъемного и обычного опрыскивания³).

¹ Global chemical distribution market forecast 2024-2032. Information from the Inkwoodresearch service. URL: <https://inkwoodresearch.com/reports/chemical-distribution-market/> (дата обращения: 08.04.2024).

² Опрыскиватели. Основные тенденции развития опрыскивателей. URL: https://itexn.com/1548_opryskivateli-osnovnyetendencii-razvitija-opryskivatelej.html (дата обращения: 08.04.2024).

³ Зинченко В.А. Агроекотоксикологические основы применения пестицидов: Учебное пособие. М.: Изд-во МСХА, 2000. 180 с.

Нарушение процесса внесения СЗР и удобрений приводит к негативным последствиям: сносу частиц рабочей жидкости и отрицательному воздействию на соседние посевы; усилению экологической нагрузки на расстоянии до 20 км от места обработки⁴; снижению нормы внесения препарата, провоцирующему резистентность вредителей к препарату [4], и снижению его токсикологического воздействия на возбудителей болезней [5]; увеличению концентрации действующего вещества, вызывающего ожоги листьев растений [6], и увеличению риска остаточного содержания в продуктах питания [7]; к экономическим потерям хозяйств, составляющим до 50% средств на закупку СЗР⁵, и т.д. Отметим негативное влияние снижения качества распределения препаратов при выполнении полевых работ в селекции и в первичном семеноводстве, где должны соблюдаться требования агротехники возделывания линий и сортов и идентичные условия вегетации опытных посевов (принцип единственного различия).

Одной из причин ухудшения качества технологической операции опрыскивания является отклонение распределяющей штанги от первоначального положения вследствие внешних возмущений [8, 9]. Амплитуда вертикальных колебаний может составлять

⁴ 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: Учреждение образования «Могилевский государственный учебный центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки кадров, консультирования и аграрной реформы», 2004. 60 с.

⁵ Гринь Н. Как подобрать форсунки для опрыскивания // Аграрный сектор. 2021. № 4 (46). С. 10.

до 300 мм и выше, вызывая соответствующее изменение ширины полосы обработки каждым распылителем до 38% и более [10].

Повышение равномерности опрыскивания достигается оснащением опрыскивателей системами стабилизации штанги в горизонтальной и вертикальной плоскостях (маятниковые и шарнирно-рычажные системы стабилизации с механическими, пневматическими, гидравлическими и иными демпферными устройствами)⁶; наличием гасителей колебаний полевой штанги⁷, устройств подавления вибрации распределительной штанги и сочетанием ее различных поперечных сечений [11]; применением новейших систем и устройств стабилизации и предотвращения раскачивания штанги фирм-разработчиков John Deere (США), Jacoby (Германия), Kverneland Groupe, Hardi⁵ и др.

Перечисленные технические решения, относящиеся к самоходным, прицепным и навесным опрыскивателям, вследствие сложности и массивности конструкции неприменимы в селекционно-семеноводческом процессе. В связи с этим актуальными являются разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий и средств механизации производственных операций, реализующих качественно новые, высокоэффективные и наиболее адаптированные к внешним воздействиям подходы, способные решать задачи как в основном производстве, так и в специфических процессах создания новых сортов.

Цель исследований: разработка и теоретическое обоснование концепции применения отзывчивой к внешним возмущениям распределительной системы малогабаритного штангового опрыскивателя, компенсирующей риски снижения равномерности внесения СЗР из-за вертикальных колебаний.

Материалы и методы

В исследованиях использовались общие методы получения и анализа информации, геометрическое и математическое моделирование, теоретический анализ качественных и агротехнических параметров опрыскивания, обоснование закономерностей технологического процесса опрыскивания на основе известных законов физики и классической математики, метод номограммирования функций нескольких переменных. Математическая обработка опытных

⁶ Ревякин Е.Л., Краховецкий Н.Н. Машины для химической защиты растений в инновационных технологиях: Научный аналитический обзор. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. 124 с.

⁷ Крук И.С., Карпович С.К., Маркевич А.Е., Болванович В.В., Чешун П.В. Проектирование несущих конструкций, схем подвесок и систем стабилизации штанг полевых опрыскивателей: Рекомендации. Минск: БГАТУ, 2018. 172 с.

данных выполнялась в среде Microsoft Excel. Исследование полученных аналитических зависимостей проводилось в среде системы математических расчетов Mathcad 14,0 (русская версия). С целью принципиального подтверждения выдвигаемой гипотезы проведен полевой эксперимент на базе опытного поля Орловского ГАУ. Культура – озимая пшеница. Почва серая лесная, среднесуглинистая. Предварительная обработка – культивация. Предшественник – ячмень.

В качестве опытного образца опрыскивателя использовался малогабаритный одноопорный штанговый опрыскиватель тачечного типа, разработанный в Орловском ГАУ. Испытания распределительной системы осуществлялись в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53053-2008⁸. Оригинальность методики полевого эксперимента заключалась в установке в каждом из опытных проходов стандартных щелевых распылителей Lechler ST 110-03 (Синий) так, чтобы фронтальная проекция угла факела распыла каждого распылителя соответствовала требуемой ширине полосы обработки при задаваемом угле наклона штанги опрыскивателя. Равномерность покрытия оценивалась коэффициентом вариации путем подсчета количества капель на учетных карточках. Повторность проведения опытов – 3-кратная; погрешность измерений – не более 5%. Математическая обработка результатов измерений производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011⁹.

Результаты и их обсуждение

В селекционно-семеноводческом процессе находят применение малогабаритные штанговые опрыскиватели тачечного типа, которые характеризуются мобильностью, универсальностью, возможностью равномерной обработки значительных площадей опытных посевов, а также простотой эксплуатации и доступностью^{10,11} [12]. Опрыскиватель данного типа дает возможность большей маневренности на участках малой площади и селекционных деланках, игнорируя различия ширины междурядий

⁸ ГОСТ Р 53053-2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2009. 45 с.

⁹ ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200089016> (дата обращения: 14.09.2022).

¹⁰ Павлов Л.В., Павлов С.А., Дринча В.М., Родимцев С.А. Машины для механизации селекционно-семеноводческих работ в овощеводстве: Справочное пособие. М., 2005. С. 95-97.

¹¹ Sprayers. Euro-pulve. URL: <https://www.euro-pulve.com/en/> (дата обращения: 08.04.2024).

опытных посевов. Однако удержание боковой штанги в горизонтальном положении требует определенных физических усилий и навыков оператора. Установлено, что размах средних значений вертикальных колебаний штанги одноопорного тачечного опрыскивателя может достигать 16...29° [13]. Снабжение конструкции уравновешивающим устройством позволяет уменьшить вероятность возникновения отрицательного угла наклона штанги, вызываемого ее моментом инерции [14]. В этом случае средние значения отрицательных (наклон вниз) и положительных (наклон вверх) отклонений боковой штанги будут иметь равную величину $\pm 7^\circ$ при общем размахе колебаний 14° .

Компенсация равномерности распределения СЗР при вертикальных колебаниях штанги малогабаритного опрыскивателя может быть достигнута изменением геометрии текущего угла факела распыла (ФР) распыливающих устройств. С учетом поворота распылителя вокруг своей оси ширина обрабатываемой полосы B_ϕ и угол ϕ поворота ФР относительно движения агрегата связаны отношением [15]:

$$B_\phi = 2R \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\phi, \quad (1)$$

где R – расстояние установки распылителя над обрабатываемой полосой, м; α – угол распыла факела, град.

Зависимость фронтального угла β ФР от угла ϕ поворота распылителя запишется как

$$\beta = \alpha (\cos \phi). \quad (2)$$

Ранними нашими исследованиями показано, что изменение геометрии фронтальной проекции распыла является наиболее универсальным и не требует применения сложных и массивных рычажных копирующих устройств [13, 16].

Технически данный способ воплощен в штанговом опрыскивателе, включающем в себя рабочий орган в виде горизонтальной штанги с установленными распылителями жидкости, имеющими возможность поворота вокруг своих продольных осей и датчиками положения распылителей относительно обрабатываемой поверхности [17]. Управление величиной фронтального угла ФР при колебаниях рабочего органа в поперечно-вертикальной плоскости позволяет сохранить ширину обрабатываемой полосы каждого распылителя независимо от их положения относительно поверхности земли. Также известен распылитель, имеющий корпус с выходным каналом и дефлектор, выполненный в виде набора подвижных пластин с отверстиями и ограничительными буртиками для регулирования угла ФР [18], однако вышеуказанные предложения имеют недостатки.

Так, в первом [17] индивидуально для каждого распылителя требуется применение сложного и многокомпонентного устройства контроля и привода. Кроме того, если уменьшение фронтального угла β распыла осевым поворотом на угол ϕ распылителя не представляет сложности ($\beta = f(\cos \phi)$, $\phi \in \{10^\circ, 90^\circ\}$), то увеличение β возможно лишь на $1...2^\circ$ за счет устранения технологического угла установки распылителей ($7...10^\circ$), предотвращающего слияние смежных потоков. Недостатками второго устройства [18] являются необходимость ручной перестановки пластин дефлектора и невозможность автоматического управления геометрией факела распыла при колебаниях штанги опрыскивателя.

Результаты критического анализа известных способов и технических решений компенсации равномерности распределения СЗР при вертикальных колебаниях штанги опрыскивателя позволили сформулировать следующую рабочую гипотезу: «*Равномерное распределение опрыскивателем рабочей жидкости по ширине захвата штанги, колеблющейся в поперечно-вертикальной плоскости, обеспечивается управлением текущей фронтальной проекции угла факела распыла, формируемого адаптивным подключением секционных дефлекторов распылителей*».

Предлагаемая нами концепция равномерного распределения СЗР независимо от вертикальных колебаний штанги опрыскивателя основана на применении комплекта мультирежимных распылителей, функционально связанных с цифровыми системами контроля и управления.

Общий вид мультирежимного распылителя дефлекторного типа [19] представлен на рисунке 1. В исходном положении распылителя шаровой регулирующий клапан *11* закрыт, а шаровой клапан *10* открыт для прохода рабочей жидкости. При этом рабочая жидкость поступает во входной канал *3*, и далее – в секционный канал *4*. Выходя через отверстие *7*, часть потока поступает на дефлектор *18* и посредством его боковых направляющих буртиков *21* приобретает при диспергировании угол α_{\min} распыла, например, на $1/3$ меньший угла $\alpha_{\text{ном}}$ распыла, установленного картой-заданием на внесение средства защиты или удобрения. Другая часть потока рабочей жидкости поступает в секционный канал *5*, откуда через отверстие *8* распределяется на секторный дефлектор *19*, где благодаря направляющим буртикам *22* и центральному ребру *24* формируется в секторный факел распыла с внешним углом $\alpha_{\text{ном}}$ при вершине, установленным картой-заданием на обработку, и внутренним углом γ_{\min} симметричного оси распыла незаполненного сектора, равным углу α_{\min} распыла, сформированного предыдущим дефлектором *18*.

При уменьшении расстояния от распылителя до обрабатываемой поверхности, фиксируемого установленными на штанге опрыскивателя датчиками расположения, бортовой компьютер опрыскивателя подает управляющий электрический сигнал на электромагнитный привод 17. В результате происходит поворот вала 15 на угол 90°, открывая нормально закрытый шаровой клапан 11. При этом часть рабочей жидкости из секционного канала 5 поступает в секционный канал 6, откуда, минуя выходное отверстие 9, распределяется на секторный дефлектор 20. Благодаря направляющим буртикам 23 и центральному

ребру 25 жидкость диспергируется секторным факелом распыла с внешним углом α_{max} при вершине, например, на 1/3 большим угла α_{nom} распыла, и внутренним углом γ_{nom} симметричного оси распыла незаполненного сектора, равным внешнему углу α_{nom} распыла, сформированного предыдущим дефлектором 19. Таким образом, ширина полосы внесения средства защиты или удобрения увеличивается, компенсируя уменьшение высоты расположения распылителя над обрабатываемой поверхностью.

При увеличении расстояния от распылителя до обрабатываемой поверхности, фиксируемого датчиками расположения, бортовой компьютер опрыскивателя подает управляющий электрический сигнал на электромагнитный привод 16, в результате чего происходит поворот вала 14 на угол 90°, закрывая нормально открытый шаровой клапан 10. При этом прекращается доступ потока к секторным дефлекторам 19 и 20, а диспергирование рабочей жидкости факелом распыла с углом α_{min} при вершине реализуется лишь дефлектором 18, оснащенным боковыми направляющими буртиками 21. В этом случае ширина полосы внесения средства защиты или удобрения уменьшается, компенсируя увеличение высоты расположения распылителя над обрабатываемой поверхностью.

Совместная «умная» работа всего комплекта мультирежимных распылителей формирует оригинальный принцип адаптивного распределения рабочей жидкости штанговым опрыскивателем, обеспечивая высокое качество технологической операции.

Общий вид и схема к расчету оптимальных углов фронтальной проекции ФР распылителей одноопорного штангового опрыскивателя представлены на рисунке 2. Циклы работы и режимы переключения отдельных распылителей одноопорного штангового

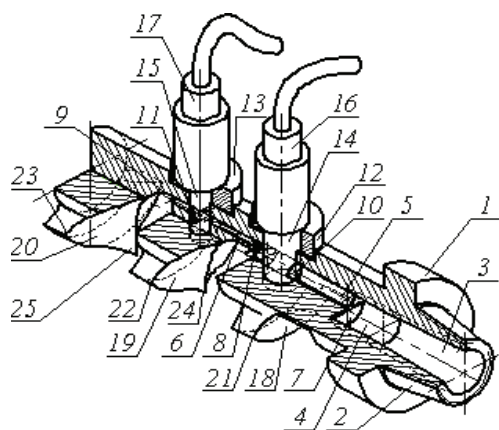


Рис. 1. Мультирежимный распылитель дефлекторного типа [19]:

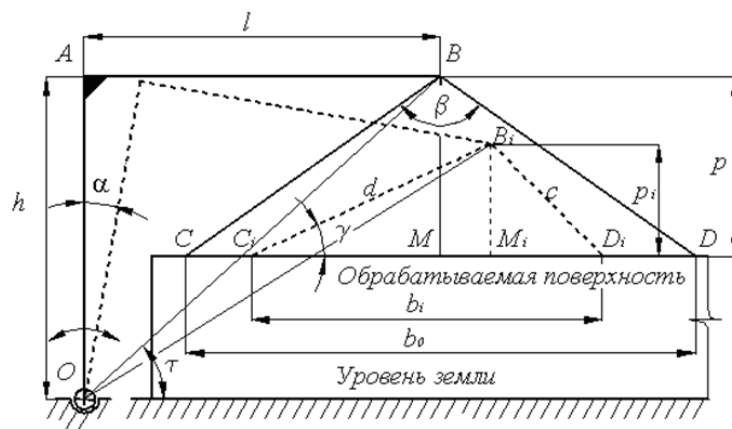
- 1 – корпус; 2 – конический хвостовик; 3 – входной канал;
- 4, 5, 6 – секционные каналы; 7, 8, 9 – выходные отверстия;
- 10, 11 – регулирующие клапаны; 18, 19, 20 – дефлекторы;
- 21, 22, 23 – направляющие буртики;
- 24, 25 – центральное ребро

Fig. 1. Multi-mode deflector type sprayer [19]:

- 1 – body; 2 – conical shank; 3 – input channel;
- 4, 5, 6 – sectional channels; 7, 8, 9 – outlet openings;
- 10, 11 – control valves; 18, 19, 20 – deflectors;
- 21, 22, 23 – guide collars; 24, 25 – central rib



а



б

Рис. 2. Опытный образец одноопорного штангового мотоопрыскивателя (а) и схема к расчету оптимальных углов фронтальной проекции ФР распылителей при колебаниях штанги в поперечно-вертикальной плоскости (б)

Fig. 2. Prototype of a single-support boom motorized sprayer (a) and a diagram for calculating the optimal angles of the front projection of the sprayer when the boom oscillates in the transverse-vertical plane (b)

опрыскивателя определяются рядом параметров: углом $\beta_{нач}$ факела распыла по условиям выполнения технологической операции; местом расположения распылителя на штанге (расстояние относительно оси колебаний), l ; высотой установки над обрабатываемой площадью распределяющей штанги опрыскивателя, p ; углом α наклона штанги в поперечно-вертикальной плоскости.

Ширина полосы обработки одной форсункой b_i , учитывающей геометрические параметры опрыскивателя и угол поперечного наклона штанги α , определяется по формуле [13, 16]:

$$b_i = \sqrt{\left(p - (h - \sqrt{h^2 + l^2}) \cdot \sin\left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha\right) \right) \left[\frac{1}{\sin\left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right]^2 + \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right]^2 - 2 \left(\frac{1}{\sin\left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right) \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha\right)} \right) \cdot \cos\beta } \quad (3)$$

где h – высота установки штанги относительно земли, м.

Уравнение влияния угла α положения распределяющей штанги на требуемый угол β распыла с учетом дистанции l вылета распылителя относительно оси симметрии опрыскивателя записывается как

$$\beta = 2 \arcsin \frac{b_0}{2 \sqrt{\left(p - \left((h - \sqrt{h^2 + l^2}) \times \sin\left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha\right) \right) \right)^2 + \left(\frac{b_0}{2} \right)^2 }} \quad (4)$$

где b_0 – расчетная ширина полосы обработки одним распылителем, м.

Графическая интерпретация выражений (3 и 4) использована для построения оптимизационной номограммы (рис 3). Номограмма дает возможность при любом положении штанги опрыскивателя получить значения текущих фронтальных углов распыла, отвечающих допустимой ширине полосы обработки.

При малообъемном и обычном опрыскивании неравномерность распределения (коэффициент вариации) рабочей жидкости допускается не более 25%, при ультрамалообъемном опрыскивании – не более 40%¹². Тогда при фронтальном угле распыла 110° и допустимой неравномерности внесения жидкого препарата 25% пределы отклонения ширины полосы обработки одной форсункой составят от 1,07 до 1,78 м (рис. 3). Как следует из верхнего сектора номограммы, в указанный промежуток укладываются параметры распределения жидкости,

¹² Зинченко В.А. Агроекотоксикологические основы применения пестицидов: Учебное пособие. М.: Изд-во МСХА, 2000. 180 с.

полученные распылом форсунок, находящихся на расстоянии $l = 2,5$ м от центра качения (при углах положения штанги $\pm 2^\circ$); $l = 2,0$ м ($\pm 3^\circ$); $l = 1,5$ м ($\pm 4^\circ$); $l = 1,0$ м ($-6^\circ \dots +7^\circ$). Факел распыла форсунки, ближайшей к центру качения штанги, обеспечивает допустимые параметры распределения жидкости при уклонах штанги от -11° до $+13^\circ$. Верхний сектор номограммы демонстрирует зависимость ширины зоны распыла от угла наклона к горизонту распределительной системы (штанги) при соответствующем удалении форсунки от центра качения. На нижнем секторе представлена графическая формализация функции влияния угла наклона штанги на требуемый фронтальный угол распыла, обеспечивающий оптимальную ширину обработки соответствующей форсункой.

Из примера распылителя, установленного на расстоянии $l = 1,0$ м от центра качения распределяющей системы, следует, что при поперечном наклоне штанги менее -7° и более $+7^\circ 40'$ ширина полосы обработки выходит за пределы, допускаемые агротехническими

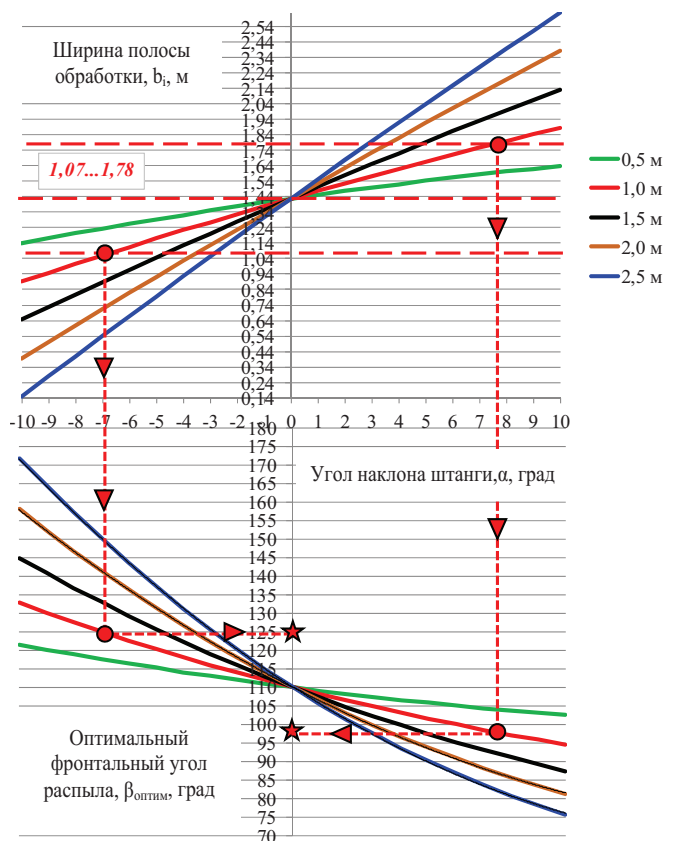


Рис. 3. Номограмма для определения оптимальных текущих значений фронтальных углов факела распыла форсунок опрыскивателя при вертикальных колебаниях распределяющей системы (для корневого угла распыла 110°)

Fig. 3. Nomogram for determining the optimal current values of the front angles of the spray pattern of sprayer nozzles during vertical vibrations of the distribution system (for a spray cone angle of 110°)

требованиями на операцию опрыскивания. Находим точки пересечения кривой функции $b_i^{1,0} = f(\alpha)$ с верхней и нижней границами допустимых пределов ширины полосы обработки. Далее проецируем найденные точки на соответствующую кривую функции $\beta^{1,0}_{опт} = f(\alpha)$ в нижнем секторе номограммы. Проекция полученных точек пересечения на ось ординат сектора (отмечены звездочками) покажут оптимальные углы распыла данной форсунки, требуемые при данном положении распределяющей системы.

Найденные теоретические зависимости (3, 4) позволяют получить оптимальные конструктивно-режимные параметры распылителей адаптивной штанговой распределительной системы опрыскивателя. Режимы переключения распылителей представлены в таблице 1, операционный график функционирования адаптивной штанговой распределительной системы при ее отклонениях в поперечно-вертикальной плоскости – на рисунке 4. Полученные оптимальные

режимы функционирования распылителей предназначены для номинального угла ФР 110°, обеспечивающего расчетную ширину полосы обработки 1,428 м при высоте расположения распылителя над поверхностью обработки 0,5 м (1).

Работа распылителя, ближайшего к точке опоры (центру качения) одноопорного опрыскивателя, обеспечивает допустимые пределы ширины полосы обработки при отклонениях опрыскивателя до 10° и более в любом направлении поперечно-вертикальной плоскости без изменения геометрии ФР ($\beta = 110^\circ$) (рис. 3, 4).

Номинальный угол распыла $\beta = 110^\circ$ распылителя, устанавливаемого на расстоянии 1,0 м от оси симметрии опрыскивателя (удаление от центра качения в горизонтальной проекции), отвечает допустимому условию распределения жидкости (ширина полосы обработки – 1,07...1,78 м) в пределах от -5° до +6° колебаний штанги относительно горизонтали.



Рис. 4. Операционный график режимов работы адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного опрыскивателя

Fig. 4. Operational schedule of operating modes of the adaptive boom distribution system of a small-size sprayer

Алгоритм переключения режимов работы распылителей адаптивной распределительной системы опрыскивателя

Таблица 1

Table 1

Algorithm for switching the operating mode of sprayers of the adaptive distribution system

Расстояние установки распылителя относительно центра качения в горизонтальной проекции, м <i>Installation distance of the sprayer relative to the rolling center in horizontal projection, m</i>	Оптимальные углы, град., ФР распылителей, при углах, град., отклонения штанги в поперечно-вертикальной плоскости <i>Optimal angles (degrees) of spray cones, at angles (degrees) of boom deflection in the transverse-vertical plane</i>							
	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6	±7
0,5	110	110	110	110	110	110	110	110
1,0	110	110	110	110	110	110/130	85/130	85/130
1,5	110	110	110	110	85/110	85/135	85/135	85/135
2,0	110	110	110	85/142	85/142	85/142	85/142	85/142
2,5	110	110	85/110	85/110	85/145	85/145	85/145	85/145

Соответственно данный распылитель нуждается в переключении режима распыла при достижении наклона распределительной штанги от -5° и менее на угол ФР $\beta = 130^\circ$, при $+6^\circ$ и более – на угол ФР $\beta = 85^\circ$. Аналогичным будет алгоритм переключения режимов распыла для остальных распылителей комплекта. Очевидно, что достижение условий равномерности распределения СЗР для отрицательных значений α (наклон штанги вниз) обусловлено необходимостью использования больших углов распыла. Это приводит к чрезмерным изменениям ширины полосы обработки (левая часть операционного графика на рисунке 4), что существенно снижает возможность подбора единого оптимального угла ФР даже в пределах небольшого ряда значений отклонения штанги. С увеличением дистанции удаления распылителя от центра качения данное ограничение ужесточается. В этой связи стоит обратить внимание на незначительный выход за допустимые пределы ширины полосы обработки, формируемой распылителем, устанавливаемым на расстоянии 2,5 м, функционирующего в режиме номинального угла распыла $\beta = 110^\circ$. Простым решением было бы перевести данный распылитель в режим угла распыла $\beta = 145^\circ$ уже при угле наклона опрыскивателя $\alpha = -3^\circ$. Однако в данном случае сокращается компенсируемый предел отрицательного угла наклона штанги. Более предпочтительным здесь является компенсация уменьшения ширины полосы обработки данным распылителем, увеличением допустимой ширины полосы обработки смежным распылителем, установленным на расстоянии 2,0 м относительно центра качения в горизонтальной проекции.

С целью эмпирического подтверждения выдвинутой научной гипотезы реализован полевой модельный эксперимент, в котором предусматривалась оценка принципиальной возможности достижения равномерного распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги при различных углах наклона одноопорного опрыскивателя. Моделирование изменения

угла ФР отдельных распылителей осуществлялось их осевым поворотом на требуемый угол. Использование стандартных распылителей (условие исключения слияния ближайших потоков) и выполненная ранее оптимизация значений конкретного ряда фронтальных проекций углов распыла предусматривали изменение положения штанги в пределах $0 \dots +7^\circ$.

Результаты эксперимента показывают, что в пределах рассматриваемого диапазона поперечных уклонов изменение фронтальных проекций углов распыла, соответствующее расчетной ширине полосы обработки каждым распылителем, обеспечивает общую равномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги независимо от положения последней в поперечно-вертикальной плоскости (табл. 2). Так, если с изменением угла положения штанги от 0 до 7° при типовой установке распылителей коэффициент v изменялся от 4,1 до 15,8% (или на 11,7%), то при адаптивном способе – от 4,2 до 6,4% (2,2%). Увеличение v при больших углах поперечного наклона распределительной системы во многом объясняется сносом более мелких капель. Количество последних повышалось при увеличении расстояния до поверхности обработки. Тем не менее реализуемое адаптивной системой устранение фактора, связанного с нарушением схемы перекрытия смежных потоков (при изменении положения штанги относительно обрабатываемой поверхности), увеличивает качество выполняемой технологической операции.

Предлагаемая концепция гарантирует повышение качества выполнения технологических операций по уходу за посевами: обеспечивает повышение равномерности распределения препаратов, снижение непроизводительных потерь, экономию средств производства, а также снижение экологической нагрузки на окружающую среду. Реализация предлагаемых решений в селекции растениеводства за счет снижения влияния неучитываемых факторов позволит улучшить условия опытной работы селекционного процесса.

Таблица 2

Равномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги одноопорного опрыскивателя при типовом и адаптивном способах ориентирования плоскостей ФР

Table 2

Distribution uniformity of the working fluid across the working width of the boom of a single-support sprayer, with standard and adaptive methods of orienting the spray cone planes

Ориентирование плоскостей ФР распылителей относительно штанги <i>Orientation of the spray cone planes relative to the boom</i>	Коэффициент вариации, v , %, при угле наклона штанги в поперечно-вертикальной плоскости, град. <i>Coefficient of variation, v, %, at the angle of inclination of the boom in the transverse-vertical plane, degrees</i>							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Типовое (8°) / <i>Typical (8°)</i>	4,1	4,2	5,7	9,4	9,6	10,4	13,3	15,8
Согласно указаниям (рис. 3) / <i>According to the instructions, Fig. 3</i>	4,2	4,2	4,4	4,7	5,0	5,3	5,8	6,4

Выводы

1. Использование оригинального уравновешивающего устройства одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа позволяет снизить размах средних значений вертикальных колебаний распределительной боковой штанги при работе с $16...29^\circ$ до 14° .
2. Предложенная конструкция мультирежимного дефлекторного распылителя обеспечивает равномерное распределение средств защиты растений при вертикальных колебаниях штанги опрыскивателя. При базовом угле распыла 110° допустимые пределы ширины полосы обработки одним распылителем при нижнем наклоне штанги обеспечиваются углом

распыла 85° , при верхнем – $135...145^\circ$ (в зависимости от места установки распылителя).

3. Теоретически и экспериментально подтверждена гипотеза о принципиальной возможности равномерного распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги при ее вертикальных колебаниях за счет управления текущей фронтальной проекции углов факела распыла отдельных распылителей. Разность значений коэффициента вариации поперечного распределения рабочей жидкости при типовом и адаптивном ориентировании плоскостей факела распыла в модельном эксперименте составила 9,5%.

Список источников

1. Диесперова Н.А., Диесперов К.В. Проблема импортозависимости в агрохимической отрасли России и пути ее решения // Вестник Челябинского государственного университета. 2023. № 11 (481). С. 155-166. <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2023-481-11-155-166>
2. Мильченко Н.Ю. Усовершенствованная технология внесения средств химизации с поливной водой // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2009. № 4 (16). С. 121-123. EDN: KYCPHL
3. Маркевич А.Е., Крук И.С., Бекбосынов С.Б., Болат У., Анищенко А.И. Оценка потерь пестицидов в растениеводстве // Современные тенденции развития сельскохозяйственного машиностроения, оснащения и технического сервиса в АПК: Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2023. С. 144-150. EDN: ROTNUM
4. Коваленков В.Г., Тюрина Н.М., Павлова Л.И. Резистентность рапсового цветоеда как показатель перестройки генетической структуры популяций вредных видов под влиянием инсектицидов // Агрохимия. 2018. № 5. С. 54-62. <https://doi.org/10.7868/S0002188118050083>
5. Побединская М.А., Плуталов П.Н., Романова С.С., Кокаева Л.Ю., Николаев А.В., Александрова А.В., Еланский С.Н. Устойчивость возбудителей альтернариоза картофеля и томата к фунгицидам // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46, № 6. С. 401-408. EDN: PILZBT
6. Попов Ю.В. Защита зерновых культур от болезней должна быть обоснованной // Защита и карантин растений. 2009. № 7. С. 42-45. EDN: KYBEVT
7. Куликова О.И., Федорова Т.Н., Кузнецов В.И., Орлова В.С. Экзогенные факторы риска возникновения болезни Паркинсона // Экология человека. 2019. № 1. С. 34-39. EDN: VZLNUZ
8. Труфляк Е.В., Хуснетдинов В.Е. Модель перемещения опрыскивателя для обработки тростника рисовой оросительной системы // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 154-174. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.154-174>
9. Дорохов А.С., Старостин И.А., Ещин А.В., Курбанов Р.К. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 3. С. 12-18. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>
10. Мезникова М.В. Исследование проблем защиты растений от химически опасных воздействий в условиях чрезвычайных ситуаций // Вестник НЦБЖД. 2019. № 2 (40). С. 98-104. EDN: HRLMDU

References

1. Diesperova N.A., Diesperov K.V. Russian import dependency problem of the agrochemical industry and ways to solve it. *Bulletin of Chelyabinsk State University*. 2023;11:155-166. (In Russ.) <https://doi.org/10.47475/1994-2796-2023-481-11-155-166>
2. Milchenko N.Yu. Improved technology for introducing chemicals with irrigation water. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science And Higher Education*. 2009;4:121-123. (In Russ.)
3. Markevich A.E., Kruk I.S., Bekbosynov S.B., Bolat U., Anishchenko A.I. Assessment of pesticide losses in crop production. *In: Modern development trends of agricultural engineering, equipment and technical service in the agroindustrial sector: Proceedings of the International scientific and practical conference. Minsk: Belarusian State Agrarian Technical University*. 2023:144-150. (In Russ.)
4. Kovalenkov V.G., Tyurina N.M., Pavlova L.I. Resistance of rape beetle as an index of the restructuring of the genetic structure of pest populations as affected by insecticides. *Agrokhimia = Agrochemistry*. 2018;5:54-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0002188118050083>
5. Pobedinskaya M.A., Plutalov P.N., Romanova S.S., Kokayeva L.Yu., Nikolaev A.V., Aleksandrova A.V., Elansky S.N. Resistance of potato and tomato early blight pathogens to fungicides. *Mycology and Phytopathology*. 2012;46:6:401-408. (In Russ.)
6. Popov Yu.V. Protection of grain crops against disease should be valid. *Plant Protection and Quarantine*. 2009;7:42-45. (In Russ.)
7. Kulikova O.I., Fedorova T.N., Kuznetsov V.I., Orlova V.S. Exogenous factors of Parkinson's disease development. *Human Ecology*. 2019;1:34-39. (In Russ.)
8. Truflyak E.V., Khusnetdinov V.E. A sprayer movement model for treating reeds in rice irrigation system. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):154-174. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.154-174>
9. Dorokhov A.S., Starostin I.A., Eschin A.V., Kurbanov R.K. Technical means for chemical protection of plants: current state and development prospects. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022;24(3):12-18. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-3-12-18>
10. Meznikova M.V. Research on problems of plants protection against hazardous chemical impact in case of emergency situations. *Vestnik NTsBZhD = Bulletin of the Scientific Center of Belarusian Railways*. 2019;2:98-1047. (In Russ.)
11. Yan J., Xue X., Cui L., Ding S., Gu W., Le F. Analysis of dynamic behavior of spray boom under step excitation. *Applied Sciences*. 2021;11:10129. <https://doi.org/10.3390/app112110129>
12. Kozlov I.B., Stepanov B.E., Mochkova T.V., Maltsev N.V. Small-sized bicycle sprayer for selection plots. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2013;2:49-50. (In Russ.)

11. Yan J., Xue X., Cui L., Ding S., Gu W., Le F. Analysis of dynamic behavior of spray boom under step excitation. *Applied Sciences*. 2021;11:10129. <https://doi.org/10.3390/app112110129>

12. Козлов И.Б., Степанов Б.Е., Мочкова Т.В., Мальцев Н.В. Малогабаритный веолопрыскиватель для селекционных участков // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 2. С. 49-50. EDN: PYYRCH

13. Дембовский И.А., Родимцев С.А. Определение величины колебаний штанги тачечного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости // Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса: Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: ООО ДГТУ-ПРИНТ, 2022. С. 169-173. EDN: EJNWGF

14. Родимцев С.А., Шапенкова А.А., Тимохин О.В., Патрин Е.И. Обоснование эргономических характеристик малогабаритного штангового опрыскивателя тачечного типа // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 12 (168). С. 17-23. EDN: TBZKOP

15. Омаров А.Н., Каиргалиев Е.К., Бакыткалиев А.А. Теоретическое обоснование применения форсунок с щелевым распылением // Инновационная техника и технологии. 2019. № 1 (18) С. 32-37. EDN: ZELWMH

16. Родимцев С.А., Дембовский И.А., Панин Е.Н. Разработка и обоснование параметров мобильного опрыскивателя для садово-паркового и ландшафтного строительства // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 2 (81). С. 26-34. EDN: HEMKNL

17. Штанговый опрыскиватель: а.с. SU1308307 A1, МПК A01M7/00(1987.05) / В.В. Ченцов, В.Л. Фрумович, А.В. Лагутин, Я.Ю. Сергеев; заявл. 06.28.1985; опубл. 05.07.1987, Бюл. № 17. EDN: RMJKGB

18. Распылитель: а.с. SU650589 A1, МПК A01M7/00(1979.07) / А.И. Билык, И.П. Масло, П.Г. Судак; заявл. 22.11.1977; опубл. 05.03.1979, Бюл. № 9. EDN: WUNQPA

19. Регулируемый дефлекторный распылитель: Патент RU224484 U1, МПК A01M7/00(2023.12) / С.А. Родимцев, И.А. Дембовский, А.Ю. Родичев, А.В. Кулев, М.В. Кулев, Д.О. Ломакин; заявл. 20.12.2023; опубл. 27.03.2024, Бюл. № 9. EDN: ZHBKPU

Информация об авторах

Илья Андреевич Дембовский, аспирант, преподаватель многопрофильного колледжа; Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; 302019, Российская Федерация, г. Орел, ул. Генерала Родина, 69; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>; emilyenn@rambler.ru

Сергей Александрович Родимцев, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сервиса и ремонта машин; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева; 302030, г. Орел, ул. Московская, 77; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>; rodimcew@yandex.ru

Вклад авторов

С.А. Родимцев – руководство исследованием, концептуализация, методология;

И.А. Дембовский – концептуализация, формальный анализ, проведение исследования, создание черновика рукописи, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 08.04.2024, после рецензирования и доработки 27.04.2024; принята к публикации 04.05.2024

13. Dembovskiy I.A., Rodimtsev S.A. Determination of the value of oscillations of a room sprayer in the transversal-vertical plane *In: Current state and development prospects of the agro-industrial sector: Proceedings of XV Anniversary International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don: DSTU-PRINT Ltd., 2022:169-173. (In Russ.)*

14. Rodimtsev S.A., Shapenkova A.A., Timokhin O.V., Patrin E.I. Ground of ergonomic descriptions of small barbell sprinkler of wheelbarrow type. *Life Safety*. 2014;12:17-23. (In Russ.)

15. Omarov A.N., Kairgaliev E.K., Bakytkaiev A.A. Theoretical justification of application of forces with spinnish spray. *Innovative Machinery and Technology*. 2019;1:32-37. (In Russ.)

16. Rodimtsev S.A., Dembovsky I.A., Panin E.N. Development and substantiation of the parameters of a mobile sprayer for garden and park and landscape construction. *World of Transport and Technological Machines*. 2023;2:26-34. (In Russ.)

17. Chentsov V.V., Frumovich V.L., Lagutin A.V., Sergeev Ya. Yu. Boom sprayer: Author's certificate No. 1308307 USSR, IPC A01M7/00(1987.05), 1987. (In Russ.)

18. Bilyk A.I., Maslo I.P., Zander P.G. Pulverizing jet: Author's certificate No. 650589 USSR, IPC A01M7/00(1979.07), 1979. (In Russ.)

19. Rodimtsev S.A., Dembovsky I.A., Rodichev A.Yu., Kulev A.V., Kulev M.V., Lomakin D.O. Adjustable deflector spray: Patent RU224484 U1, IPC A01M7/00(2023.12)

Author Information

Ilya A. Dembovskiy, postgraduate student, lecturer at Multidisciplinary College, Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; 302019, Russian Federation, Orel, st. Generala Rodina, 69; <https://orcid.org/0009-0006-6975-7708>; emilyenn@rambler.ru

Sergey A. Rodimtsev, DSc (Eng), Associate Professor, Professor of the Department of Service and Repair of Machines; Orel State University named after I.S. Turgenev; 302030, Orel, Moskovskaya street, 77; <https://orcid.org/0000-0003-1849-4224>; rodimcew@yandex.ru

Author Contribution

S.A. Rodimtsev – research supervision, conceptualization, methodology;

I.A. Dembovskiy – conceptualization, formal analysis, research, writing – original draft preparation, finalizing (reviewing and editing) of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 08.04.2024, Revised 27.04.2024, Accepted 04.05.2024