

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-611160>

Оригинальное исследование



Обоснование пределов изменения корневых углов распыла адаптивного распылителя опрыскивателя

С.А. Родимцев¹, И.А. Дембовский²¹ Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел, Российская Федерация;² Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Колебания полевой штанги опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости влекут снижение качества технологической операции. Указанное обстоятельство особенно актуально в отношении работы малогабаритных одноопорных опрыскивателей тачечного типа. Одно из возможных решений компенсации влияния поперечных колебаний штанги на качество опрыскивания — применение адаптивных распылителей с изменяемым корневым углом факела распыла, реагирующих на положение, занимаемое распылителем по отношению к обрабатываемой поверхности.

Цель работы — обоснование необходимых пределов изменения углов распыла адаптивного распылителя для одноопорного опрыскивателя. Новизна исследования заключается в том, что в отличие от производственной сельскохозяйственной техники, вопросам реализации технологий с применением средств малой механизации уделяется недостаточно внимания.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовался макетный образец одноопорного штангового мотоопрыскивателя. Полевой эксперимент проводился на опытных участках Орловского ГАУ. Регистрация данных по отклонению опрыскивателя от вертикальной оси выполнялась с помощью специально разработанного угломера. Математическая обработка дешифрованных опытных данных выполнялась табличным процессором в среде Microsoft Excel. Исследование полученных аналитических зависимостей проводилось в среде системы математических расчетов Mathcad 14,0.

Результаты. Экспериментально установлено, что в процессе работы максимальное отклонение опрыскивателя от вертикали может составлять до 30°. При этом, средняя амплитуда поперечных рабочих колебаний штанги одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа составляет от +11° до -18°. Амплитуда поперечных колебаний одноопорного опрыскивателя зависит от подготовленности оператора и скорости передвижения агрегата. Важное значение имеет балансировка опрыскивателя, с учетом момента сил, вызванного весом односторонней полевой штанги. Выведена формула для вычисления ширины распыления одним распылителем, учитывающая геометрические параметры одноопорного опрыскивателя, а также угол его наклона в поперечно-вертикальной плоскости. Получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать требуемые пределы корневого угла факела распыла адаптивного распылителя, с учетом расстояния монтажа распылителя, относительно вертикальной плоскости, проходящей через точку опоры опрыскивателя. Найдены значения корневых углов распыла для дефлекторов адаптивных распылителей, при амплитуде колебаний опрыскивателя от -18° до +11° в поперечно-вертикальной плоскости.

Заключение. Практическая ценность исследования заключается в возможности использования формулы для определения пределов изменения корневых углов распыла при проектировании и разработке адаптивных распылителей опрыскивателей.

Ключевые слова: малогабаритный опрыскиватель; распылитель; угол распыла; полевая штанга; поперечные колебания; качество внесения.

Как цитировать:

Родимцев С.А., Дембовский И.А. Обоснование пределов изменения корневых углов распыла адаптивного распылителя опрыскивателя // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2024. Т.91, № 1. С. 81–90. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-611160>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-611160>

Original Study Article

Justification of range limits of root spray angle of an adaptive spraying device

Sergey A. Rodimtsev¹, Ilya A. Dembovsky²

¹ Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russian Federation;

² Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Oryol, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Oscillations of the sprayer field boom in the transverse-vertical plane causes a decrease in the quality of the technological operation. This is especially true in relation to the operation of small-sized single-support barrow-type sprayers. One of the possible solutions to compensate the effect of transverse oscillations of the boom on the quality of spraying is the use of adaptive sprayers with a variable root angle of the spray jet, responding to the position taken by the sprayer in relation to the surface being treated.

AIM: Justification of the necessary limits for changing the spray angles of an adaptive sprayer for a single-support spraying device. The novelty of the research lies in the fact that insufficient attention is paid to the implementation of technologies using means of small-scale mechanization, unlike industrial agricultural machinery.

METHODS: A prototype of a single-support boom motor sprayer was used as the study object. The field experiment was carried out at the experimental area of the Oryol State Agrarian University. Data acquisition on the deviation of the sprayer from the vertical axis was carried out using a specially developed angle gauge. A spreadsheet processor in the Microsoft Excel environment was used to perform mathematical processing of the decrypted experimental data. The study of the obtained analytical dependencies was carried out in the environment of the Mathcad 14.0 mathematical calculation system.

RESULTS: It has been experimentally found that the maximum deviations of the sprayer from the vertical can be up to 30° during operation. At the same time, the average amplitude of the transverse operating oscillations of the boom of a single-support barrow-type boom sprayer ranges from +11° to -18°. The amplitude of the transverse oscillations of a single-support sprayer depends on the operator's skills and the unit motion velocity. Balancing the sprayer is important due to the moment of force caused by the weight of the one-sided field boom. A formula for calculation of the spray width of one sprayer, taking into account the geometric parameters of a single-support sprayer, as well as its inclination angle in the transverse-vertical plane, has been derived. An analytical relationship that makes it possible to calculate the required limits of the root angle of the spray jet of an adaptive sprayer, taking into account the installation distance of the sprayer relative to the vertical plane passing through the support point of the sprayer, has been obtained. The values of the root spray angles for the deflectors of adaptive sprayers, with the sprayer oscillations amplitude from -18° to +11° in the transverse-vertical plane, were found.

CONCLUSIONS: The practical value of the study lies in the potential of using the formula to determine the range limits of root spray angles when designing and developing adaptive sprayers.

Keywords: small-sized sprayer; sprayer; spray angle; field boom; transverse oscillations; spraying quality.

To cite this article:

Rodimtsev SA, Dembovsky IA. Justification of range limits of root spray angle of an adaptive spraying device. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):81–90. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-611160>

Received: 21.10.2023

Accepted: 25.01.2024

Published online: 15.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

В процессах селекции и первичного семеноводства растений, благоустройстве садово-паркового хозяйства, а также на личных приусадебных участках граждан находят применение одноопорные малогабаритные штанговые опрыскиватели тачечного типа. Среди наиболее известных моделей, предлагаемых производителями — оборудование компаний Wintersteiger (Австрия), Euro Pulve (Франция), Walkover International (Англия), опрыскиватель производства ОАО ГСКБ (Зерноочистка) г. Воронеж (Россия). Одноопорные опрыскиватели обладают рядом преимуществ, по сравнению с одноосной двухколесной схемой: они менее металлоемки, более маневренны, не требуют перенастройки колеи, при переходе на иную ширину междурядья, их перемещение возможно по узким дорожкам. В то же время, они менее устойчивы в поперечно-вертикальной плоскости, что влечет необходимость постоянного контроля горизонтального положения штанги и излишнего напряжения оператора.

Известно, что даже незначительные колебания штанги ведут к ухудшению качества опрыскивания: с увеличением высоты распыла возрастают испарение и снос частиц рабочей жидкости; малая высота расположения распылителей обуславливает отсутствие зон перекрытия и превышение нормы внесения действующего вещества. В результате, создаются условия для недостаточного сдерживания развития сорняков [1], ускорения резистентности (привыкания) вредителей [2, 3] к препарату и снижения его токсикологического воздействия на возбудителей болезней [4] в зоне «недовнесения». Увеличение концентрации действующего вещества, вызывают ожоги листьев растений [5]. Для окружающей среды одним из главных факторов риска является снос мелких капель и стекание крупных капель с обрабатываемой поверхности. Установлено, что при опрыскивании, доля имеющих малую скорость гравитационного оседания мелких капель (менее 80 мкм) составляет от 1–2% [6] до 5–6% [7] и более. В целом, потери гербицидов при сносе могут составлять 20–90%, а повреждения не подлежащих данной обработке сельскохозяйственных культур в отдельных случаях обнаруживают на расстоянии до 20 км от участков опрыскивания [8].

В этих условиях особое внимание должно быть уделено обеспечению равномерности внесения средств защиты, независимо от упругих колебаний штанги, явлений резонанса либо текущих изменений микрорельефа. Так, для прицепных, навесных и самоходных опрыскивателей задача компенсации отклонения штанги планомерно решается в течение многих лет. Известны технические и технологические решения, основанные на копировании рельефа поля с помощью пружинно-рычажных подвесок [9], гасителей колебаний полевой штанги [10], подавления вибрации распределительной

штанги сочетанием ее различных поперечных сечений [11], использования вентиляторной форсунки с изменяемым углом распыления совместно с технологией широтно-импульсной модуляции [12], изменения слияния потоков смежных распылителей, в зависимости от величины колебаний штанги [13] и др. Средства малой механизации не столь давно занимают устойчивое место в реализации современных технологий. Поэтому, вопросы теоретического обоснования условий их функционирования, конструктивных параметров и технологических режимов работы остаются актуальными и требующими отражения в новых инженерно-технических проектах.

Результаты исследований, проведенных авторами настоящей статьи ранее [14, 15], позволяют утверждать, что универсальным решением задачи компенсации отклонений штанги малогабаритного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости может стать применение распылителей, адаптивно реагирующих на положение, занимаемое ими по отношению к обрабатываемой поверхности. В этом случае не требуется комплектования опрыскивателя сложными и массивными рычажными копирующими устройствами, а сохранение схемы перекрытия обрабатываемых полос достигается изменением геометрии факелов распыла отдельных форсунок [16–19].

Исходя из имеющихся предпосылок может сформулировать **цель и задачи настоящего исследования**.

Цель исследования — определение пределов изменения корневых углов распыла адаптивного распылителя одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа.

Задачи исследования:

1. оценка амплитуды рабочих колебаний штанги одноопорного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости;
2. анализ влияния поперечного отклонения опрыскивателя на ширину захвата полевого распылителя;
3. определение зависимости значений требуемого угла факела распыла адаптивного распылителя от угла наклона одноопорного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При решении первой задачи, в качестве объекта исследования использовался макетный образец одноопорного штангового мотоопрыскивателя (см. рис. 1а), разработанный нами ранее [20]. Полевой эксперимент проводился на опытных участках Орловского ГАУ. Повторность проведения опытов — 3-х кратная; погрешность измерений — не более 5%. Регистрация данных по отклонению опрыскивателя от вертикальной оси выполнялась с помощью специально разработанного угломера (рис. 1б). Последний состоит из измерительной шкалы, жестко закрепленной на раме опрыскивателя и шарнирно установленной

указательной стрелки, оснащенной отвесом [21]. Фиксация текущих показаний угломера осуществлялась автомобильным регистратором с автономным питанием. Последующая математическая обработка дешифрованных опытных данных выполнялась табличным процессором в среде Microsoft Excel.

Теоретическое обоснование влияния колебаний штанги опрыскивателя на параметры распределения рабочей жидкости осуществлялось на основе общепринятых методик инженерного расчета. Исследование полученных аналитических зависимостей проводилось в системе математических расчетов Mathcad 14,0 (Русская версия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результатами эксперимента по оценке рабочих колебаний одноопорного опрыскивателя с правосторонней штангой в поперечно-вертикальной плоскости установлено следующее. Максимальные углы отклонения опрыскивателя от вертикали могут составлять от $+17^\circ$ (левосторонний уклон, по ходу движения) до -30° (правосторонний уклон, по ходу движения). При этом среднее арифметическое значение угла поперечных колебаний составляет $-3(\pm 0,4)^\circ$. Важно отметить, что пиковые значения отклонений достаточно редки и зависят, в основном, от подготовки оператора и скорости передвижения опрыскивателя. Средние значения максимальных углов наклона лежат в области от $+11^\circ$ до -18° . Именно эти значения будут определяющими, при выборе режимов работы адаптивных распылителей, позволяющих управлять геометрией факела распыла.

Кроме того, анализ диаграммы поперечных колебаний (см. рис. 2) свидетельствует о явном наличии правосторонней асимметрии. Очевидно, последняя вызвана

некоторым смещением центра тяжести макетного образца опрыскивателя, вследствие неуравновешенности момента сил от веса односторонней полевой штанги. Одним из вариантов устранения данного недостатка конструкции может стать оснащение опрыскивателя следящим уравнивающим механизмом [22]. Подобное устройство способно регулировать балансировку опрыскивателя пространственным положением бака, в зависимости от количества находящейся в нем рабочей жидкости.

С целью определения теоретической ширины захвата факела распыла одним распылителем, опишем геометрические параметры опрыскивателя схемой, изображенной на рис. 3.

Допуская возможность отклонения опрыскивателя лишь в плоскости чертежа, рама OA , высотой h , имеет поперечные перемещения на угол α относительно шарнира O . Горизонтальная штанга AB длиной l , установлена перпендикулярно раме OA и жестко соединена с ней.

Факел распыла представляет собой равнобедренный треугольник CBD с постоянным углом β , при вершине B . Проведенная к основанию треугольника CBD биссектриса BM , строго перпендикулярна горизонтальной штанге AB и, одновременно, является высотой p треугольника CBD . Здесь, основание $CD = b_0$ — линия контакта факела распыла с обрабатываемой поверхностью.

Как видно из рис. 3, при изменении угла α положения опрыскивателя, происходит соответствующее отклонение факела распыла CBD от его исходной позиции. При этом, длина линии контакта факела распыла с обрабатываемой поверхностью также изменится ($C_iD_i = b_i$).

Выполним анализ влияния поперечных отклонений одноопорного мотоопрыскивателя на ширину захвата полевого распылителя, расположенного на расстоянии l



Рис. 1. Опытный образец одноопорного штангового мотоопрыскивателя (а) и устройство для измерения величины горизонтальных отклонений полевой штанги (б).

Fig. 1. A prototype of a single-support boom motor sprayer (a) and a device for measuring values of horizontal inclinations of a field boom (b).



Рис. 2. Гистограмма распределения значений величины колебаний штанги одноопорного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости.

Fig. 2. A distribution histogram of oscillation values of the boom of the single-support sprayer in transverse-vertical plane.

от оси симметрии опрыскивателя, проходящей через точку его опоры O .

Из теоремы косинусов известно, что квадрат любой стороны треугольника равен сумме квадратов двух других его сторон минус удвоенное произведение этих сторон на косинус угла между ними. Отсюда:

$$b_i = \sqrt{d^2 + c^2 - 2dc \cdot \cos \beta}, \quad (1)$$

где b_i , d , c — стороны разностороннего треугольника $C_i B_i D_i$, образованного факелом распыла и обрабатываемой поверхностью, при отклонении рамы опрыскивателя на некоторый угол α .

Для определения сторон d и c треугольника $C_i B_i D_i$, разделим его на два прямоугольных $C_i B_i M_i$ и $M_i D_i D_i$, с катетом $p_i = B_i M_i$.

Используя формулы соотношения между сторонами и углами прямоугольного треугольника $C_i B_i M_i$, запишем:

$$d = \frac{p_i}{\sin \gamma}, \quad (2)$$

где γ — угол при основании треугольника.

Треугольник $C_i D_i D_i$ образован смещением треугольника $C B D$, вследствие поворота рамы на угол α . Тогда, угол γ можно определить, как разность углов α и одного из углов равнобедренного треугольника $C B D$, при его основании. Отсюда получим:

$$\gamma = 90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha. \quad (3)$$

Соединив точки B и B_i с точкой опоры O , определим p_i как разность высот треугольников $C B D$ и $C_i B_i D_i$, относительно опорной поверхности.

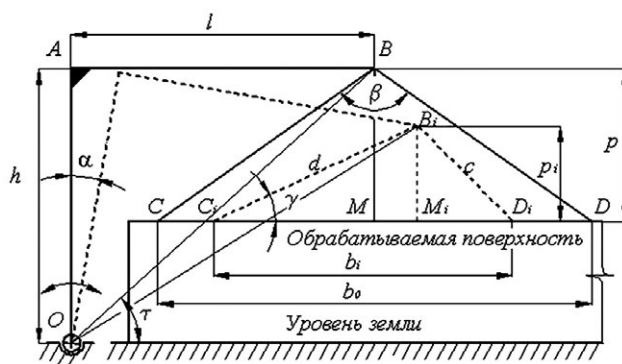


Рис. 3. Схема к расчету изменения ширины захвата факела распыла форсунок опрыскивателя, при колебаниях штанги в поперечно-вертикальной плоскости.

Fig. 3. An analytical model of variation of spray jet operation width of sprayer injectors at boom oscillations in transverse-lateral plane.

Очевидно, что угол τ , между прямой $O B_i$ и опорной поверхностью определяется функцией:

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{h}{l} \quad (4)$$

следовательно, если

$$O B = O B_i = \sqrt{h^2 + l^2}, \quad (5)$$

то

$$p_i = p - \left(h - \sqrt{h^2 + l^2} \cdot \sin(\tau - \alpha) \right), \quad (6)$$

откуда, с учетом (4)

$$d = \frac{p - \left[\left(h - \sqrt{h^2 + l^2} \right) \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{h}{l} - \alpha \right) \right]}{\sin \left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha \right)}. \quad (7)$$

Для вычисления стороны c треугольника $C_i B_i D_i$, воспользуемся уже известными углом при вершине B_i и высотой p_i :

$$\begin{aligned} c &= \frac{p_i}{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right)} = \\ &= \frac{p - \left[\left(h - \sqrt{h^2 + l^2} \right) \cdot \sin \left(\operatorname{arctg} \frac{h}{l} - \alpha \right) \right]}{\sin \left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha \right)}. \end{aligned} \quad (8)$$

После несложных преобразований, равенство (1) для вычисления ширины распыла, учитывающее геометрические параметры одноопорного опрыскивателя, а также угол поперечного наклона рамы, окончательно запишется в виде:

$$b_i = \sqrt{\left[p - \left(h - \sqrt{h^2 + l^2} \right) \cdot \sin \left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha \right) \right]^2 \times \left[\frac{1}{\sin \left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha \right)} \right]^2 + \left[\frac{1}{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right)} \right]^2 - 2 \left[\frac{1}{\sin \left(90^\circ - \frac{\beta}{2} - \alpha \right)} \right] \left[\frac{1}{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha \right)} \right] \cdot \cos \beta} \quad (9)$$

Графическое представление формулы (9) иллюстрируется на рис. 4 для значений $p = 0,5$ м; $h = 0,9$ м; $l = 1$ м; $\beta = 110^\circ$. Как видно, при горизонтальном положении штанги опрыскивателя ширина b полосы распределения рабочей жидкости одним распылителем составляет около 1,43 м. Однако, уже при отклонениях опрыскивателя на угол α от -15° до $+20^\circ$ в поперечно-вертикальной плоскости, ширина b изменяется от 2,60 м до 0,46 м, т.е. больше чем в 1,8–3,1 раза.

При постановке задачи определения необходимых пределов изменения корневого угла распыла β опрыскивателя, исходим из предпосылки соблюдения неизменной ширины захвата b_i . Ввиду незначительности поперечных отклонений горизонтальной проекции распылителя при наклонах штанги в поперечно-вертикальной плоскости, не учитываем эти отклонения в расчетах. Кроме того, принимаем допущение о стабильности вертикального расположения оси распылителя (обеспечивается устройством вертикальной стабилизации).

В соответствии с теоремой синусов имеем (см. рис. 3):

$$\frac{BD}{\sin 90^\circ} = \frac{b_0}{\sin \beta}, \quad (10)$$

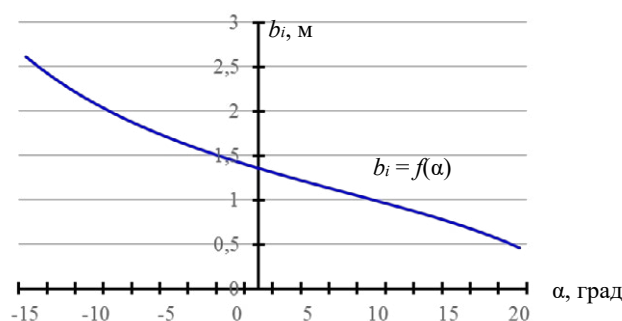


Рис. 4. Зависимость ширины полосы обработки одним распылителем от отклонения опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости.

Fig. 4. Dependence of width of operation lane for one sprayer on sprayer inclination in transverse-vertical plane.

откуда

$$\beta = \arcsin \frac{b_0}{2BD}. \quad (11)$$

Из теоремы Пифагора, квадрат половины длины гипотенузы BD равен сумме квадратов катетов p и $b_0/2$, или:

$$BD = \sqrt{p^2 + \left(\frac{b_0}{2} \right)^2}. \quad (12)$$

Подстановкой (12) в (11) получаем:

$$\beta = \arcsin \frac{b_0}{2 \left(\sqrt{p^2 + \left(\frac{b_0}{2} \right)^2} \right)}. \quad (13)$$

Из схемы на рис. 3 очевидно, что текущее значение p будет изменяться в соответствии с зависимостью (6). Принимая во внимание, что

$$\tau = \arctg \frac{h}{l}, \quad (14)$$

окончательную запись влияния угла α положения одноопорного опрыскивателя на требуемый угол β распыла, с учетом дистанции l вылета распылителя, относительно

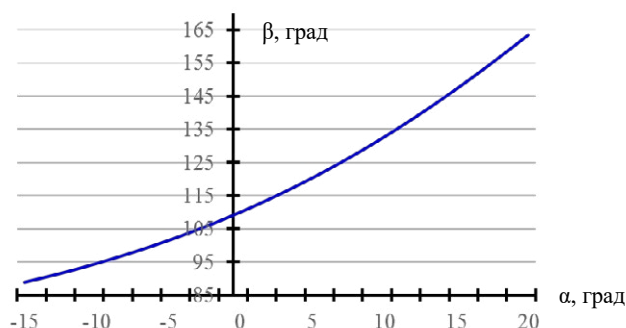


Рис. 5. Зависимость значений требуемого угла распыла адаптивного распылителя от угла наклона одноопорного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости.

Fig. 5. Dependence of demanded values of spray angle of an adaptive sprayer on inclination angle of the single-support sprayer in transverse-vertical plane.

вертикальной оси, проходящей через точку опоры опрыскивателя, можно представить в виде:

$$\beta = 2 \arcsin \frac{b_0}{2 \left(\sqrt{\left[p - \left(\left(h - \sqrt{h^2 + l^2} \right) \cdot \sin \left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha \right) \right) \right]^2 + \left(\frac{b_0}{2} \right)^2} \right)}. \quad (15)$$

Для ранее приведённых численных величинах, входящих в формулу (15) и заданном значении $b_0 = 1,43$ м, графическая интерпретация зависимости $\beta = f(\alpha)$ демонстрируется рис. 5. Хорошо видно, что при строго вертикальном положении опрыскивателя ($\alpha = 0^\circ$; горизонтальное расположение полевой штанги) корневой угол распыла $\beta = 110^\circ$ позволяет обеспечить полосу обработки расчетной шириной 1,43 м. При наклоне опрыскивателя влево, до значения $\alpha = -15^\circ$, увеличивается расстояние от сопла распылителя до обрабатываемой поверхности и, следовательно, ширина полосы обработки (см. рис. 3). Как следует из графика на рис. 5, с целью сохранения прежней ширины захвата b_0 , требуемый угол β_i распыла должен быть равен 89° . Соответственно, угол наклона опрыскивателя $\alpha = 20^\circ$ определяет раскрытие угла факела распыла до $\beta = 164^\circ$.

Использование формулы (15) предоставляет возможность вычислить требуемые пределы изменения угла распыла одного распылителя, при установленных средних значениях колебаний штанги в поперечно-вертикальной плоскости. Так, основываясь на ранее полученных экспериментальных значениях углов колебаний штанги и сводя их максимальные рабочие значения к средним показателям, получим: $\alpha = +11^\circ \dots -18^\circ$. Для данных пределов колебаний штанги в поперечно-вертикальной плоскости, изменения угла распыла адаптивным распылителем должны составлять $\beta = 86^\circ \dots 135^\circ$, на удалении $l = 1$ м.

Для дефлекторного распылителя, угол факела распыла в виде плоского конуса формируется углом конусности ограничительных буртиков на периферии дефлектора [17]. Следовательно, образованные внешними сторонами каждого отражающего дефлектора углы их конусности будут определяться расчетными углами распыла данного дефлектора адаптивного распылителя. Учитывая удаление каждого распылителя от проходящей через точку опоры плоскости симметрии опрыскивателя, численные значения этих углов найдены по формуле (15) и сведены в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящими исследованиями установлено, что максимальные пределы поперечных колебаний штангового одноопорного опрыскивателя тачечного типа составляют от $+17^\circ$ (левосторонний уклон, по ходу движения) до -30° (правосторонний уклон, по ходу движения). Однако, средняя амплитуда рабочих колебаний находится

Таблица 1. Значения корневых углов β распыла для дефлекторов адаптивных распылителей, при значениях $\alpha = -18^\circ \dots +11^\circ$

Table 1. Values of root spray angles β for deflectors of adaptive sprayers at values of $\alpha = -18^\circ \dots +11^\circ$

Расстояние точки установки адаптивного распылителя от оси опоры опрыскивателя, м	Пределы изменения углов факела распыла, град.		
	min	nom	max
0,5	99	110	123
1,0	86	110	135
1,5	76	110	149
2,0	67	110	164
2,5	60	110	179

в области $+11^\circ \dots -18^\circ$. Получена формула для вычисления ширины распыла одним распылителем, учитывающая геометрические параметры одноопорного опрыскивателя, а также угол его наклона в поперечно-вертикальной плоскости. Установлено, что одним из возможных решений задачи компенсации качества распределения рабочей жидкости при поперечных колебаниях штанги опрыскивателя может стать применение распылителей с геометрией распыла, адаптивно реагирующей на положение, занимаемое распылителем по отношению к обрабатываемой поверхности. Получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать требуемые пределы корневой угла распыла адаптивного распылителя, с учетом дистанции l вылета распылителя, относительно вертикальной оси, проходящей через точку опоры опрыскивателя. Найдены значения корневых углов распыла для дефлекторов адаптивных распылителей, для пределов колебаний опрыскивателя от -18° до $+11^\circ$ в поперечно-вертикальной плоскости.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. С.А. Родимцев — редактирование текста рукописи, создание изображений; экспертная оценка, утверждение финальной версии; И.А. Дембовский — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку

статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. S.A. Rodimtsev — editing the text of the manuscript, creating figures; expert assessment, approval

of the final version; I.A. Dembovsky — search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript; creating figures. Authors confirm the compliance of their authorship with the ICMJE international criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киреев И.М., Коваль З.М., Данилов М.В. Распределение капельной жидкости между распылителями для технологии опрыскивания растений // Агро Форум. 2019. № 4. С. 18–20. EDN: XMWMUE
2. 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. EDN: XMZHQТ doi: 10.7868/S0002188118050083
3. Сухорученко Г.И., Белякова Н.А., Иванова Г.П. и др. Методы оценки токсичности пестицидов для членистоногих, применяемых в борьбе с вредителями культур защищенного грунта // Энтомологическое обозрение. 2018. № 4. С. 649–657. EDN: Y00YXJ doi: 10.1134/S0367144518040056
4. Побединская М.А., Плуталов П.Н., Романова С.С. и др. Устойчивость возбудителей альтернариоза картофеля и томата к фунгицидам // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. В. 6. С. 401–408. EDN: PILZBT
5. Попов Ю.В. Защита зерновых культур от болезней должна быть обоснованной // Защита и карантин растений. 2009. № 7. С. 42–45. EDN: KYBEVT
6. Лысов А.К., Корнилов Т.В. Совершенствование технологий применения средств защиты растений методом опрыскивания // Вестник защиты растений. 2017. № 2(92). С. 50–53. EDN: ZFHRHD
7. Никитин Н.В., Спиридонов Ю.Я., Абубикеров В.А. и др. Противосносная технология внесения гербицидов нового поколения // Вестник защиты растений. 2008. № 3. С. 47–55. EDN: KAUMIT
8. Маркевич А.Е., Немировец Ю.Н. Основы эффективного применения пестицидов. Справочник в вопросах и ответах по механизации и контролю качества применения пестицидов в сельском хозяйстве. Горки: Могилевский государственный учебный центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки кадров, консультирования и аграрной реформы, 2004.
9. Кузнецов В.В., Кузнецов А.В. Подвеска широкозахватной штанги полевого опрыскивателя // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2012. № 1 (11). С. 5–9. EDN: VDUXDT
10. Крук И.С., Карпович С.К., Маркевич А.Е. и др. Проектирование несущих конструкций, схем подвесок и систем стабилизации штанг полевых опрыскивателей. Рекомендации. Минск: БГАТУ, 2018.
11. Yan J., Xue X., Cui L., et al. Analysis of Dynamic Behavior of Spray Boom under Step Excitation. Appl. Sci. 2021. Vol. 11. P. 10129. <https://doi.org/10.3390/app112110129>
12. Ghasemzadeh H.R., Humburg D. Using variable spray angle fan nozzle on long spray booms // CIGR Journal. 2016. Vol. 18, N. 1. P. 82–90.
13. Борисенко И.Б., Мезникова М.В., Улыбина Е.И. Теоретическое обоснование равномерности нанесения рабочего раствора на объект воздействия при обработке пропашных культур способом полосового опрыскивания // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2021. № 4 (64). С. 296–305. EDN: SCTXTD doi: 10.32786/2071-9485-2021-04-31
14. Дембовский И.А., Родимцев С.А. Определение величины колебаний штанги тачечного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости. В кн.: Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ, 2022. С. 169–173. EDN: EJNWGF doi: 10.23947/interagro.2022.169-173
15. 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 doi: 10.33979/2073-7432-2023-2(81)-26-34
16. Авторское свидетельство СССР № 1308307 / 07.05.1987, Бюл. № 17. Ченцов В.В., Фрумович В.Л. Лагутин А.В. и др. Штанговый опрыскиватель. Дата обращения: 21.10.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40453392_70180032.pdf
17. Авторское свидетельство СССР № 650589 / 05.03.1979. Бюл. № 9. Билык А.И., Масло И.П., Судак П.Г. Распылитель. Дата обращения: 21.10.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39961347_87563149.pdf
18. Патент РФ № 2515290 / 10.05.2014. Бюл. № 13. Додсон М. Плоскоструйные форсунки для текучей среды с регулируемым размером капель, включающие постоянный или переменный угол распыления. Дата обращения: 21.10.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37797805_91349313.pdf
19. Патент РФ № 2324348 / 20.05.2008. Бюл. № 14. Гулько А.И.

Комбинированная распылительная головка. Дата обращения: 21.10.2023. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37671634_28843972.pdf

20. Яндутова К.И., Родимцев С.А. Оптимизация условий работы труда оператора малогабаритного штангового опрыскивателя селекционного назначения // Охрана труда 2011. Актуальные проблемы и пути их решения. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Орел, 2011. Орел: ОГАУ им. Н.В. Парахина. С. 128–138. EDN: ZHQNHБ

REFERENCES

1. Kireev IM, Koval ZM, Danilov MV. Distribution of droplet liquid between sprayers for plant spraying technology. *Agro Forum*. 2019;4:18–20. (In Russ). EDN: XMWMUE
2. Kovalenkov VG, Tyurina NM, Pavlova LI. Resistance of the rapeseed flower beetle as an indicator of the restructuring of the genetic structure of populations of harmful species under the influence of insecticides. *Agrochemistry*. 2018;5:54–62. (In Russ). EDN: XMZHQТ doi: 10.7868/S0002188118050083
3. Sukhoruchenko GI, Belyakova NA, Ivanova GP, et al. Methods for assessing the toxicity of pesticides for arthropods used in the fight against pests of protected soil crops. *Entomological Review*. 2018;4:649–657. (In Russ). EDN: Y00YXJ doi: 10.1134/S0367144518040056
4. Pobedinskaya MA, Plutalov PN, Romanova SS, et al. Resistance of potato and tomato *Alternaria* pathogens to fungicides. *Mycology and Phytopathology*. 2012;46(6):401–408. (In Russ). EDN: PILZBT
5. Popov YuV. Protection of grain crops from diseases must be justified. *Protection and quarantine of plants*. 2009;7:42–45. (In Russ). EDN: KYBEBT
6. Lysov AK, Kornilov TV. Improving technologies for using plant protection products by spraying. *Bulletin of plant protection*. 2017;2(92):50–53. (In Russ). EDN: ZFHRHD
7. Nikitin NV, Spiridonov YuYa, AbubikeroV VA, et al. Anti-drain technology for the application of new generation herbicides. *Bulletin of plant protection*. 2008;3:47–55. (In Russ). EDN: KAUMIT
8. Markevich AE, Nemirowets YuN. *Basics of effective pesticide use. A guide to questions and answers on mechanization and quality control of pesticide use in agriculture*. Gorki: Mogilev State Training Center for Training, Advanced Training, Retraining, Consulting and Agrarian Reform; 2004. (In Russ).
9. Kuznetsov VV, Kuznetsov AV. Suspension of a wide-reach boom for a field sprayer // *Design, use and reliability of agricultural machines*. 2012;1(11):5–9. (In Russ). EDN: VDUXDT
10. Kruk IS, Karpovich SK, Markevich AE, et al. *Design of load-bearing structures, suspension schemes and stabilization systems for field sprayer booms. Recommendations*. Minsk: BGATU; 2018. (In Russ).
11. Yan J, Xue X, Cui L, et al. Analysis of Dynamic Behavior of Spray Boom under Step Excitation. *Appl. Sci*. 2021;11:10129. <https://doi.org/10.3390/app11210129>
12. Ghasemzadeh HR, Humburg D. Using variable spray angle fan nozzle on long spray booms. *CIGR Journal*. 2016;18(1):82–90.
13. Borisenko IB, Meznikova MV, Ulybina EI. Theoretical justification for the uniformity of application of the working solution to the object of influence when processing row crops using strip spraying. *News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2021;4(64):296–305. (In Russ). EDN: SCTXTD doi: 10.32786/2071-9485-2021-04-31
14. Dembovsky IA, Rodimtsev SA. Determination of the magnitude of vibrations of the barrow sprayer boom in the transverse-vertical plane. In: *State and prospects for the development of the agro-industrial complex. Anniversary collection of scientific works of the XV International Scientific and Practical Conference*. Rostov-on-Don: DSTU-PRINT; 2022:169–173. (In Russ). EDN: EJNWGF doi: 10.23947/interagro.2022.169-173
15. Rodimtsev SA, Dembovsky IA, Panin EN. *Development and justification of the parameters of a mobile sprayer for gardening and landscape construction*. World of transport and technological machines. 2023;2(81):26–34. (In Russ). EDN: HEMKNL doi: 10.33979/2073-7432-2023-2(81)-26-34
16. Avtorskoe svidetelstvo USSR № 1308307 / 07.05.1987, Byul. № 17. Chentsov VV, Frumovich VL, Lagutin AV, et al. Shtangovyy opryskivatel. (In Russ). [cited: 21.10.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_40453392_70180032.pdf
17. Avtorskoe svidetelstvo USSR № 650589 / 05.03.1979. Byul. № 9. Bilyk AI, Maslo IP, Sudak PG. Raspylitel. (In Russ). [cited: 21.10.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_39961347_87563149.pdf
18. Patent RUS № 2515290 / 10.05.2014. Byul. № 13. Dodson M. Ploskostruynnye forsunki dlya teku-chey sredy s reguliruemyym razmerom kapel, vkluychayushchie postoyannyi ili peremennyi ugol raspyleniya. (In Russ). [cited: 21.10.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37797805_91349313.pdf
19. Patent RUS № 2324348 / 20.05.2008. Byul. № 14. Gulko AI. Kombinirovannaya raspylitelnaya golovka. (In Russ). [cited: 21.10.2023] Available from: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37671634_28843972.pdf
20. Yandutova KI, Rodimtsev SA. Optimization of working conditions for the operator of a small-sized boom sprayer for selection purposes. *Labor protection 2011. Current problems and ways to solve them. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Orel, 2011. Orel: OSAU im NV Parakhina; 2011:128–138. (In Russ). EDN: ZHQNHБ
21. Rodimtsev SA, Shapenkova AA. Assessment and control of the position of a wheelbarrow sprayer in a transverse-vertical plane. *Agricultural technology and energy supply*. 2015;3(7):233–238. (In Russ). EDN: YIIUTF
22. Rodimtsev SA, Shapenkova AA, Timokhin OV. and others. Justification of the ergonomic characteristics of a small-sized wheelbarrow-type boom sprayer. *Life Safety*. 2014;12(168):17–23. (In Russ). EDN: TBZKOP

ОБ АВТОРАХ

*** Родимцев Сергей Александрович,**

д-р техн. наук,
профессор кафедры «Сервис и ремонт машин»;
адрес: Российская Федерация, 302030, Орел,
ул. Московская, д. 77
ORCID: 0000-0003-1849-4224;
eLibrary SPIN: 9469-0125;
e-mail: rodimcew@yandex.ru

Дембовский Илья Андреевич,

аспирант кафедры «Техносферная безопасность»;
ORCID: 0009-0006-6975-7708;
eLibrary SPIN: 9359-8042;
e-mail: emilyenn@rambler.ru

AUTHORS' INFO

*** Sergey A. Rodimtsev,**

Dr. Sci. (Engineering),
Professor of the Service and Repair of Machines Department;
address: 77 Moskovskaya street, 302030 Oryol,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0003-1849-4224;
eLibrary SPIN: 9469-0125;
e-mail: rodimcew@yandex.ru

Ilya A. Dembovsky,

Postgraduate of the Technosphere Safety Department;
ORCID: 0009-0006-6975-7708;
eLibrary SPIN: 9359-8042;
e-mail: emilyenn@rambler.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author