

Алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя для внесения пестицидов

Игорь Геннадьевич Смирнов,

доктор технических наук, заведующий отделом,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;

Геннадий Иванович Личман,

доктор технических наук, главный специалист, e-mail:
litchmangiv@yandex.ru;

Леонид Анатольевич Марченко,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: marchenko1312@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Отметим, что для рационального использования пестицидов в промышленном садоводстве необходимо снизить их расход путем локальной обработки каждого объекта, равномерного распределения рабочей жидкости с заданной нормой по всей кроне деревьев и кустарников. В ходе анализа технического оснащения современного промышленного садоводства в России выявили недостаточный уровень механизации в аспекте управления параметрами как технологического процесса, так и технических средств. *(Цель исследования)* Разработать алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя при обработке плодовых насаждений пестицидами, обеспечивающих их качественное внесение, снижение потерь и уменьшение рисков загрязнения окружающей среды. *(Материалы и методы)* Использовали аналитические методы оптимизации прикладной математики, теории выбора параметров мобильных сельскохозяйственных машин, критерии оценки качества распределения рабочей жидкости при обработке плодовых насаждений, данные о форме кроны обрабатываемых деревьев и кустарников. *(Результаты и обсуждение)* Установили, что количество рабочей жидкости, поступающей на единицу длины периметра, и качество распределения зависят от формы эпюры факела распыла, величины перекрытия эпюр распределения, расстояния штанги от оси симметрии дерева или кустарника, удаленности форсунок от штанги, формы эпюры распределения. Получили аналитические зависимости для расчета нормы (дозы) внесения пестицидов и качества их распределения по обрабатываемой поверхности. *(Выводы)* Разработали алгоритм аналитического расчета параметров штангового садового опрыскивателя, позволяющий оценить влияние на дозу внесения пестицидов и на качество распределения рабочей жидкости пестицидов, характеризуемое коэффициентом вариации. При этом учитывали параметры: эпюру распределения рабочей жидкости пестицидов, количество форсунок на вертикальной штанге опрыскивателя, высоту их расположения на штанге, расстояние от штанги до поверхности кроны, удаленность штанги от ствола обрабатываемого дерева, периметр кроны. Провели верификацию алгоритма при конкретных значениях параметров: расстоянии от вертикальной штанги до оси ствола дерева (кустарника) и форсунок до вертикальной штанги 1,0 и 0,5 метра, высоте расположения форсунок на вертикальной штанге 0,3, 0,8 и 1,3 метра, расходе рабочей жидкости 2,5 литра в минуту, коэффициенте, характеризующем эпюру распределения, 5,61. Рассчитали дозу внесения рабочего раствора пестицида – 174,6 литра на гектар при коэффициенте вариации 4,94 процента, что соответствует агротехническим требованиям на обработку пестицидами плодовых деревьев и кустарников.

Ключевые слова: штанговый садовый опрыскиватель, плодовые насаждения, пестициды, доза внесения пестицидов, качество распределения рабочей жидкости, эпюра распределения рабочей жидкости пестицидов.

■ **Для цитирования:** Смирнов И.Г., Личман Г.И., Марченко Л.А. Алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя для внесения пестицидов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №4. С. 26-33. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-26-33. EDN XKNQDU.

Algorithm for Calculating the Parameters of a Garden Boom Sprayer for Pesticide Application

Igor G. Smirnov,

Dr.Sc.(Eng.), head of department,
e-mail: rashn-smirnov@yandex.ru;

Gennadiy I. Lichman,

Dr.Sc.(Eng.), senior specialist,
e-mail: litchmangiv@yandex.ru;

Leonid A. Marchenko,

Ph.D.(Eng.), leading researcher,
e-mail: marchenko1312@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. It is noted that for the rational use of pesticides in industrial horticulture, it is necessary to reduce their consumption practicing the local treatment of each plant, uniform distribution of the working fluid at a set rate while treating a tree's or a shrub's crown. The analysis of the technical equipment of modern industrial horticulture in Russia reveals an insufficient level of mechanization in terms of managing the parameters of both the technological process and machinery. (*Research purpose*) To develop an algorithm for calculating the parameters of a boom garden sprayer when treating fruit plants with pesticides, to ensure their high-quality application, reduce losses and eliminate the risks of environmental pollution. (*Materials and methods*) The research is based on analytical methods of optimization offered by applied mathematics, the theory of choosing the parameters of agricultural mobile machines, criteria for assessing the quality of the working fluid distribution during the fruit plant treatment, data on the crown shape of the trees and shrubs being cultivated. (*Results and discussion*) It was established that the amount of working fluid per unit length of the perimeter and the quality of distribution depend on the shape of the spray jet distribution diagram, the degree of the distribution diagrams overlap, the distance between the boom and the tree's or shrub's axis of symmetry, the distance of the nozzles from the boom, the shape of the distribution diagram. Analytical dependencies were obtained to calculate the rate (dose) of pesticides and the quality of their distribution over the treated surface. (*Conclusions*) An algorithm for the analytical calculation of a boom garden sprayer parameters was developed, which makes it possible to evaluate the impact on the rate of applying pesticides and on the quality of distributing the pesticide working liquid, characterized by the variation coefficient. At the same time, the following parameters were taken into account: the distribution diagram of the pesticide working fluid, the number of nozzles on the vertical sprayer boom, the height of their location on the boom, the distance from the boom to the crown surface, the distance between the boom and the trunk of the tree treated, the crown perimeter. The algorithm was verified for specific parameter values: the distance of 1.0 meter from the vertical boom to the axis of the tree (shrub) trunk; the distance of 0.5 meter between the nozzles and the vertical bar, the height of the nozzles on the vertical bar of 0.3, 0.8 and 1.3 meter, the working fluid flow rate of 2.5 liters per minute, the coefficient characterizing the distribution diagram of 5.61. The dose of the pesticide working solution to apply was calculated as follows: 174.6 liters per hectare with a coefficient of variation of 4.94 percent, which corresponds to the agrotechnical requirements.

Keywords: boom garden sprayer, fruit plants, pesticides, pesticide application dose, quality of working fluid distribution, diagram of the pesticide working fluid distribution.

For citation: Smirnov I.G., Lichman G.I., Marchenko L.A. Algoritm rascheta parametrov shtangovogo sadovogo opryskivatelya dlya vnoseniya pestitsidov [Algorithm for calculating the parameters of a garden boom sprayer for applying pesticides]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N4. 26-33 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-4-26-33. EDN XKNQDU.

Анализ технического оснащения современного промышленного садоводства в России и за рубежом показал недостаточный уровень механизации производственных процессов, в частности, при обработке средствами защиты растений многолетних насаждений в питомниках, садах, на промышленных плантациях [1-3].

Машины для защиты растений от вредителей и болезней в перспективном саду интенсивного типа должны быть многорядными. При ширине междурядий до 5 м тракторный агрегат может обрабатывать рабочими жидкостями пестицидов одновременно не менее 4 рядов деревьев и ягодных кустарников. Процесс защиты растений будет высокопроизводительным, а большинство междурядий останутся свободными от прохождения тракторного агрегата. Основное внимание при создании инновационных опрыскивателей следует уделять качеству распыла пестицидов и повышению степени их использования по целевому назначению [4-6].

В отечественном садоводстве применяют в основном опрыскиватели вентиляторного типа. Один из их

недостатков – потери 30-90% рабочей жидкости в зависимости от степени развития листового аппарата [7]. К тому же недостаточное качество обработки многолетних насаждений приводит к потерям урожая, излишнему перерасходу пестицидов, превышению их предельно допустимых концентраций в плодах, загрязнению окружающей среды [8].

Для рационального использования пестицидов в промышленном садоводстве необходимо в первую очередь снизить количество вносимых пестицидов, равномерно распределить их по всей кроне деревьев и кустарников при заданной норме рабочей жидкости [9-11].

Современный уровень развития технологии производства плодовой и ягодной продукции предопределяет управление параметрами технологических процессов возделывания, защиты плодовых насаждений [12-14]. Наличие технических средств, оборудованных системами навигации, технического зрения, датчиками, позволяют оценивать размер деревьев или кустарников, форму кроны, степень поражения вредителями и болезнями, их распространение по кро-

не и дифференцировано обрабатывать пестицидами плодовые насаждения [15-17].

Для обеспечения качества обработки пестицидами многолетних насаждений в питомниках, садах, на промышленных плантациях, минимизации потерь пестицидов и их вредного воздействия на окружающую среду необходимо разработать алгоритм и аналитические зависимости для расчета норм (доз) внесения рабочей жидкости пестицидов и их качественного распределения с учетом формы кроны деревьев, эпюры распределения рабочей жидкости, типа и количества форсунок, конструктивно-технологических параметров [18-20].

Цель исследования – разработать алгоритм расчета параметров штангового садового опрыскивателя при обработке плодовых насаждений пестицидами, обеспечивающих их качественное внесение, снижение потерь и уменьшение рисков загрязнения окружающей среды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для соблюдения заданной дозы и требуемого качества распределения рабочей жидкости пестицида при опрыскивании плодовых насаждений необходимо учитывать следующие конструктивные и технологические параметры опрыскивателя: расстояние штанги от ствола дерева, высоту размещения форсунок, их удаленность от штанги и производительность [21-24] (рис. 1).

При решении задачи использовали аналитические методы оптимизации прикладной математики, тео-

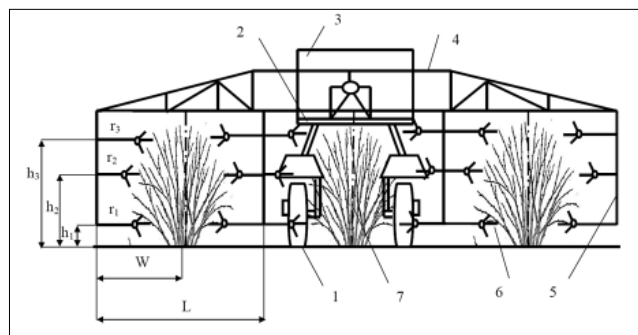


Рис. 1. Технологическая схема опрыскивания штанговым садовым опрыскивателем 1 – шасси опрыскивателя; 2 – рама опрыскивателя; 3 – бак для пестицидов; 4 – горизонтальная штанга; 5 – вертикальная штанга; 6 – форсунка; 7 – плодородное дерево (кустарник); w – расстояние от вертикальной штанги до оси ствола дерева (кустарника); L – расстояние между вертикальными штангами; r_1, r_2, r_3 – расстояние от форсунок до вертикальной штанги; h_1, h_2, h_3 – высота расположения форсунок на вертикальной штанге

Fig. 1. Technological scheme of spraying with a boom garden sprayer: 1 – sprayer chassis; 2 – sprayer frame; 3 – tank for pesticides; 4 – horizontal boom; 5 – vertical boom; 6 – nozzle; 7 – fruit tree (shrub); w – the distance from the vertical boom to the axis of the tree trunk (shrub); L – the distance between the vertical booms; r_1, r_2, r_3 – distance from the nozzles to the vertical boom; h_1, h_2, h_3 – the height of the nozzles on the vertical boom

рии выбора параметров мобильных сельскохозяйственных машин, критерии оценки качества распределения рабочей жидкости при обработке плодовых насаждений. Изучили данные о форме кроны обрабатываемых плодовых деревьев и кустарников и ее математическое описание в принятой системе координат, типы и характеристики форсунок. Рассмотрены случаи обработки рабочими растворами пестицидов деревьев и кустарников при плоской и криволинейной форме крон.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Распределение массы рабочей жидкости пестицидов по ширине факела распыла форсункой щелевого типа характеризуется функцией $q = q(x)$, имеющей один экстремум. Тогда эпюра распределения описывается полиномом второй степени (параболой).

В случае криволинейной формы кроны задача усложняется из-за того, что происходит взаимодействие эпюры распределения массы $q = q(x)$ с кривой, описывающей параметр кроны: $\varphi(x) = ax^2 + \beta x + \gamma$.

Рассмотрим последовательность действий по определению параметров опрыскивателя.

В случае обработки плоской кроны средняя доза $D_{ср}$ рабочей жидкости, поступающей на крону, и качество ее распределения, характеризуемое коэффициентом вариации V , зависят от производительности форсунок q , эпюры распределения $q(x)$, удаленности форсунок от периметра кроны r_1 , высоты расположения форсунок на штанге h_1 , а также от высоты дерева.

Рассмотрим вариант распределения массы рабочей жидкости при работе трех форсунок (рис. 2).

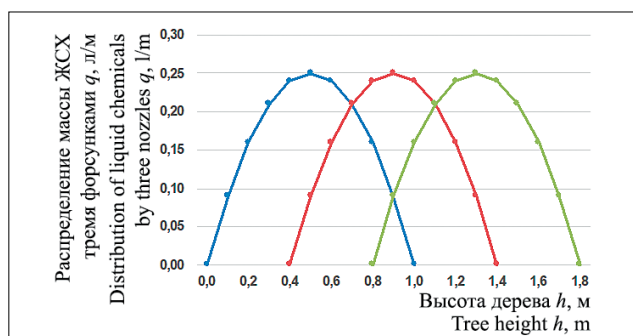


Рис. 2. Схема расположения трех эпюр распределения массы жидких средств химизации при обработке плоской кроны ($q_1(x), q_2(x), q_3(x)$ – уравнения факелов распыла 1-й, 2-й и 3-й форсунок)

Fig. 2. Three diagrams of liquid chemical distribution during the treatment of a flat crown ($q_1(x), q_2(x), q_3(x)$ are spray jet equations for the 1st, 2nd and 3rd nozzles)

Эпюры факелов распыла в принятой системе координат описываются уравнениями вида:

$$q(x) = a(x - 1/2)^2 + (w - r),$$

где a – эмпирический коэффициент, характеризующий форму эпюры распределения;

l – ширина факела распыла, м;
 w – расстояние от вертикальной штанги до оси ствола дерева (кустарника), м;
 r – расстояние от распылителя до вертикальной штанги, м.

С учетом перекрытия смежных эпюр распределения (от трех форсунок) в приведенной системе координат они описываются системой уравнений:

$$\begin{aligned} q_1 &= a(x - l/2)^2 + (w - r_3); \quad 0 \leq x \leq l; \\ q_2 &= a(x - l/2 - l + n_1)^2 + (w - r_2); \quad l - n \leq x \leq 2l - n; \quad (2) \\ q_3 &= a(x - l/2 - 2l + n_1 + n_2)^2 + (w - r_1); \end{aligned}$$

$$2l - n \leq x \leq 3l - 2n,$$

где n_i – величины перекрытия двух смежных эпюр.

Величина перекрытий n_i зависит от расстояния между форсунками (высоты расположения h_i). На нее влияет также расстояние форсунок от обрабатываемой поверхности, которое равно: $w - r_i$. Величина ширины факела распыла l также зависит от w и r_i .

Используя (1) и (2), запишем зависимость, описывающую изменение дозы внесения рабочей жидкости по высоте дерева:

$$\begin{aligned} D_{cp} &= \frac{3q}{3l-2n} \left\{ \int_0^{l-n} \left[-a\left(x - \frac{l}{2}\right)^2 + (w-r) \right] dx + \right. \\ &+ \int_{l-n}^l \left\{ \left[-a\left(x - \frac{l}{2} - l + n\right)^2 + (w-r) \right] + \right. \\ &\left. \left[-a\left(x - \frac{l}{2}\right)^2 + (w-r) \right] \right\} dx + \int_l^{\frac{3}{2}l-n} \\ &\left[-a\left(x - \frac{l}{2} - l + n\right)^2 + (w-r) \right] dx + \int_{\frac{3}{2}l-n}^{2l-n} \\ &\left\{ \left[-a\left(x - \frac{l}{2} - 2l + 2n\right)^2 + (w-r) \right] + \right. \\ &+ \left. \left[-a\left(x - \frac{l}{2} - l + n\right)^2 + (w-r) \right] \right\} dx + \int_{2l-n}^{3l-2n} \\ &\left. \left[-a\left(x - \frac{l}{2} - 2l + 2n\right)^2 + (w-r) \right] dx. \right. \end{aligned} \quad (3)$$

В результате суммирования трех эпюр распределения рабочей жидкости от трех форсунок по высоте кроны получили суммарную эпюру распределения $D_{сум}(x)$ (рис. 3).

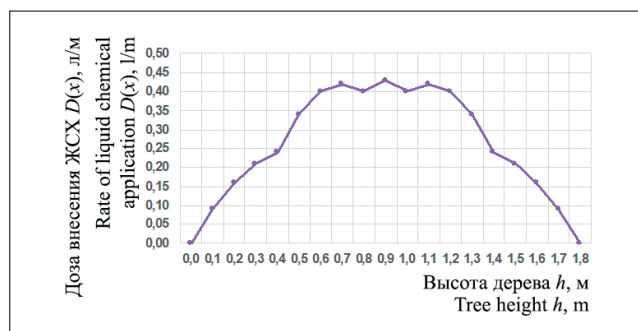


Рис. 3. Суммарная эпюра распределения рабочей жидкости по высоте кроны $D_{сум}(x)$

Fig. 3. The total diagram of the distribution of the working fluid along the of the crown height $D_{tot}(x)$

Среднюю дозу внесения D_{cp} найдем, проинтегрировав уравнение (3). Будем рассматривать случай, когда производительность и эпюры распределения форсунок одинаковы, перекрытия $n_1 = n_2 = n$ и расстояние от распылителя до вертикальной штанги $r_1 = r_2 = r_3 = r$. В этом случае средняя доза может быть описана функционалом:

$$D_{cp} = D_{cp} [q(x), a, r, w, n]. \quad (4)$$

Качество распределения рабочей жидкости пестицидов по ширине захвата характеризуется коэффициентом вариации V :

$$V = \frac{S}{D_{cp}} = \frac{\sqrt{\int_0^{3l-2n} [D(x) - D_{cp}(q, a, r, w, n)]^2 dx}}{D_{cp}(q, a, r, w, n)}, \quad (5)$$

где S – среднеквадратическое отклонение дозы.

Величина коэффициента вариации V зависит от характеристик форсунки, а также от конструктивных и технологических параметров опрыскивателя. Оптимальные показатели можно определить в результате решения неравенства:

$$V = \frac{S}{D_{cp}} = \frac{\sqrt{\int_0^{3l-2n} [D(x) - D_{cp}(q, a, r, w, n)]^2 dx}}{D_{cp}(q, a, r, w, n)} \leq V_{доп}, \quad (6)$$

где $V_{доп}$ – допустимый коэффициент вариации распределения пестицидов по обрабатываемой поверхности кроны (задается агротехническими требованиями).

При выводе формул (5) и (6) для определения $V_{доп}$ учитывали симметричность эпюр распределения.

Полученные функциональные зависимости позволяют, зная параметры q и a одной эпюры распределения, аналитически находить оптимальные значения:

- величины перекрытия эпюр распределения n или места расположения их на штанге h_i ;
- расстояния штанги от оси симметрии объекта обработки w ;
- удаленности форсунок от штанги r , обеспечивающей допустимое значение коэффициента вариации распределения пестицидов по обрабатываемой поверхности кроны.

Представленный выше алгоритм применим и для случая, когда обрабатываемая поверхность криволинейна (рис. 4).

Будем считать, что периметр кроны описывается полиномом второй степени, например параболой:

$$\varphi(x) = ax^2 + \beta x + \gamma. \quad (7)$$

Количество рабочей жидкости, поступающей на единицу длины периметра кроны и качество распределения зависят от:

- формы эпюры факела распыла $q = q(x)$;
- величины перекрытия эпюр распределения;
- расстояния штанги от оси симметрии дерева w ;

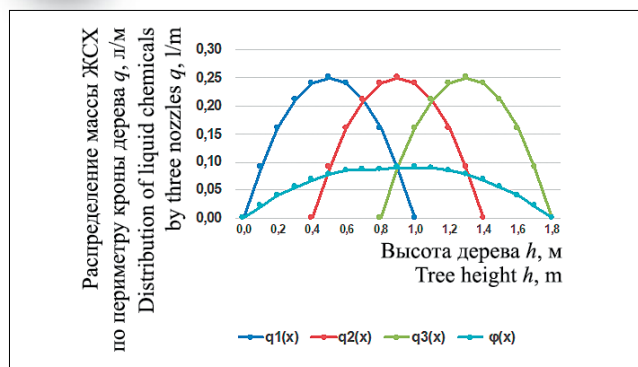


Рис. 4. Характер взаимодействия факелов распыла рабочей жидкости с кроной: $q_1(x)$, $q_2(x)$, $q_3(x)$ – уравнения факелов распыла 1-й, 2-й и 3-й форсунок; $\varphi(x)$ – уравнение периметра кроны дерева; A, B, C, D, E, F – точки пересечения эпюр факелов распыла жидких средств химизации с кривой, описывающей периметр кроны дерева

Fig. 4. The nature of the interaction of the working fluid spray jets with the crown: $q_1(x)$, $q_2(x)$, $q_3(x)$ – equations for the spray jets of the 1st, 2nd and 3rd nozzles; $\varphi(x)$ – tree crown perimeter equation; A, B, C, D, E, F – intersection points of the diagrams for liquid chemical spray jets with the curve of the tree crown perimeter

- удаленности форсунок от штанги r_i ;
- эмпирического коэффициента a , характеризующего форму эпюры распределения, обеспечивающего минимальное значение коэффициента вариации распределения рабочей жидкости пестицидов по обрабатываемой поверхности.

Вид функции $\varphi(x)$ определяется в результате статистического анализа формы крон.

Рассмотрим, как может меняться доза и качество обработки от технических и технологических параметров опрыскивателя. Для этого необходимо определить изменения дозы $D(s)$ вдоль периметра кроны, где s – точка на кривой периметра. Будем считать, что эпюры распределения $q_i = q_i(x)$ описываются параболой (2).

В случае перекрытия эпюр будет 5 или 6 точек их пересечения с кривой, описывающей периметр: A, B, C, D, E, F (рис. 4).

Обозначим координаты точек по оси X: x_A , x_B , x_C , x_D , x_E , x_F .

Для расчета координат точек пересечения эпюры распределения с периметром кроны представим эпюры в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_1(r_1, h_1, w)x^2 + b_1(r_1, h_1, w) + c_1(r_1, h_1, w); \\ y_2 &= a_2(r_2, h_2, w)x^2 + b_2(r_2, h_2, w) + c_2(r_2, h_2, w); \\ y_3 &= a_3(r_3, h_3, w)x^2 + b_3(r_3, h_3, w) + c_3(r_3, h_3, w). \end{aligned} \quad (8)$$

Из уравнений (8) следует, что форма эпюр распределения определяется коэффициентами a_i , b_i , c_i , которые в свою очередь зависят от технических и технологических характеристик опрыскивателя r_i , h_i , w .

Координату x_{i12} пересечения нижней x_{i1} и верхней

x_{i2} части эпюры i -й форсунки с периметром кроны, описываемой уравнением $\varphi(x) = ax^2 + \beta x + \gamma$, определяем по формуле:

$$x_{i12} = \frac{-(\beta - b_i) \pm \sqrt{(\beta - b_i)^2 - 4(\alpha - a_i)(\gamma - b_i)}}{2(\alpha - a_i)}, \quad (9)$$

где α , β , γ , a_i , b_i – коэффициенты, характеризующие периметр кроны и эпюру распределения рабочей жидкости i -й форсунки.

Зная начальную координату периметра кроны x_A и конечную x_F , находим среднюю дозу по формуле:

$$D_{cp} = \frac{3q}{S_{AF}} = \frac{3q}{\int_{x_A}^{x_F} \sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}}. \quad (10)$$

Коэффициент вариации дозы по периметру кроны равен:

$$V = \frac{S}{D_{cp}} = \frac{\sqrt{\int_{x_A}^{x_F} [D(s) - D_{cp}(q, a, r_i, h_i, w, n)]^2}}{D_{cp}(q, a, r_i, h_i, w, n)}. \quad (11)$$

Его величина зависит от параметров форсунки, а также от технических и технологических параметров опрыскивателя. Оптимальные параметры вычисляются в результате решения неравенства:

$$V = \frac{S}{D_{cp}} = \sqrt{\frac{\int_{x_A}^{x_F} [D(s) - D_{cp}]^2}{x_F - x_A}} \leq V_{доп}. \quad (12)$$

Для проведения расчетов по определению оптимальных параметров опрыскивателя преобразуем полученные формулы, записав величину перекрытия эпюр распределения n через параметры h_1 , h_2 и h_3 , характеризующие место размещения форсунок на штанге опрыскивателя

Выразив расстояние между форсунками 1 и 2 с учетом перекрытия n_1 и n_2 через Δh_1 , а между форсунками 2 и 3 – через Δh_2 , получим:

$$\begin{aligned} n_1 &= l - (h_2 - h_1), \\ n_2 &= l - (h_3 - h_2). \end{aligned} \quad (13)$$

Приравняв n_1 и n_2 , получим условие, при котором перекрытия будут равны:

$$(h_2 - h_1) = (h_3 - h_2). \quad (14)$$

Подставив значения n_1 и n_2 , выраженные через l , h_1 , h_2 , h_3 , в формулы (2) и (6), после преобразований получим:

$$V = \frac{S}{D_{cp}} = \sqrt{\frac{\int_{x_A}^{x_F} [D(s) - D_{cp}(q, a_1, a_2, a_3, r_1, r_2, r_3, h_1, h_2, h_3, w)]^2}{x_F - x_A}} \leq V_{доп}. \quad (15)$$

Характеристики периметра кроны α , β , γ (коэффициенты уравнения $\varphi(x) = ax^2 + \beta x + \gamma$) входят в пределы интегрирования x_A , x_F , которые вычисляются по формуле (9).

Верификацию разработанного алгоритма проводили для различных технологических и технических параметров опрыскивателя. Например, если $w = 1$ м, $r_1 = r_2 = r_3 = 0,5$ м, $q = 2,5$ л/мин, $a = 5,61$, $h_1 = 0,3$ м,

$h_2=0,8$ м, $h_3=1,3$ м, то средняя доза внесения рабочего раствора пестицида $D_{cp} = 174,6$ л/га ($0,017$ л/м²), коэффициент вариации $V = 4,94\%$.

Выводы. Разработали алгоритм аналитического расчета параметров штангового садового опрыскивателя, позволяющий оценить влияние на дозу внесения пестицидов и на качество распределения рабочей жидкости пестицидов, характеризующее коэффициентом вариации, с учетом параметров: эпюры распределения рабочей жидкости пестицидов, количества форсунок на вертикальной штанге опрыскивателя, высоты их расположения на штанге, расстояния от штанги до поверхности кроны, удаленности штан-

ги от ствола обрабатываемого дерева, периметра кроны. В результате верификации алгоритма при конкретных значениях параметров: расстоянии от вертикальной штанги до оси ствола дерева (кустарника) и форсунок до вертикальной штанги 1,0 и 0,5 м, высоте расположения форсунок на вертикальной штанге 0,3; 0,8 и 1,3 м, расходе рабочей жидкости 2,5 л/мин, коэффициенте, характеризующем эпюру распределения, 5,61 рассчитали дозу внесения рабочего раствора пестицида. Она равна 174,6 л/га при коэффициенте вариации 4,94%, что соответствует агротехническим требованиям на обработку пестицидами плодовых деревьев и кустарников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Куликов И.М., Утков Ю.А., Бычков В.В. Техническое оснащение современного промышленного садоводства и перспективы его совершенствования // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. №5. С. 3-8.
- Утков Ю.А. Исторические достижения, проблемы и перспективы развития промышленного садоводства России в современных условиях // *Плодоводство и ягодоводство России*. 2015. Т. 42. С. 219-223.
- Wang W.Z., Hong T.S., Li J., Zhang F.G., Lu Y.C. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies. *Transactions of the CSAE*. 2004. Vol. 20. 78-80.
- Al Heidary M., Douzals J.P., Sinfort C., Vallet A. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. *Crop Protection*. 2014. Vol. 637. 120-130.
- Duga A.T., Ruysen K., Dekeyser D., Nuyttens D., Bylemans D., Nicolai B., Verboven P. Spray deposition profiles in pome fruit trees: Effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics. *Crop Protection*. 2015. Vol. 67. 200-213.
- Cross J., Walklate P., Murray R., Richardson G. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 2. Effects of spray quality. *Crop Protection*. 2001b. Vol. 20(4). 333-343.
- Kasner E.J., Fenske R.A., Hoheisel G.A., Galvin K., Blanco M.N., Seto E.Y., and Yost M.G. 2018. Spray drift from a conventional axial fan airblast sprayer in a modern orchard work environment. *Annals of Work Exposure and Health*. 2015. Vol. 62(9). 1134-1146.
- Blanco M.N., Fenske R.A., Kasner E.J., Yost M.G. E. Seto, Austin E. Real-time monitoring of spray drift from three different orchard sprayers. *Chemosphere*. 2019. Vol. 222. 46-55.
- Chen L., Wallhead M., Zhu H., Fulcher A. Control of insects and diseases with intelligent variable-rate sprayers in ornamental nurseries. *Journal of Environmental Horticulture*. 2019. Vol. 37(3). 90-100.
- Zhang X., Luo Y., Goh K.S. Modeling spray drift and runoff-related inputs of pesticides to receiving water. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 234. 48-58.
- Patel M.K. Technological improvements in electrostatic spraying and its impact to agriculture during the last decade and future research perspectives – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2016. 9. 92-100.
- Escola A., Rosell-Polo J.R., Planas S., Gil E., Pomar J., Camp F., Llorens J., Solanelles F. Variable rate sprayer. Part 1 – Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013. Vol. 95. 122-135.
- Chen, L., M. Wallhead, H. Zhu, and A. Fulcher. Control of insects and diseases with intelligent variable-rate sprayers in ornamental nurseries. *Journal of Environmental Horticulture*. 2019. Vol. 37(3). 90-100.
- Chen Y., Ozkan H.E., Zhu H., Derksen R.C., Krause C.R. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE*. 2013. Vol. 56(6). 1263-1272.
- Solanelles F., Escola A., Planas S., Rosell J.R., Camp F., Gracia F. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 95. 473-481.
- Holownicki R., Doruchowski G., Swiechowski W., Godyn A., Konopacki P.J. Variable air assistance system for orchard sprayers; concept, design and preliminary testing. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 163. 134-149.
- Jeon H.Y., Zhu H., Derksen R.C., Ozkan H.E., Krause C.R., Fox R.D. Performance evaluation of a newly developed variable-rate sprayer for nursery liner applications. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2011. Vol. 54(6). 1997-2007.
- Zaidner G., Shapiro A. A novel data fusion algorithm for low-cost localisation and navigation of autonomous vineyard sprayer robots. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 146. 133-148.
- Lee I.N., Lee K.H., Lee J.H., You K.H. Autonomous greenhouse sprayer navigation using automatic tracking algorithm. *Applied Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 31. N1. 17-21.
- Jadav C.V., Jain K.K., Khodifad B.C. Spray of Chemicals as Affected by Different Parameters of Air Assisted Sprayer: A Review. *Current Agriculture Research Journal*. 2019. Vol. 7. 289-295.
- Pergher G., Petris R. Novel air-assisted tunnel sprayer for

- vineyards: optimization of operational parameters and first assessment in the Field. *Journal of Agricultural Engineering*. 2009. Vol. 146. 133-148.
22. Ahmad F., Qiu B., Dong, X., Ma, J., Huang X., Ahmed S., Ali Chandio F. Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 172. 105-350.
23. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45.
24. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55.

REFERENCES

- Kulikov I.M., Utkov Yu.A., Bychkov V.V. Tekhnicheskoe osnashchenie sovremennogo promyshlennogo sadovodstva i perspektivy ego sovershenstvovaniya [Technical equipment of modern industrial horticulture and prospects for its improvement]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2010. N5. 3-8 (In Russian).
- Utkov Yu.A. Istoricheskie dostizheniya, problemy i perspektivy razvitiya promyshlennogo sadovodstva Rossii v sovremennykh usloviyakh [Historical achievements, problems and prospects of commercial horticulture of Russia in contemporary conditions]. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii*. 2015. Vol. 42. 219-223 (In Russian).
- Wang W.Z., Hong T.S., Li J., Zhang F.G., Lu Y.C. Review of the pesticide precision orchard spraying technologies. *Transactions of the CSAE*. 2004. Vol. 20. 78-80 (In English).
- Al Heidary M., Douzals J.P., Sinfort C., Vallet A. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review. *Crop Protection*. 2014. Vol. 637. 120-130 (In English).
- Duga A.T., Ruysen K., Dekeyser D., Nuytens D., Bylemans D., Nicolai B., Verboven P. Spray deposition profiles in pome fruit trees: Effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics. *Crop Protection*. 2015. Vol. 67. 200-213 (In English).
- Cross J., Walklate P., Murray R., Richardson G. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer: 2. Effects of spray quality. *Crop Protection*. 2001b. Vol. 20(4). 333-343 (In English).
- Kasner E.J., Fenske R.A., Hoheisel G.A., Galvin K., Blanco M.N., Seto E.Y. and Yost M.G. 2018. Spray drift from a conventional axial fan airblast sprayer in a modern orchard work environment. *Annals of Work Exposure and Health*. 2015. Vol. 62(9). 1134-1146 (In English).
- Blanco M.N., Fenske R.A., Kasner E.J., Yost M.G. Seto E., Austin E. Real-time monitoring of spray drift from three different orchard sprayers. *Chemosphere*. 2019. Vol. 222. 46-55 (In English).
- Chen L., Wallhead M., Zhu H., Fulcher A. Control of insects and diseases with intelligent variable-rate sprayers in ornamental nurseries. *Journal of Environmental Horticulture*. 2019. Vol. 37(3). 90-100 (In English).
- Zhang X., Luo Y., Goh K.S. Modeling spray drift and runoff-related inputs of pesticides to receiving water. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 234. 48-58 (In English).
- Patel M.K. Technological improvements in electrostatic spraying and its impact to agriculture during the last decade and future research perspectives – A review. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2016. 9. 92-100 (In English).
- Escola A., Rosell-Polo J.R., Planas S., Gil E., Pomar J., Camp F., Llorens J., Solanelles F. Variable rate sprayer. Part 1 – Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013. Vol. 95. 122-135 (In English).
- Chen, L., Wallhead M., Zhu H. and Fulcher A. Control of insects and diseases with intelligent variable-rate sprayers in ornamental nurseries. *Journal of Environmental Horticulture*. 2019. Vol. 37(3). 90-100 (In English).
- Chen Y., Ozkan H.E., Zhu H., Derksen R.C., Krause C.R. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE*. 2013. Vol. 56(6). 1263-1272 (In English).
- Solanelles F., Escola A., Planas S., Rosell J.R., Camp F., Gracia F. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystems Engineering*. 2006. Vol. 95. 473-481 (In English).
- Holownicki R., Doruchowski G., Swiechowski W., Godyn A., Konopacki P.J. Variable air assistance system for orchard sprayers; concept, design and preliminary testing. *Biosystems Engineering*. 2017. Vol. 163. 134-149 (In English).
- Jeon H.Y., Zhu H., Derksen R.C., Ozkan H.E., Krause C.R., Fox R.D. Performance evaluation of a newly developed variable-rate sprayer for nursery liner applications. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2011. Vol. 54(6). 1997-2007 (In English).
- Zaidner G., Shapiro A. A novel data fusion algorithm for low-cost localisation and navigation of autonomous vineyard sprayer robots. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 146. 133-148 (In English).
- Lee I.N., Lee K.H., Lee J.H., You K.H. Autonomous greenhouse sprayer navigation using automatic tracking algorithm. *Applied Agricultural Engineering*. 2015. Vol. 31. N1. 17-21 (In English).
- Jadav C.V., Jain K.K., Khodifad B.C. Spray of Chemicals as Affected by Different Parameters of Air Assisted Sprayer: A Review. *Current Agriculture Research Journal*. 2019. Vol. 7. 289-295 (In English).
- Pergher G., Petris R. Novel air-assisted tunnel sprayer for vineyards: optimization of operational parameters and first assessment in the Field. *Journal of Agricultural Engineering*.

- ing. 2009. Vol. 146. 133-148 (In English).
22. Ahmad F., Qiu B., Dong, X., Ma, J., Huang X., Ahmed S., Ali Chandio F. Effect of operational parameters of UAV sprayer on spray deposition pattern in target and off-target zones during outer field weed control application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 172. 105-350 (In English).
23. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspekty tsifrovizatsii sistemy tekhnologii i mashin [Aspects of digitalization of the system of technologies and machines]. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian).
24. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Sozдание i razvitie sistem mashin i tekhnologii dlya kompleksnoy mekhanizatsii tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve [Creation and development of machine systems and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад авторов:

Смирнов И.Г. – научное руководство исследованием, постановка задачи, определение конфигурации алгоритма, разработка теоретических предпосылок, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи, формулирование выводов;

Личман Г.И. – разработка алгоритма аналитического расчета, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи, формулирование выводов;

Марченко Л.А. – анализ априорной информации, подготовка исходных данных, выбор и обоснование основных исследуемых параметров, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка текста статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Smirnov I.G. – scientific guidance, problem statement, determining the algorithm configuration, development of theoretical premises, analysis of the results, preparing the paper manuscript, formulating the conclusions;

Lichman G.I. – development of an analytical calculation algorithm, discussion and analysis of the results obtained, preparing the paper manuscript, formulating the conclusions;

Marchenko L.A. – a priori information analysis, preparing the initial data, selection and justification of the main study parameters, discussion and analysis of the results obtained, preparing the paper manuscript.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

07.09.2022
03.11.2022