

На правах рукописи

ДЕМБОВСКИЙ ИЛЬЯ АНДРЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ АДАПТИВНОЙ
РАСПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОДНООПОРНОГО ШТАНГОВОГО
ОПРЫСКИВАТЕЛЯ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Техносферная безопасность» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина».

Научный руководитель **Родимцев Сергей Александрович**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры сервиса и ремонта машин ФГБОУ ВО
«Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева»

Официальные оппоненты: **Борисенко Иван Борисович**,
доктор технических наук, главный научный
сотрудник, профессор кафедры «Земледелие и
агрехимия» ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ,
заслуженный изобретатель РФ

Дринча Василий Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологические системы
АПК» ФГБОУ ВО Арктический ГАТУ

Ведущая организация ФГБНУ «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ»

Защита состоится «25» сентября 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Н.Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение урожайности, сокращение затрат на производство сельхозпродукции и снижение ее потерь во многом обеспечивается 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. Мировой рынок химических препаратов для защиты растений будет расти, достигнув к 2027 г. 94,4 млрд долларов и в обозримой перспективе преимущественное использование пестицидов и удобрений остается безальтернативным.

При операции опрыскивания лишь 10...80% препарата попадает на объект защиты, до 40% СЗР распределяется по обрабатываемой поверхности крайне неравномерно. В реальных производственных условиях коэффициент вариации распределения рабочей жидкости по ширине захвата штанги способен превышать более 50% (при нормативе до 25% для малообъемного и обычного опрыскивания).

Нарушение процесса внесения СЗР и удобрений приводит ко многим негативным последствиям. При этом следует отметить негативное влияние снижения качества распределения препаратов при выполнении полевых работ в селекции и 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. Амплитуда вертикальных колебаний может составлять до 300 мм и более, вызывая соответствующее изменение ширины полосы обработки каждым распылителем до 38% и более.

Технические решения, относящиеся к самоходным, прицепным и навесным опрыскивателям, вследствие сложности и массивности конструкции не применимы для малогабаритных средств малой механизации, применяемых в селекционно-семеноводческом процессе. К примеру, на делянках II-III этапов используются одноопорные тачечные опрыскиватели, обладающие высокой мобильностью, простотой конструкции и малой массой. Они намного эффективнее ранцевых и ручных устройств, при внесении средств защиты и жидких удобрений на большинстве полевых культур. В то же время, единственная точка опоры не позволяет стабилизировать положение штанги, что ведет к нарушению равномерности распыла. В связи с этим разработка и оптимизация адаптивной распределяющей системы одноопорного штангового опрыскивателя, обеспечивающая компенсацию равномерности внесения средств защиты и стимулирования роста и развития растений, при вертикальных колебаниях штанги, является актуальной.

Степень разработанности темы. Работа направлена на решение задачи

повышения равномерности распределения рабочей жидкости по ширине обрабатываемой полосы, при вертикальных колебаниях штанги, на основе управления фронтальной геометрией факелов распыла.

В аналогичных трудах показано, что существенного снижения коэффициента неравномерности распределения препарата можно добиться изменением угла факела распыла во фронтальной проекции. Однако не создана работоспособная конструкция управляемого распылителя, не предложена концептуальная схема адаптивной распределяющей системы опрыскивателя, не рассмотрена теория распыла и формообразования факела рабочей жидкости, применительно к задаче оптимизации ключевых параметров управляемого распылителя.

Цель исследования. Повышение качества внесения рабочей жидкости одноопорным опрыскивателем, путем компенсации равномерности распыла при вертикальных колебаниях штанги, применением адаптивной распределяющей системы.

Задачи исследования:

- выполнить обзор конструкций малогабаритных опрыскивателей и анализ принципов управления геометрическими параметрами факела распыла жидкости распыливающими устройствами, с разработкой их классификаций;

- обосновать аналитические зависимости ширины захвата распылителя, и требуемого фронтального угла факела распыла жидкости от угла поперечного наклона распределяющей штанги, учитывающие конструктивные параметры одноопорного опрыскивателя;

- на основе анализа условий и характеристик процесса истечения, оптимизировать основные конструкционные параметры многорежимного распылителя для адаптивной распределяющей системы опрыскивателя;

- создать комплект опытных образцов многорежимного распылителя для адаптивной распределяющей системы одноопорного штангового опрыскивателя, а также разработать комплекс средств для проведения исследований в лабораторных и полевых условиях;

- на основе полученных экспериментальных данных выполнить технико-экономическое обоснование предложенных технических решений.

Объект исследования. Процесс поперечного распределения распыленных частиц рабочей жидкости адаптивной распределяющей системой одноопорного опрыскивателя.

Предмет исследования. Закономерности, характеризующие процесс формирования факела распыла многорежимным распылителем и распределения распыленных частиц истечения рабочей жидкости, с учетом конструктивно-технологических параметров адаптивной распределяющей системы, в соответствии с установленными агротехническими требованиями.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базируются на классических положениях гидромеханики, общих методах получения и анализа информации, математической статистики, геометрического и математического моделирования, методов

номограммирования функций нескольких переменных, планирования и обработки результатов эксперимента. Полевые испытания проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ 34630-2019, ГОСТ Р 54783-2011, ГОСТ 20915-2011, СТО АИСТ 6.3-2018, СТО АИСТ 7.3-2010.

Научная новизна. Научную новизну представляют:

- теоретическая зависимость ширины захвата распылителя от конструктивных параметров одноопорного опрыскивателя и угла поперечного наклона рамы;
- уравнение, характеризующее влияние угла положения одноопорного опрыскивателя на требуемый угол распыла, с учетом дистанции вылета многорежимного распылителя, относительно вертикальной оси, проходящей через точку опоры опрыскивателя;
- уточненная математическая зависимость максимальной ширины слоя жидкости на отражающей поверхности от свойств контактирующего твердого тела, самой жидкости, режимов ее истечения и угла натекания, с привязкой к кривизне отражающей поверхности по параметру радиуса кривизны для оптимизации ширины устья дефлектора распылителя;
- уравнение толщины сходящей пленки рабочей жидкости, учитывающее радиус и угол развертки сектора отражающей поверхности дефлектора;
- конструкция оригинального многорежимного дефлекторного распылителя для формирования управляемого угла факела распыла, обеспечивающего требуемую ширину полосы обработки, не зависимо от вертикальных колебаний штанги опрыскивателя, защищенная патентом РФ на полезную модель №224484;
- закономерности изменения коэффициента вариации распределения и дисперсности рабочей жидкости по ширине захвата штанги опрыскивателя от давления в гидромагистрали, угла установки штанги в поперечно-вертикальной плоскости и типа распыливающего устройства, с использованием метода факторной оптимизации.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработаны классификации средств малой механизации для внесения химических средств защиты растений, способов управления формой факела распыла, гидравлических струй;
- предложена номограмма для определения значений требуемого угла распыла многорежимного распылителя, в зависимости от угла наклона одноопорного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости и разработан алгоритм переключения режимов работы многорежимных распылителей адаптивной распределительной системы опрыскивателя с построением операционного графика;
- предложен алгоритм оптимизации рабочей скорости одноопорного штангового опрыскивателя, который может быть использован в формировании карт-заданий на технологическую операцию опрыскивания;
- разработан оригинальный многорежимный дефлекторный распылитель для формирования управляемого угла факела распыла, обеспечивающего

требуемую ширину обрабатываемой полосы, не зависимо от вертикальных колебаниях штанги опрыскивателя;

- сформулированы основные принципы функционирования адаптивной распределяющей системы одноопорного штангового опрыскивателя, обеспечивающие компенсацию равномерности и плотности распределения препарата при колебаниях штанги опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости;

- получены новые данные по характеристическим критериям процесса истечения рабочей жидкости применительно к дефлекторному распыливающему устройству;

- содержащиеся в работе научные положения и выводы, позволяют оптимизировать конструктивно-режимные параметры распыливающих устройств ударно-струйного типа на стадии их проектирования;

- разработанный комплекс лабораторных приборов и оборудования, а также материалы диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Орловский ГАУ.

Вклад автора в проведённое исследование. Представленные в работе научные данные получены при непосредственном личном участии автора в период с 2020 по 2025 гг в результате исследований, проведенных на базе ФГБОУ ВО “Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина” (г. Орел) и на полях НОПЦ «Интеграция» (с. Лаврово Орловского района Орловской области).

Достоверность результатов работы. Достоверность результатов исследований подтверждена экспериментальными данными. Ошибка в определении контролируемых показателей не превышала 5%. Адекватность теоретических положений подтверждена экспериментальными исследованиями по критериям согласия К. Пирсона, А.Н. Колмогорова, Р. Фишера.

Научные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся основные положения научной новизны и практической значимости выполненных исследований.

Апробация работы. Основные положения работы и результаты исследований доложены и одобрены на Всероссийских и Международных научно-практических конференциях на базах ФГБОУ ВО Орловский ГАУ, ФГБОУ ВО Орловский госуниверситет, г. Орел (2020-2025 гг.), XV Международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса», г. Ростов-на-Дону (2022г.), Международной научно-практической конференции (Международные Бочкаревские научные чтения) «Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства», г. Рязань (2023г.), Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Приоритетные задачи научно-технологического развития агропромышленного комплекса», г. Улан-Уде (2024г.), III Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы биологии, селекции, технологии, переработки сельскохозяйственных культур и экологии» (СІВТА-III-2024), г. Уфа (2024г.), X

Международной научно-практической конференции «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт», г. Тамбов (2024г.).

Экспериментальные исследования выполнены в лабораториях и на опытных полях ФГБОУ ВО Орловский ГАУ имени Н.В. Парахина и ФГБОУ ВО Орловский госуниверситет имени И.С. Тургенева (г. Орел).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 12 печатных работах, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 1 статья в международных изданиях (Scopus), а также получен патент РФ на полезную модель №224484. Объем публикаций составляет 5,86 п.л., из них автору принадлежит 4,80 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит введения, пяти разделов, заключения, списка принятых обозначений и сокращений, использованных терминов и определений, списка литературы и приложений. Работа изложена на 222 страницах, из них 194 страницы основной части, содержащая 54 иллюстраций и 15 таблиц, а также 3 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» дан прогноз объема рынка химических средств защиты растений в России; приведены предпосылки качества и эффективности химической защиты растений, экономические показатели процесса, степень его негативного влияния на окружающую среду; изучены технические и технологические решения задачи компенсации равномерности распределения препарата вследствие отклонения штанги опрыскивателя и рассмотрены соответствующие агротехнические требования; выполнен обзор конструкций малогабаритных опрыскивателей и предложена их классификация; проведен анализ принципов управления геометрическими параметрами факела распыла жидкости распылителями и разработана классификация способов управления формой факела распыла; классифицированы виды свободных гидравлических струй, применительно к задачам механизации защиты растений, сформулированы исходные условия реализации процесса распыла многорежимным распылителем; определены цель и задачи научного исследования.

Существенный вклад в практическое приложение теории распыливания жидкостей распыливающими устройствами дождевальными агрегатов и опрыскивателей внесли А.И. Есин, Л.А. Журавлева, А.П. Исаев, И.В. Лебедев, Г.В. Ольгаренко, Н.Ф. Рыжко, В.А. Шмонин и другие исследователи. Изучению равномерности опрыскивания растений при их защите от сорняков, вредителей и болезней посвящены труды ученых: В.А. Абубикерова, И.Б. Борисенко, В.А. Вялых, В.М. Дринчи, И.М. Киреева, А.К. Лысова, М.В. Мезниковой, Н.В.

Никитина, Ю.А. Уткова, А.А. Цымбала, Luck JD, Butts TR, Giles DK и других отечественных и зарубежных авторов. Здесь приводятся различные варианты инженерных и технологических решений задачи повышения качества и эффективности распыла. Результаты этих работ ориентированы, в основном, на навесные, прицепные и самоходные машины. К тому же, в большинстве исследований не ставится вопрос об управлении текущими параметрами распыла для нивелирования внешних возмущающих воздействий с целью повышения равномерности опрыскивания.

Между тем установлено, что при обработке посевов зерновых, зернобобовых и других полевых культур, возделываемых на небольших площадях с различной шириной междурядий эффективны одноопорные штанговые опрыскиватели тачечного типа. Ограничение применения таких средств механизации связано, во многом, их неустойчивостью в поперечно-вертикальной плоскости, что ведет к нарушению равномерности распыла по ширине захвата.

Обоснованное предположение о возможных путях решения данной задачи сформулировано научной гипотезой: «Компенсация равномерности распределения опрыскивателем рабочей жидкости по ширине захвата штанги, колеблющейся в поперечно-вертикальной плоскости, обеспечивается управлением текущими фронтальными проекциями углов факела распыла, формируемых адаптивным подключением секционных дефлекторных распылителей».

Во второй главе «Теоретическое обоснование распределяющей системы одноопорного штангового опрыскивателя и оптимизация параметров многорежимного распылителя» выполнен анализ влияния поперечных отклонений одноопорного опрыскивателя на ширину захвата полевого распылителя, расположенного на расстоянии l от оси симметрии опрыскивателя, проходящей через точку его опоры O (рис. 1).

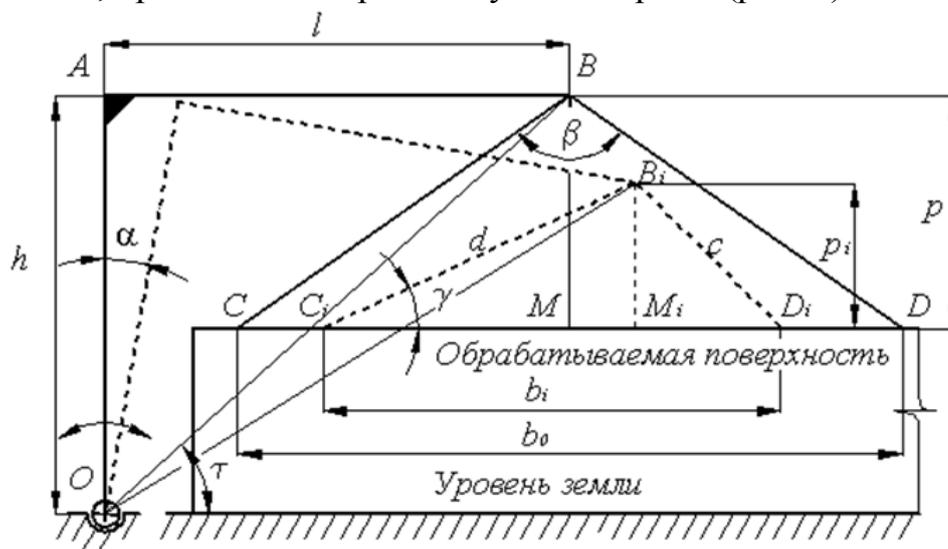


Рисунок 1 - Схема к расчету изменения ширины захвата факела распыла форсунок опрыскивателя, при колебаниях штанги в поперечно-вертикальной плоскости

Рассматривая равномерность η распределения препарата по ширине захвата, как функцию от угла α положения опрыскивателя, базовой высоты p штанги над обрабатываемой поверхностью, фронтального угла распыла β форсунок и расстояния l распылителей от оси колебаний

$$\eta = f(\alpha; p; \beta; l) \quad (1)$$

получены уравнения для определения ширины b_i полосы обработки одним распылителем, а также влияния угла α положения распределяющей штанги на требуемый угол β распыла, учитывающие геометрические параметры опрыскивателя и угол поперечного наклона штанги α , с учетом дистанции l вылета распылителя, относительно оси симметрии опрыскивателя:

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

$$\beta = 2 \arcsin \frac{b_0}{2 \left(\sqrt{\left[p - \left((h - \sqrt{h^2 + l^2}) \times \sin\left(\arctg \frac{h}{l} - \alpha\right) \right) \right]^2 + \left(\frac{b_0}{2} \right)^2} \right)} \quad (3)$$

где: h – высота установки штанги, относительно земли, м.; b_0 – расчетная ширина полосы обработки одним распылителем, м.

Графическая интерпретация выражений (2, 3) использована для построения оптимизационной номограммы, дающей возможность при любом положении штанги опрыскивателя получить значения текущих фронтальных углов распыла, удовлетворяющих допустимой ширине полосы обработки. Это позволило получить оптимальные параметры функционирования распылителей адаптивной распределяющей системы опрыскивателя, режимы переключения распылителей и операционный график функционирования адаптивной штанговой распределительной системы, при ее отклонениях в поперечно-вертикальной плоскости.

Базируясь на положениях, известных из теории смачивания гидрофобной поверхности, выполнен анализ процесса истечения для многорежимного распылителя, заключающийся в подаче некоего объема жидкости в устье дефлектора (рис. 2). Здесь жидкость контактирует с поверхностью, растекаясь и заполняя пространство между ограничивающими буртиками, формирующими требуемый угол факела распыла при сходе жидкости с дефлектора.

Используя законы сохранения энергии, массы и импульса, а также условий равновесия капли, с учетом поверхностных натяжений на границах разделов жидкость-газ, жидкость-твердое тело, твердое тело-газ и доли смоченной поверхности и ее шероховатости, рассмотрена зависимость максимальной ширины слоя жидкости на отражающей поверхности, от свойств контактирующего твердого тела, самой жидкости, режимов ее истечения и угла натекания:

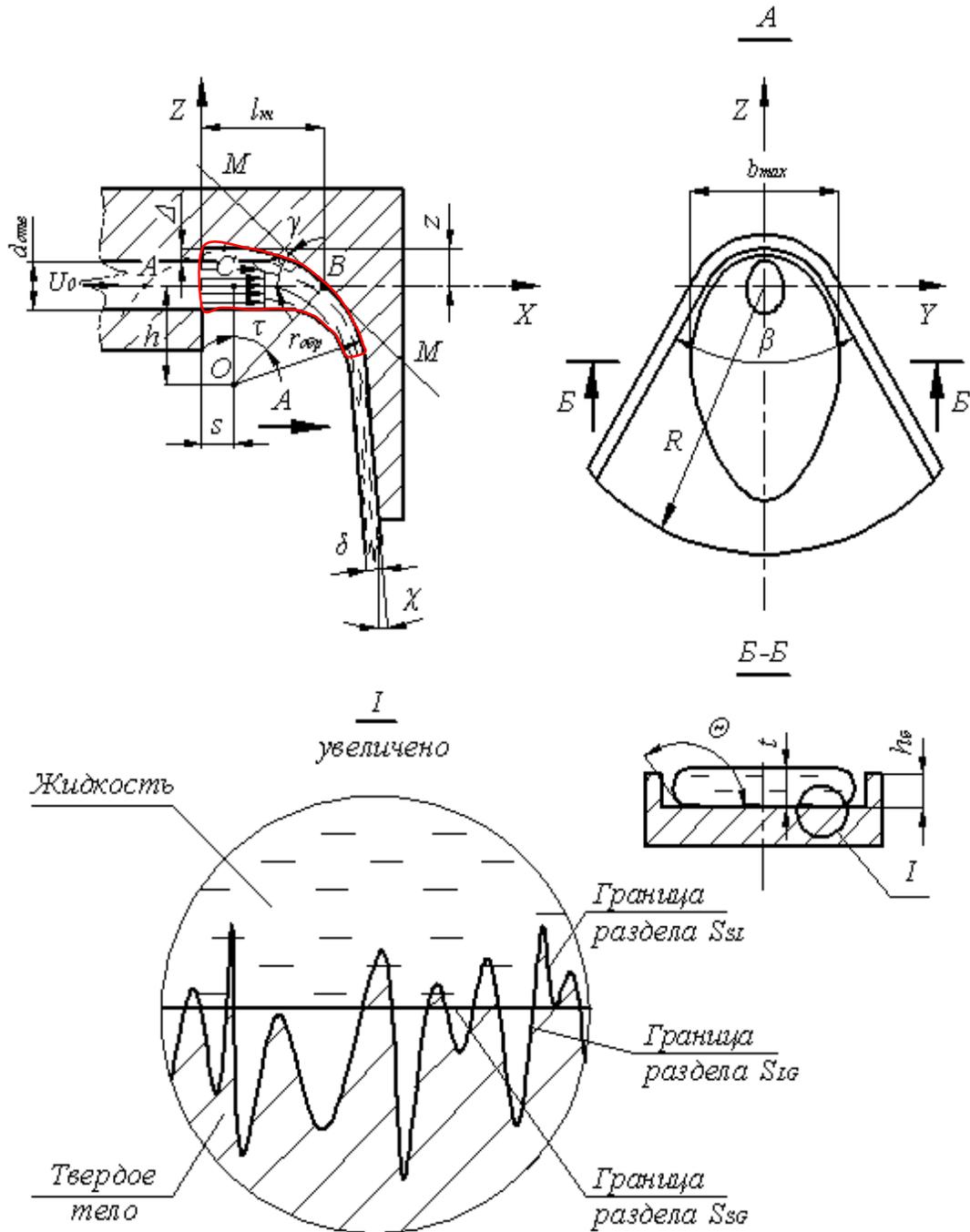


Рисунок 2 – Схема к обоснованию оптимальных параметров распылителя

$$b_{max} = \pi \frac{d_{отв}}{\cos \gamma} \left(\frac{1}{8} W_{e\Theta z} + \frac{1}{1 - \cos \Theta} \right) \quad (4)$$

где b_{max} - максимальная ширина слоя жидкости на отражающей поверхности, м;
 $W_{e\Theta z}$ - измененное по краевому углу Θ число Вебера перпендикулярной составляющей ω_z скорости потока; γ - угол натекания рабочей жидкости на отражающую поверхность дефлектора; Θ - краевой угол смачивания отражающей поверхности.

Представляя угол натекания рабочей жидкости на отражающую поверхность дефлектора углом γ между горизонтальной осью симметрии

потока и касательной М-М к радиусу отражающей поверхности в точке контакта В:

$$\cos \gamma = \frac{H}{r_{\text{обр}}} \quad (5)$$

где H – вертикальное расстояние от оси симметрии потока до центра окружности, образующей отражающую поверхность; $r_{\text{обр}}$ – радиус окружности, получена уточненная запись уравнения (4) с привязкой к кривизне отражающей поверхности по параметру $r_{\text{обр}}$:

$$b_{\text{max}} = \pi \frac{d_{\text{отв}}}{\cos\left(\arccos \frac{H}{r_{\text{обр}}}\right)} \left(\frac{1}{8} W_{\varepsilon\theta z} + \frac{1}{1 - \cos\theta} \right) \quad (6)$$

Считая, что радиус $r_{\text{обр}}$ должен обеспечить расстояние между соплом и точкой В контакта на дефлекторе не более длины $l_{\text{кч}}$ компактной части свободной струи, уравнение для оптимизации радиуса имеет вид:

$$r_{\text{обр}} = \frac{1}{2} \left(\frac{l_{\text{кч}}^2}{r_{\text{отв}} + \Delta} + (r_{\text{отв}} + \Delta) \right) \quad (7)$$

где Δ – зазор, между ограничивающей поверхностью распылителя и краем отверстия сопла.

Рассматривая процесс обтекания дефлектора рабочей жидкостью, как установившийся осредненный турбулентный, с плавно изменяющимся движением, при избыточном давлении и упрощая форму поверхности натекания до конической, с углом χ при вершине, составлено уравнение Бернулли для сечений в плоскости сопла и плоскости дефлектора:

$$\alpha_1 \frac{G^2}{2gs_1^2} - \alpha_2 \frac{G^2}{2gs_2^2} = \zeta \frac{\omega_1^2}{2g} + z_0 \quad (8)$$

где G – расход жидкости; s_1, s_2 – площади живых сечений; ζ – коэффициент местного сопротивления (коэффициент потерь); z_0 – сумма геометрических высот положения сечений.

Приближенно принимая $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, запись (8), относительно G дает:

$$G = \sqrt{\frac{2gz_0}{\left(\frac{1}{s_1^2} - \frac{1}{s_2^2}\right)(1+\zeta)}} = \sqrt{\frac{2gz_0 s_1^2}{\left(1 - \frac{s_1^2}{s_2^2}\right)(1+\zeta)}} = m_1 s_1 \sqrt{2gz_0} \quad (9)$$

Здесь, m_1 – коэффициент расхода рабочей жидкости, относительно сечения в плоскости отверстия.

Площади поперечного сечения потока в плоскостях сопла и дефлектора определены следующими выражениями:

$$s_1 = \pi \frac{d_{\text{отв}}^2}{4}, s_2 = \delta \pi \left(R \frac{(\beta - \beta')}{180} + \delta \cos\chi \right) \quad (10, 11)$$

где β – угол факела распыла, формируемый направляющими буртиками дефлектора, град; β' – угол внутреннего незаполненного сектора факела распыла последующих секций распылителя, град; χ – угол стока пленки жидкости с поверхности дефлектора (уклон отражающей поверхности), град.

Выражая параметр m_1 через критерий Fr Фруда, подставляя значения

площадей s_1 и s_2 и приравнявая к 0, после некоторых преобразований, имеем:

$$4 \frac{\delta^2}{d_{\text{отв}}^2} \sqrt{\frac{1}{1-(1+\zeta)}} + \frac{\delta R(\beta-\beta')}{45 d_{\text{отв}}^2 \cos \chi} \sqrt{\frac{1}{1-(1+\zeta)}} - \frac{\sqrt{\frac{Fr}{2}}}{\cos \chi} = 0 \quad (12)$$

Решение (11), относительно δ позволяет получить полное приведенное квадратное уравнение для определения толщины пленки рабочей жидкости, сходящей с поверхности дефлектора:

$$\delta^2 + \frac{R(\alpha-\alpha')}{180^\circ \cos \beta} \delta - k_0 \frac{d_{\text{отв}}^2}{4 \cos \beta} = 0 \quad (13)$$

где k_0 - поправочный коэффициент, учитывающий работу сил трения и кинетичность набегающего на отражающую поверхность потока жидкости.

Решая уравнение (13), определили толщину δ слоя рабочей жидкости, сходящей с кромки дефлектора и радиус R отражательной поверхности дефлектора, учитывая толщину δ , обуславливающую требуемый размер капель рабочей жидкости:

$$\delta = -\frac{R(\beta-\beta')}{360^\circ \cos \chi} + \sqrt{\left(\frac{R(\beta-\beta')}{360^\circ \cos \chi}\right)^2 + k_0 \frac{d_{\text{отв}}^2}{2 \cos \chi}}, \quad R = k_0 \frac{d_{\text{отв}}^2}{\delta(\alpha-\alpha')} 45^\circ - \delta \frac{\cos \beta}{(\alpha-\alpha')} 180^\circ \quad (14, 15)$$

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований. Разработка многорежимного распылителя для адаптивной распределяющей системы одноопорного штангового опрыскивателя» изложены программа, общие и частные методы экспериментальных исследований, обоснование применения и описание оригинального оборудования и методик, применяемых в лабораторных исследованиях и полевых испытаниях, дано описание объектов исследований.

Программой предусматривалось проведение лабораторных исследований и полевых испытаний с решением следующих вопросов: определение фактических значений амплитуды и размаха рабочих колебаний штанги одноопорного опрыскивателя; определение его допустимой скорости в производственных условиях; нахождение численных значений коэффициента расхода и критерия Рейнольдса для вновь спроектированного многорежимного распылителя; оценка зависимости ширины поперечного сечения потока на отражающей поверхности дефлектора от угла натекания; изучение равномерности распределения и дисперсности распыла рабочей жидкости по ширине захвата адаптивной распределяющей системы опрыскивателя в сравнительных испытаниях.

В качестве базового мобильного средства для разработки и исследования адаптивной распределяющей системы штангового опрыскивателя применялся разработанный в Орловском ГАУ макетный образец одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа, с приводом от малогабаритного ДВС.

На основании проведенных теоретических исследований, с целью снижения неравномерности распределения рабочей жидкости, при вертикальных колебаниях штанги разработан новый многорежимный распылитель (рис. 3); дано его описание; созданы 3D-модели и изготовлен комплект опытных образцов для монтажа на адаптивной распределяющей системе одноопорного опрыскивателя. Компенсация равномерности распыла

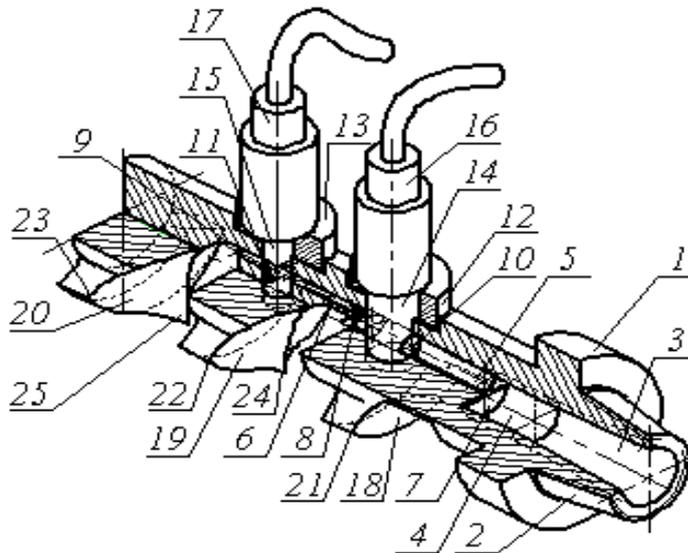


Рисунок 3 - Многорежимный распылитель: 1 – корпус; 2 – конический хвостовик; 3 – входной канал; 4-6 – секционные каналы; 7-9 – выходные отверстия; 10, 11 – регулирующие клапаны; 18-20 – дефлекторы; 21-23 – направляющие буртики; 24, 25 – центральное ребро

достигается последовательным включением в работу отдельных секций распылителя, снабженных отражающими дефлекторами, формирующими требуемый фронтальный угол факела распыла, в зависимости от положения штанги. Сформулированы основные принципы функционирования новой распределяющей системы.

Программа лабораторных исследований включала эксперименты на универсальном гидравлическом стенде, с целью проверки теоретических предпосылок и обоснования основных параметров и режимов работы адаптивной распределяющей системы, в ходе многофакторного эксперимента.

Программа полевых сравнительных испытаний одноопорного опрыскивателя, оборудованного базовой и экспериментальной распределяющей системами включала оценку равномерности внесения препарата, при обработке опытных посевов.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований элементов адаптивной распределяющей системы одноопорного опрыскивателя и их анализ» представлены основные результаты лабораторно-полевых исследований и дан их анализ.

Тестовыми испытаниями одноопорного опрыскивателя в производственных условиях установлено, что средние значения отрицательных (наклон вниз) и положительных (наклон вверх) колебаний боковой штанги имеют равную амплитуду $\pm 7^\circ$, при общем размахе 14° . Данные значения приняты в качестве определяющих условий для последующего теоретического обоснования режимов работы и конструктивного исполнения адаптивных распылителей, позволяющих управлять геометрией факела распыла.

Получены данные зависимости производительности и устойчивости рабочего положения распределительной штанги опрыскивателя, в зависимости

от поступательной скорости (табл. 1).

На основании полученных математических моделей зависимости Π и \bar{x}_α от рабочей скорости v опрыскивателя, методом координат выполнена оптимизация последней: при скорости движения $3,1 \text{ км ч}^{-1}$, производительность опрыскивателя составит $0,93 \text{ га ч}^{-1}$, при средневзвешенном значении амплитуды вертикальных колебаний штанги $5,3^\circ$.

Таблица 1. Влияние скорости движения одноопорного опрыскивателя на его производительность, Π и устойчивость, \bar{x}_α рабочего положения распределительной штанги

$v, \text{ км ч}^{-1}$ (м с^{-1})	2,0 (0,56)	2,5 (0,69)	3,0 (0,83)	3,5 (0,97)	4,0 (1,11)
$\Pi, \text{ га ч}^{-1}$	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20
$\bar{x}_\alpha, \text{ град}$	2,2	3,8	5,4	10,2	15,3

Определены характеристические критерии процесса истечения в оригинальном дефлекторном распылителе. Для принятых условий работы, значение коэффициента Рейнольдса при различных режимах истечения изменяется от $0,99 \times 10^4$ до $5,18 \times 10^4$. Последнее однозначно характеризует режим истечения, как неустойчивый турбулентный или переходный. Коэффициент расхода μ , в целом, имеет явную тенденцию к увеличению, с повышением давления в гидросистеме. На основании полученных данных определена суммарная площадь сопловых отверстий распылителя $F=5,9 \times 10^{-6} \text{ м}^2$, что соответствует диаметру каждого сопла многорежимного распылителя $1,5 \text{ мм}$.

Оценка краевого угла смачивания различных твердых сред позволяет предположить, что гидрофобность материала в зоне точки натекания (устье дефлектора) будет способствовать более компактной форме поперечного сечения потока; гидрофильность отражающей поверхности дефлектора обеспечит лучшие условия растекаемости.

Результаты эксперимента по исследованию изменения ширины поперечного сечения натекающего потока демонстрируют, что максимальная ширина потока в зоне встречи с отражающей поверхностью дефлектора определяется как углом натекания и давлением (скоростью потока), так и гидрофильными свойствами поверхности. Ширина поперечного сечения увеличивается с повышением давления и увеличением угла γ встречи. Наиболее компактной оказалась максимальная ширина растекания для стеклянной поверхности, обработанной моторным маслом ($\Theta=47^\circ$). Здесь, пределы значений b_{\max} при $\Delta P=0,1 \text{ МПа}$ ограничивались диапазоном $15 \dots 180 \text{ мм}$, при углах контакта $10 \dots 90^\circ$. Отсюда следует, что уменьшения габаритов устья дефлектора можно достичь увеличением гидрофобности отражающей поверхности в зоне контакта с набегающим потоком.

На рис. 4 изображен график зависимости b_{\max} от угла γ натекания потока на отражающую поверхность в зоне устья, при расчетном давлении $\Delta P=0,1 \text{ МПа}$

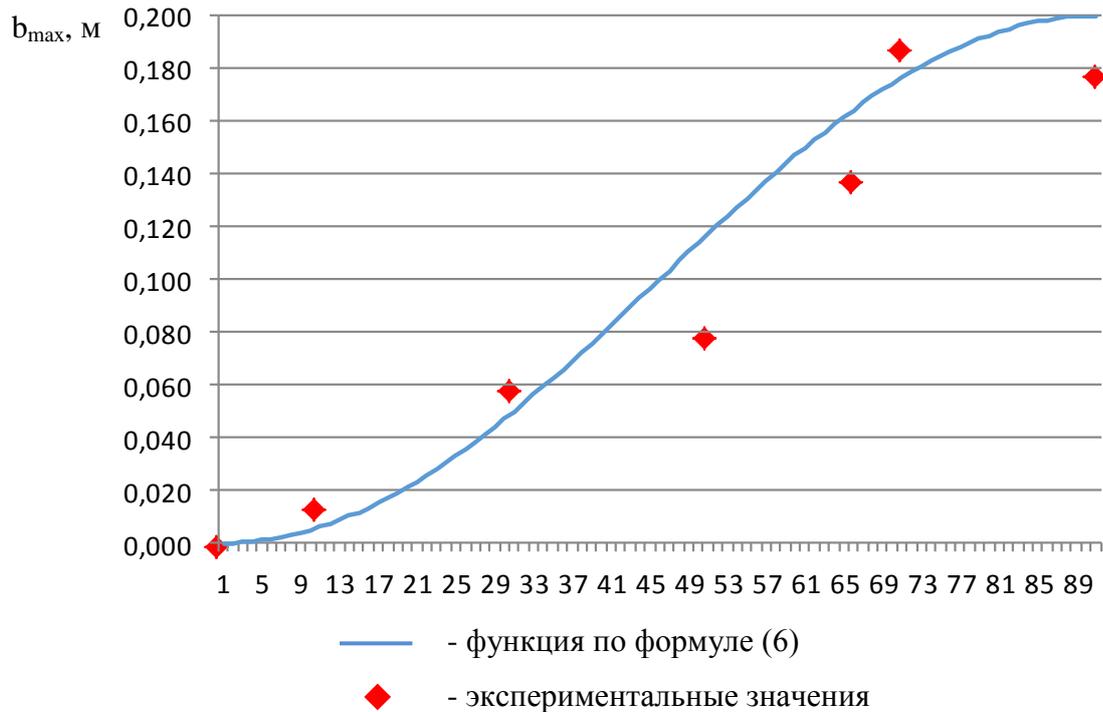


Рисунок 4 – Зависимость ширины поперечного сечения потока на отражающей поверхности дефлектора от угла γ натекания, для $\Theta=47^\circ$

для поверхности с краевым углом смачивания $\Theta=47^\circ$. Как видно, экспериментальные значения b_{\max} находятся в области теоретической кривой, описываемой уравнением (6). Среднее отклонение экспериментальных значений от теоретических не превышает 8%.

Полученные теоретические и экспериментальные данные использованы для установления основных конструктивных параметров многорежимного распылителя. Создание опытных образцов осуществлялось методом 3D печати (рис. 5).



Рисунок 5 – Общий вид опытного образца многорежимного распылителя

Стендовыми испытаниями установлено, что равномерность распределения рабочей жидкости по длине штанги в значительной степени зависит от рабочего режима гидросистемы и положения штанги в вертикальной плоскости. Для всех сравниваемых вариантов коэффициент вариации распределения жидкости снижался при увеличении давления в гидросистеме стенда. Отрицательный наклон штанги ведет к резкому снижению равномерности распыла по ширине

захвата. Увеличение угла установки распределительной штанги в поперечно-вертикальной плоскости, напротив, способствует некоторому повышению равномерности распыла. Однако, при работе адаптивной системы распределения (комплектование многорежимными распылителями), влияние угла наклона штанги на равномерность распределения жидкости существенно ниже. Важно, что данный эффект особенно очевиден при отрицательных углах положения штанги.

Средние значения k_v распределения жидкости, при работе стандартных распылителей ТКР 130 Tecomex и FT 140-01 Lechler составляют 51,9%, 34,8% и 30,8%, при углах установки штанги -8° , 0° и $+8^\circ$, соответственно; адаптивной системы распределения - 43,9%, 37,1% и 34,1% (рис. 6). Следовательно, применение адаптивной распределительной системы опрыскивателя

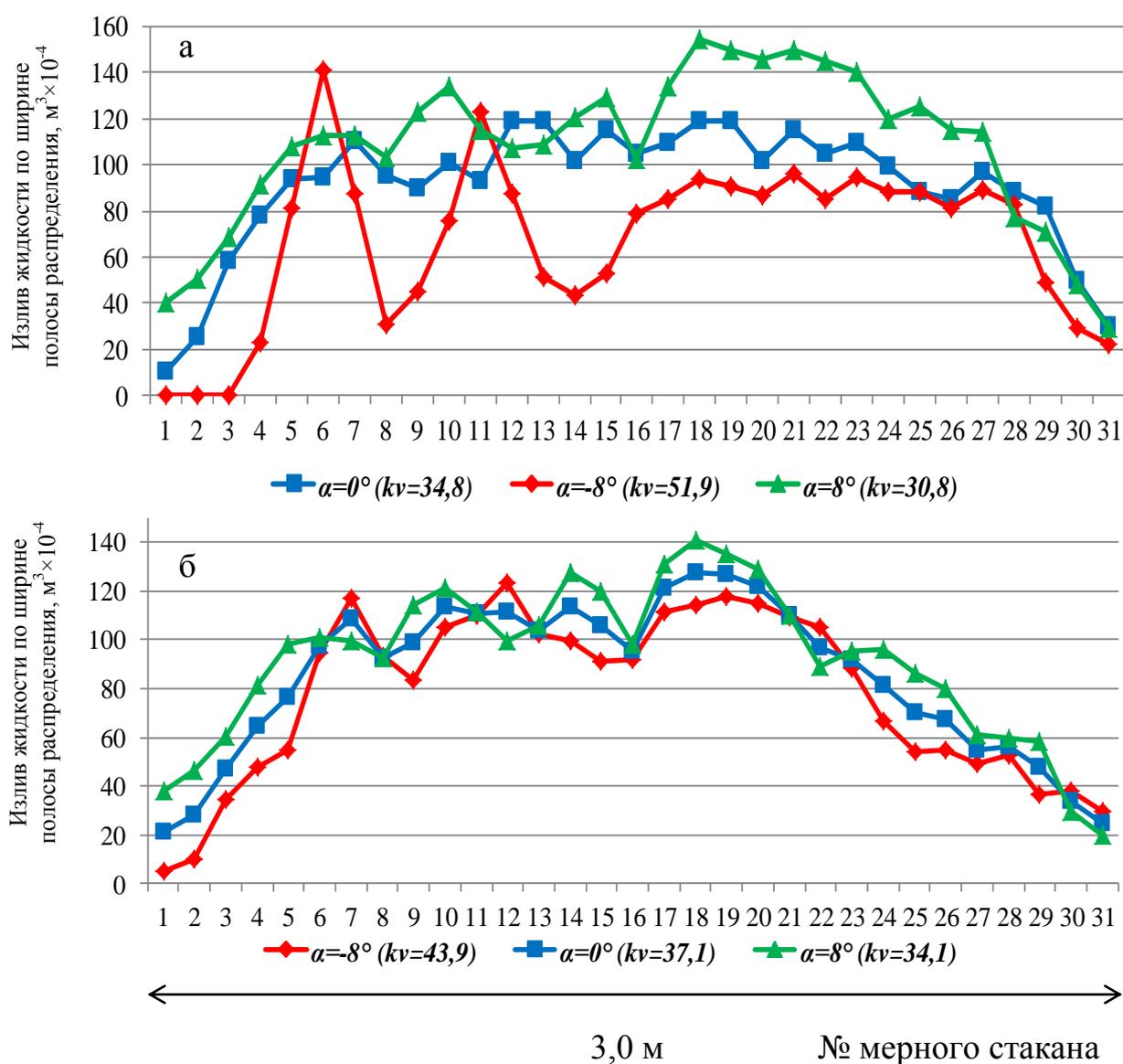


Рисунок 6 – Гистограммы пролива сравниваемых типов распылителей по ширине захвата штанги, при различном ее положении в поперечно-вертикальной плоскости: ТКР 130 Tecomex и FT 140-01 Lechler (среднее) (а); опытные образцы многорежимного распылителя (б)

компенсирует негативное влияние поперечных колебаний штанги за счет повышения равномерности распределения жидкости, не менее чем в 2,5 раза, относительно типовой системы.

Дисперсность распыла снижается при повышении давления в гидросистеме и увеличении расстояния до обрабатываемой поверхности. Средние диаметры капель, сформированных распылителями ТКР 130 Tecomes, FT 140-01 Lechler и новым многорежимным устройством, при номинальном давлении и установленном расстоянии до объекта обработки, составили 348, 457 и 431 мкм. Для нового распыливающего устройства дисперсионные характеристики составили 181...409 мкм – 36,4%; 410...0,667 мкм – 43,6%; 668...962 мкм – 20,0%.

Плотность покрытия составила 42 см^{-2} ; 29 см^{-2} и 39 см^{-2} , соответственно, для распылителей ТКР 130 Tecomes, FT 140-01 Lechler и нового распыливающего устройства. Плотность распределения увеличивалась при повышении давления в гидросистеме и увеличения расстояния до объекта обработки.

Анализ данных факторного эксперимента позволил получить математические модели изменения коэффициента вариации распределения (Y_{kv}) и дисперсности (Y_d) распыла по ширине захвата штанги опрыскивателя, при влиянии действующих факторов (давлении в гидросистеме, x_1 ; угла положения штанги, x_2 и типа распыливающего устройства, x_3):

$$Y_{kv} = 34,9 + 4,5x_1 - 10,0x_2 + 2,6x_3 + 2,6x_1^2 + 8,1x_2^2 - 6,3x_2x_3 \quad (16)$$

$$Y_d = 0,38 - 0,05x_1 - 0,04x_2 - 0,02x_3 + 0,03x_2^2 + 0,09x_3^2 - 0,03x_2x_3^2 \quad (17)$$

На рис. 7 демонстрируются поверхности отклика параметров оптимизации Y_{kv} и Y_d на изменение влияющих условий, а также линии равных уровней для функций Y_{kv} , $Y_d=f(P, \alpha)$ по результатам факторного эксперимента для нового многорежимного распылителя.

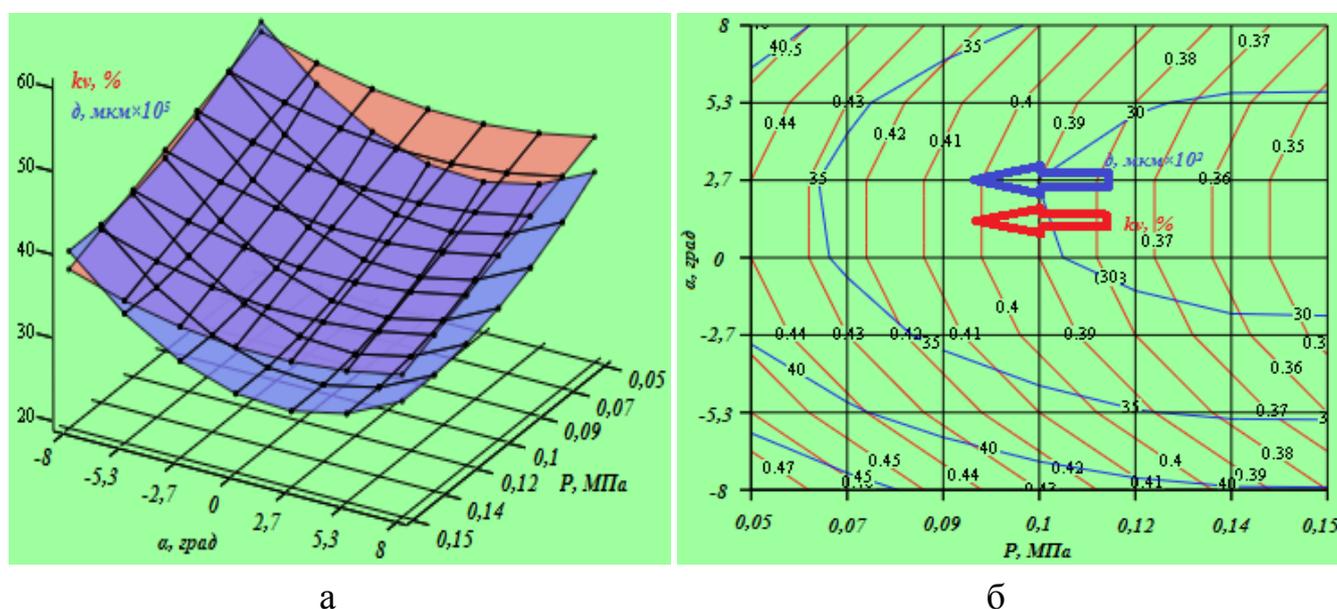


Рисунок 7 – Поверхность отклика Y_{kv} , $Y_d=f(P, \alpha)$, для экспериментальных распылителей (а) и изолинии соответствующих функций (б)

Экстремумы принадлежат режиму функционирования гидросистемы $P=0,12$ МПа. В данном случае коэффициент вариации распределения рабочей жидкости составит $k_v=28\%$, а средний диаметр d распыленных частиц будет равен 395 мкм. Дальнейшее увеличение давления ведет к некоторому повышению равномерности распыла, однако, при этом снижается средний диаметр частиц и возрастает доля мелкой фракции. Последнее повышает риск сноса частиц и ухудшает качественные и экологические показатели технологического процесса опрыскивания.



Рисунок 8 – Полевые испытания распределяющей системы одноопорного штангового мотоопрыскивателя

Сравнительные испытания адаптивной и типовой штанговой распределяющих систем осуществлялись на опытных полях научно-образовательного производственного центра «Интеграция» ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ» (рис. 8). В первом случае одноопорный опрыскиватель оснащался комплектом опытных оригинальных адаптивных распылителей. Сравнимый вариант – использование стандартных распылителей ТКР 130 Тесмес дефлекторного типа (табл. 2).

Таблица 2. Качественные параметры опрыскивания в полевых условиях с применением типовой и адаптивной распределяющих систем

Тип распределяющей системы опрыскивателя	Качественные параметры опрыскивания, при положении распределяющей штанги								
	Коэффициент вариации распределения жидкости, % $\pm\sigma$			Средний диаметр распыленных частиц, мкм $\pm\sigma$			Плотность покрытия, $\text{см}^{-2} \pm\sigma$		
	-8°	0°	8°	-8°	0°	8°	-8°	0°	8°
Типовая	53,3 $\pm 2,2$	28,6 $\pm 0,9$	36,6 $\pm 2,1$	421 ± 98	398 ± 62	380 ± 42	41 $\pm 1,8$	30 $\pm 1,1$	21 $\pm 2,0$
Адаптивная	35,2 $\pm 1,8$	30,4 $\pm 1,6$	32,4 $\pm 1,1$	415 ± 58	405 ± 81	386 ± 59	39 $\pm 1,0$	32 $\pm 0,7$	22 $\pm 1,4$

Как видно, сравнительная отзывчивость коэффициента вариации на изменение положения штанги для тестируемых распределяющих систем в полевых условиях аналогична результатам стационарного эксперимента. Так, при отрицательном уклоне штанги ($\alpha=-8^\circ$) разница k_v , относительно исходного

положения ($\alpha=0^\circ$) составила 24,7% - для типовой системы, против лишь 4,8% - для адаптивной, или на 19,9%, что доказывает преимущество разрабатываемой распределяющей системы.

В пятой главе «Технико-экономическая эффективность применения адаптивной распределяющей системы одноопорного опрыскивателя» выполнено экономическое обоснование применения предлагаемой разработки, свидетельствующее о ее преимуществе, по сравнению с базовым вариантом и возможности внедрения адаптивной распределяющей системы в производство. Расчет производился из условия 2-х кратной обработки нормативной площади 5,3 га. Показано, что за счет увеличения урожайности культур при повышении равномерности внесения препарата и сокращению расходов на его приобретение, сравнительный экономический эффект от применения опрыскивателя с адаптивной распределяющей системой составит 298332,83 руб., при сроке окупаемости дополнительных капитальных вложений по балансовой и чистой прибыли – не более 1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Оптимальным решением повышения равномерности опрыскивания при вертикальных колебаниях штанги может стать управление текущими фронтальными проекциями углов факела распыла. На основании обзора известных решений разработаны: классификация средств малой механизации для защиты растений и внесения удобрений; классификация, включающая 9 основных признаков распыливающих устройств по способу регулирования геометрии факела распыла; классификация гидравлических струй, представленная 11-ю классами признаков, имеющих наибольшее значение при изучении процесса истечения в распыливающих устройствах средств механизации сельского хозяйства.

2. Получены уравнения для определения ширины захвата распылителя и влияния угла положения штанги на требуемый угол распыла, учитывающие конструктивные параметры одноопорного опрыскивателя и угол его поперечного наклона. Установлено, что при отклонениях штанги на угол от -15° до $+20^\circ$ в поперечно-вертикальной плоскости, ширина полосы обработки одним распылителем изменяется больше чем в 1,8...3,1 раза. Предложена номограмма для определения значений требуемого угла распыла многорежимного распылителя, в зависимости от угла наклона штанги; представлена таблица численных значений фронтальных углов факела распыла каждого распылителя, учитывающие их удаление от плоскости симметрии опрыскивателя.

3. Основываясь на исследовании условий процесса истечения, уточнена предложенная ранее запись уравнения для определения максимальной ширины слоя жидкости на отражающей поверхности, с привязкой к кривизне отражающей поверхности по параметру радиуса кривизны для оптимизации ширины устья дефлектора распылителя. Выведено уравнение толщины

сходящей пленки рабочей жидкости, учитывающее радиус и угол развертки сектора отражающей поверхности дефлектора. Теоретически обоснованы геометрические характеристики основных конструктивных элементов нового многорежимного распылителя.

4. Разработан комплект оригинальных многорежимных дефлекторных распылителей для формирования управляемых углов факела распыла, обеспечивающих требуемую равномерность обработки, при вертикальных колебаниях штанги опрыскивателя (Патент РФ №224484). Разработаны универсальный экспериментальный гидравлический стенд, устройства для исследования расходных характеристик распылителя и изучения зависимости ширины поперечного сечения потока на отражающей поверхности от угла натекания рабочей жидкости. Предложен алгоритм оптимизации рабочей скорости малогабаритного штангового опрыскивателя тачечного типа. Сформулированы основные принципы функционирования адаптивной распределяющей системы одноопорного штангового опрыскивателя.

5. Установлено, что средние значения рабочих колебаний боковой штанги уравновешенного одноопорного опрыскивателя имеют амплитуду $\pm 7^\circ$, при общем размахе колебаний 14° . Оптимальная скорость движения опрыскивателя равна $3,1 \text{ км ч}^{-1}$. При этом производительность опрыскивателя составит $0,93 \text{ га ч}^{-1}$, при средневзвешенном значении амплитуды вертикальных колебаний штанги $5,3^\circ$. Экспериментально получены значения характеристических критериев процесса истечения и показатели гидрофобности рабочих поверхностей для нового распылителя; обоснованы его основные конструктивные параметры. Среднее значение коэффициента вариации для адаптивной системы распределения позволяет утверждать о повышении равномерности распределения жидкости, не менее чем в 2,5 раза, относительно типовой системы. Годовая технико-экономическая эффективность использования одноопорного штангового опрыскивателя, оснащенного адаптивной распределяющей системой составляет 298332,83 руб., при сроке окупаемости не более 1 года.

Рекомендации производству и перспективы дальнейших исследований

Предлагаемые многорежимный дефлекторный распылитель и адаптивная распределяющая система одноопорного штангового опрыскивателя, обеспечивающие компенсацию равномерности и плотности распределения препарата при колебаниях штанги в поперечно-вертикальной плоскости могут быть востребованы при выполнении технологических операций по защите и стимулированию роста и развития растений, как в селекционно-семеноводческом процессе, так и в «большом» производстве.

Содержащиеся в работе научные положения и выводы, позволяют оптимизировать конструктивно-режимные параметры распыливающих устройств ударно-струйного типа на стадии их проектирования, а алгоритм оптимизации рабочей скорости одноопорного штангового опрыскивателя может быть использован в формировании карт-заданий на технологическую операцию опрыскивания.

Предлагаемые инженерно-технологические решения рекомендованы к использованию в ФИЦ «Немчиновка» Московской области, ФГБНУ «ВНИИЗР» Воронежской области, внедрены в производственный процесс опытного поля ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина».

В дальнейшем, одним из перспективных решений технической реализации принципа управляемого распыла может стать применение отражающей поверхности веерного типа. Адаптивное управление центральным углом веерного отражателя и угла натекания обеспечит требуемый текущий угол факела распыла. Исполнение распыливающего устройства в виде мехатронного модуля позволит решить все функциональные задачи адаптивного распылителя в едином унифицированном узле.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Дембовский, И.А. Обоснование пределов изменения корневых углов распыла адаптивного распылителя опрыскивателя / С.А. Родимцев, И.А. Дембовский // Тракторы и сельхозмашины. - 2024. - Т. 91. № 1.- С. 81-90.
2. Дембовский, И.А. Классификация свободных гидравлических струй, применительно к задачам механизации защиты растений / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев, А.В. Паничкин // Аграрный вестник Верхневолжья. - 2024. - № 4 (49). - С. 94-104.
3. Дембовский, И.А. Концепция применения адаптивной штанговой распределительной системы малогабаритного одноопорного опрыскивателя / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев // Агроинженерия. - 2024. - Т. 26. № 3. - С. 27-36.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и Web of Science:

4. Dembovskiy I., Rodimtsev S. Optimization of the current spray angle of the nozzles of the adaptive distribution system of a single-support boom sprayer. International Conference on Ensuring Sustainable Development: Ecology, Energy, Earth Science and Agriculture (AEES2023). Les Ulis, France, 2024. С. 4044.

Публикации в других изданиях:

5. Дембовский, И.А. Управляемая распыливающая система для штанговых аэродромных распределителей реагентов / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. –№1-2 (88). – С. 93-100.
6. Дембовский, И.А. Оптимизация рабочей скорости одноопорного штангового опрыскивателя тачечного типа / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев // В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. Материалы X-й Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию Института архитектуры, строительства и

транспорта Тамбовского государственного технического университета. Тамбов. - 2024. - С. 134-139.

7. Дембовский, И.А. Анализ принципов управления геометрическими параметрами факела распыла жидкости распыливающими устройствами / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев // В сборнике: Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАСХН и НАНКС академиков МАЭП и РАВН Бочкарева Я.В. Рязань.- 2024. - С. 233-238.

8. Дембовский, И.А. Оптимизация параметров распыла адаптивной системы распределения штангового опрыскивателя / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев // В сборнике: Приоритетные задачи научно-технологического развития агропромышленного комплекса. Материалы всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук и Дню Российской науки. Улан-Удэ. - 2024.- С. 417-423.

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

10. Дембовский, И.А. Определение величины колебаний штанги тачечного опрыскивателя в поперечно-вертикальной плоскости / И.А. Дембовский, С.А. Родимцев // В сборнике: Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции. Редколлегия: И.М. Донник [и др.]. Ростов-на-Дону. - 2022. - С. 169-173.

11. Дембовский, И.А. Методы и средства определения характеристик распылителей опрыскивателей / И.А. Дембовский // Научный журнал молодых ученых. - 2020. - № 3 (20). - С. 54-67.

Патенты РФ:

12. Патент № RU 224484 U1 МПК А01М 7/00 ФГБОУ ВО Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева. Заяв. 20.12.2023. Регулируемый дефлекторный распылитель / Родимцев С.А., Дембовский И.А., Родичев А.Ю., Кулев А.В., Кулев М.В., Ломакин Д.О. (РФ). - Оpubл. 27.03.2024 Бюл. №9.