

*На правах рукописи*



**Мишхожев Кантемир Владиславович**

**ПАРАМЕТРЫ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ  
ГЕРБИЦИДНОЙ УСТАНОВКИ С ПНЕВМОАКУСТИЧЕСКИМ  
РАСПЫЛИТЕЛЕМ ДЛЯ УХОДА ЗА ПЛОДОВЫМИ НАСАЖДЕНИЯМИ  
В ТЕРРАСНОМ САДОВОДСТВЕ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса (технические науки)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Нальчик – 2025**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования  
«Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет  
имени В.М. Кокова» (ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ)

**Научный руководитель:** **Шекихачев Юрий Ахметханович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Кабардино-Балкарский государственный аграрный  
университет имени В.М. Кокова», кафедра «Техни-  
ческая механика и физика», профессор

**Официальные оппоненты:** **Мезникова Марина Викторовна**  
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Волгоград-  
ский государственный аграрный университет»,  
научно-исследовательский институт фундаменталь-  
ных и прикладных агробiotехнологий, центр разра-  
ботки и апробации сельскохозяйственных машин и  
оборудования, старший научный сотрудник

**Османов Энвер Шевхийевич**  
кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО  
«Крымский федеральный университет имени В.И. Вер-  
надского», Институт «Агротехнологическая акаде-  
мия», кафедра «Технические системы в агробиз-  
несе», доцент

**Ведущая организация:** **ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» (г. Ставрополь)**

Защита состоится «05» декабря 2025 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.015.02 при ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в, ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ, корп. 1, каб. 17, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» <http://kbgau.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г., размещен на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://minobrnauki.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» <http://kbgau.ru/>.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Фиापшев  
Амур Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Борьба с сорной растительностью в приствольных полосах плодовых насаждений является одной из основных проблем в террасном садоводстве. Данный технологический процесс осложняется тем, что подход к линии ряда плодовых насаждений имеется только со стороны полотна террасы, другая же сторона ограничивается откосом террасы. В связи с этим применение косилочных устройств позволяет обрабатывать только одну сторону приствольных полос, другую сторону обрабатывают вручную с использованием бензиновых триммеров, что приводит к большим затратам труда и денежных средств.

В настоящее время рынок сельскохозяйственной техники предлагает сельскохозяйственным производителям большой типаж отечественных и зарубежных гербицидных установок, имеющие различные конструктивно-технологические отличия. Однако опыт использования гербицидных установок в равнинном интенсивном садоводстве показал, что эффективность их работы обеспечивается при двухкратном проходе вдоль линии ряда, что невозможно обеспечить в условиях террасного садоводства. Кроме этого современные гербицидные установки имеют ряд недостатков: используемые распылители имеют грубый и неоднородный распыл рабочей жидкости, что приводит к большому расходу дорогостоящего препарата и рабочей жидкости, отсутствует возможность оперативного регулирования высоты установки и ширины захвата рабочего органа из кабины трактора при различных параметрах колеи и ширины междурядий сада, затруднен перевод рабочего органа из транспортного положения в рабочее положение. В связи с этим возникает необходимость разработки принципиально новой конструктивно-технологической схемы гербицидной установки, позволяющая обрабатывать приствольные полосы плодовых насаждений на террасированных склонах при однократном проходе вдоль линии ряда, обеспечивающая однородность дисперсности распыла капель рабочей жидкости и их равномерное распределение на листовой поверхности сорных растений.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский ГАУ «Разработка инновационных технологий и технических средств по уходу за плодовыми насаждениями в горном и предгорном садоводстве», научно-исследовательской работы по теме «Разработка технологии и технических решений по уходу за кроной плодовых насаждений в садах на склоновых землях Кабардино-Балкарской Республики, обеспечивающих получение экологически чистой продукции» (ЕГИСУ НИОКТР № 225032413902-3).

**Степень разработанности темы.** Изучению опрыскивания растений при их защите от сорняков, вредителей и болезней посвящены труды ученых: В. А. Абубикерова, И. Б. Борисенко, В. Г. Бросалина, И. Н. Велецкого, В. С. Григорьева, А. И. Завражнова, М. В. Данилова, П. А. Догоды, В. Ф. Дунского, И. М. Киреева, З. М. Коваль, К.А. Манаенкова, М.В. Мезниковой, Н. В. Никитина, Э. Ш. Османова, Ю. А. Уткова, В. В. Цыбулевского, А. А. Цымбала и др. Несмотря на большое количество исследований процесса нанесения гербицида на листовую поверхность сорных растений целевыми распылителями, недостаточное внимание уделено пневмоакустическому распылителю, обеспечивающему однородность дисперсности распыла капель рабочей

жидкости и их равномерное распределение на листовой поверхности сорных растений.

**Рабочая гипотеза** – обеспечение однородности дисперсности распыла капель рабочей жидкости и их равномерное распределение на листовой поверхности сорных растений может быть достигнуто путем определения оптимальных параметров и режимов работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для ухода за плодовыми насаждениями в террасном садоводстве.

**Цель работы** – обоснование параметров и режимов работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для ухода плодовыми насаждениями в террасном садоводстве, обеспечивающих однородность дисперсности распыла капель рабочей жидкости и их равномерное распределение на листовой поверхности сорных растений при однократном проходе установки вдоль линии ряда плодовых насаждений.

**Объект исследования** – технологический процесс внесения гербицида в приствольные полосы плодовых насаждений пневмоакустическим распылителем.

**Предмет исследования** – закономерности, связывающие параметры и режимы работы пневмоакустического распылителя гербицидной установки с показателями дисперсности распыла капель рабочей жидкости и равномерности их распределения на листовой поверхности сорных растений.

**Задачи исследования.**

1. Разработать новую конструктивно-технологическую схему гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для ухода за плодовыми насаждениями в террасном садоводстве.

2. Разработать математическую модель мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве, уравнения транспорта дисперсной фазы внутри распылительного устройства, для их реализации в программном комплексе Comsol Multiphysics, позволяющие описать процессы движения газа и капель раствора гербицидов, как единый поток их смеси.

3. Провести компьютерное моделирование процесса распыления рабочей жидкости пневмоакустическим распылителем и установить рациональные конструктивно-технологические параметры и режимы работы установки.

4. Оптимизировать основные параметры и режимы работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем по критериям однородности дисперсности распыла капель рабочей жидкости и равномерности их распределения на листовой поверхности сорных растений.

5. Разработать опытный образец гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем и провести его полевые испытания.

6. Оценить экономическую эффективность использования предлагаемой гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем.

**Научную новизну** работы составляют:

- математическая модель мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве на базе уравнений Навье-Стокса,  $k - \varepsilon$  модели турбулентного потока, а также уравнения транспорта дисперсной фазы внутри распылительного устройства, позволяющая описать процессы движения газа и капель раствора гербицидов, как единый поток их смеси;

- компьютерная модель мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве в ПО Comsol Multiphysics, которая включает в себя начальные и граничные условия и учитывающая плотность и вязкость смеси газа и капель гербицидного раствора, аналитически рассчитанную его скорость на входе в сопло;

- математические модели в виде уравнений регрессии, позволяющие установить оптимальные параметры и режимы работы гербицидной установки;

- зависимости качественных показателей дисперсности распыла капель рабочей жидкости и равномерности их распределения на листовой поверхности сорных растений от конструктивных параметров и режимов гербицидной установки.

**Теоретическую значимость** работы представляют: математические модели, описывающие процесс работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для ухода за плодовыми насаждениями в террасном садоводстве, позволяющие обосновать основные конструктивно-технологические параметры предлагаемой установки.

**Практическую значимость** работы представляют: конструктивно-технологическая схема гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем жидкости, позволяющая разработать техническое решение конструкции гербицидной установки, обеспечивающей качественную обработку приствольной полосы плодовых насаждений за один проход в интенсивном террасном садоводстве; опытный образец гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем жидкости, позволяющий осуществлять уход за плодовыми насаждениями в интенсивном террасном садоводстве за один проход вдоль линии ряда при обеспечении однородности дисперсности распыла капель рабочей жидкости и их равномерном распределении на листовой поверхности сорных растений; соотношение между параметрами и режимами работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем с показателями однородности дисперсности распыла капель рабочей жидкости и равномерности их распределения на листовой поверхности сорных, обеспечивающее качественную обработку приствольных полос плодовых насаждений на террасированных склонах.

**Техническая новизна** предложенного конструктивного решения подтверждена патентом РФ № 210870 на полезную модель.

**Методы исследований.** Теоретические исследования проведены с использованием основных положений высшей математики и теоретической механики, метода конечных элементов с использованием современного ПО Comsol Multiphysics. Экспериментальные исследования проведены с использованием теории планирования многофакторного эксперимента. Опыты проведены в лабораторных условиях с использованием апробированных методик. Опытные данные обрабатывались с использованием пакета программ MathCad 7 и Microsoft Excel 2010.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- конструктивно-технологическая схема гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для ухода плодовыми насаждениями в террасном садоводстве;

- математические модели, описывающие процесс работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для ухода плодовыми насаждениями,

позволяющие обосновать основные конструктивно-технологические параметры установки;

- результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных параметров и режимов работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем;

- зависимости качественных показателей дисперсности распыла капель рабочей жидкости и равномерности их распределения на листовой поверхности сорных растений от конструктивных параметров и режимов работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований приняты ООО «Племсовхоз «Кенже» и АНО «Объединение садоводства, огородничества и сельского хозяйства «Агроном» для практического применения.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов научного исследования подтверждается: методами компьютерного моделирования в ПО Comsol Multiphysics 6.1; обработкой экспериментальных данных с помощью ПО STATISTICA, использованием современной измерительной аппаратуры. Полученные результаты согласуются с опубликованными данными по теме диссертаций М.В. Мезниковой, Э.Ш. Османова, В.В. Цыбулевского; идея базируется на обобщении передового опыта Новокубанского филиала ФГБНУ «Росинформагротех» (КубНИИ-ТиМ). Установлено качественное и количественное совпадение теоретических и экспериментальных данных с результатами, представленными в независимых источниках.

Основные положения работы доложены на: II и III Всероссийских (национальных) научно-практических конференциях (НПК) «Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты» (г. Нальчик, 2022, 2023 гг.); II и III Международных НПК «Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия» (г. Нальчик, 2022, 2023 гг.); Всероссийской (национальной) НПК «Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства» (г. Нальчик, 2022, 2023 гг.); Международной научной конференции молодых ученых и специалистов (г. Москва, 2023 г.); VIII и X Международных НПК «Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность» (г. Нальчик, 2022, 2024 гг.); III Международной НПК «Энергосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации» (г. Нальчик, 2024 г.).

Разработанная гербицидная установка удостоена: диплома и бронзовой медали Российской агропромышленной выставки «Золотая осень» (г. Москва, 2023 г.); диплома Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых аграрных образовательных и научных организации России (г. Уфа, 2024 г.).

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы 16 научных работах: 3 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России; 1 патент РФ на полезную модель; 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 11 статей в прочих изданиях. Общий объем опубликованных работ составил 5,68 п.л., из них личный вклад автора 4,55 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит: введение, четыре раздела, заключение, список использованных источников и приложения. Работа изложена на 150 страницах, включая 83 рисунка, 9 таблиц и 6 приложений. Список использованных источников включает 166 наименований, в том числе 6 на иностранном языке.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложены актуальность исследований, цель работы, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе** «Состояние вопроса ухода за плодовыми насаждениями в террасном садоводстве» рассмотрены методы борьбы с сорной растительностью в приствольных полосах плодовых насаждений, краткий анализ технических устройств для осуществления этого процесса.

Проведенный анализ показал, что в условиях террасного садоводства подъезд к линии ряда возможен только с одной стороны, т.е. существующие конструкции в указанных условиях не эффективны. Кроме этого современные гербицидные установки имеют ряд недостатков: отсутствует возможность оперативного регулирования высоты установки и ширины захвата рабочего органа из кабины трактора; затруднен оперативный перевод рабочего органа из транспортного положения в рабочее положение.

Сформулированы цель работы и задачи исследования.

**Во втором разделе** «Теоретическое обоснование основных параметров и режимов работы гербицидной установки» представлены результаты теоретических исследований по обоснованию основных параметров и режимов работы гербицидной установки. Предложена конструктивно-технологическая схема установки для внесения гербицида в приствольные полосы плодовых насаждений на террасированных склонах (рисунки 1, 2). Управление осуществляется джойстиком (рисунок 3).

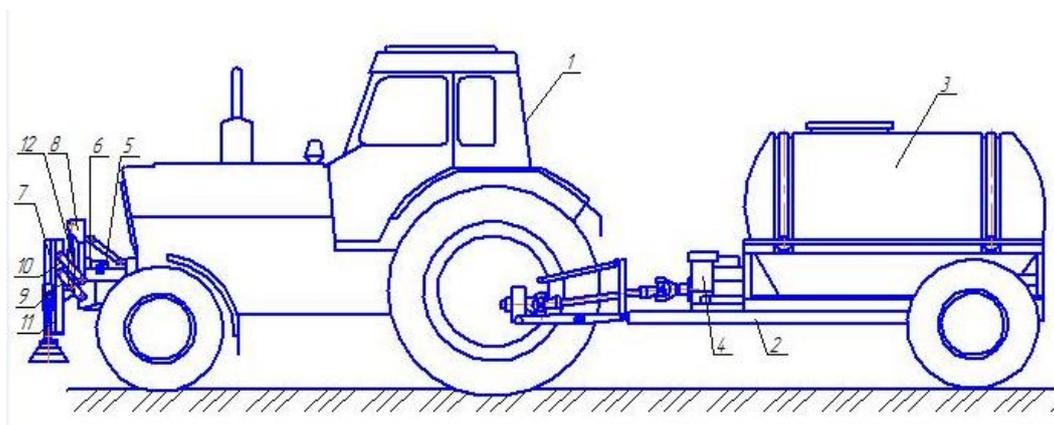
Технологическая схема работы гербицидной установки при обработке сорных растений вдоль приствольной полосы и вокруг штамба дерева показана на рисунке 4.

В результате теоретического исследования процесса работы пневмоакустического распылителя получено выражение для расчета диаметра капель распыленной жидкости:

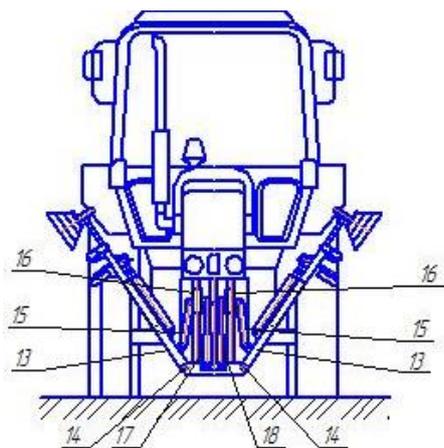
$$d_k = 6 \frac{\sigma_{ж}}{\rho_{ж} V_{ж}^2} \sqrt{\frac{1}{1 + 4C_f^2 \left(\frac{\rho_B}{\rho_{ж}}\right)^2 \left(\frac{P_B}{\rho_B V_{ж}^2}\right)^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{ж}$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости капли относительно среды, Н/м;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{ж}$  – скорость жидкости, м/с;  $C_f$  – коэффициент аэродинамического сопротивления капли;  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $P_B$  – давление воздуха, МПа.

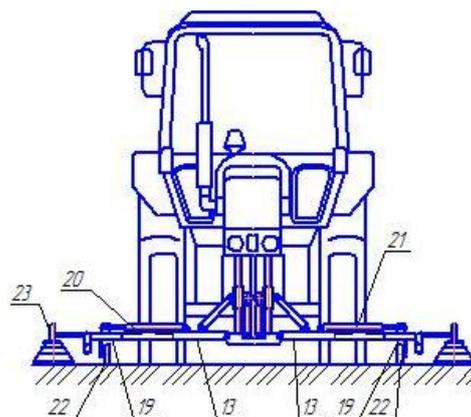
В данной главе также представлены результаты математического и компьютерного моделирования мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве.



а)



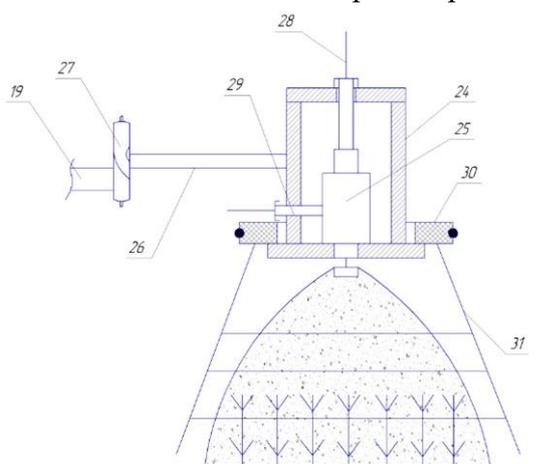
б)



в)

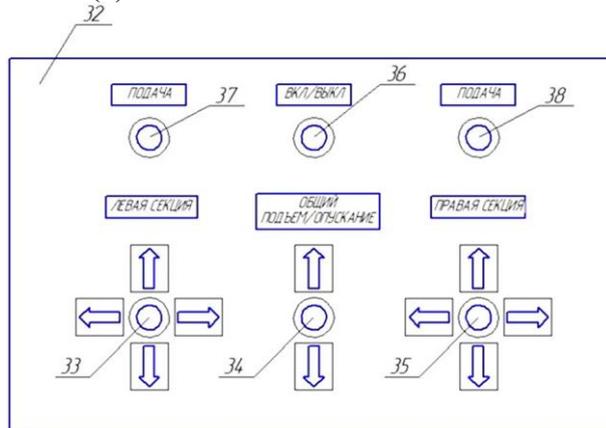
1 – трактор; 2 – полуприцепная тележка; 3 – емкость для рабочей жидкости; 4 – ресивер; 5 – гидравлическая аппаратура; 6 – аппаратура электроуправления; 7 – манипулятор; 8 – несущая стойка; 9, 10 – рычаги; 11 – рама; 12, 17, 18, 20, 21 – гидроцилиндры; 13 – несущая штанга; 14 – крепление; 15, 16 – тяга; 19 – выдвижная штанга; 22 – опорные колеса; 23 – распылительные устройства

Рисунок 1 – Конструктивно-технологическая схема гербицидной установки: общий вид (а), в транспортном (б) и рабочем (в) положениях



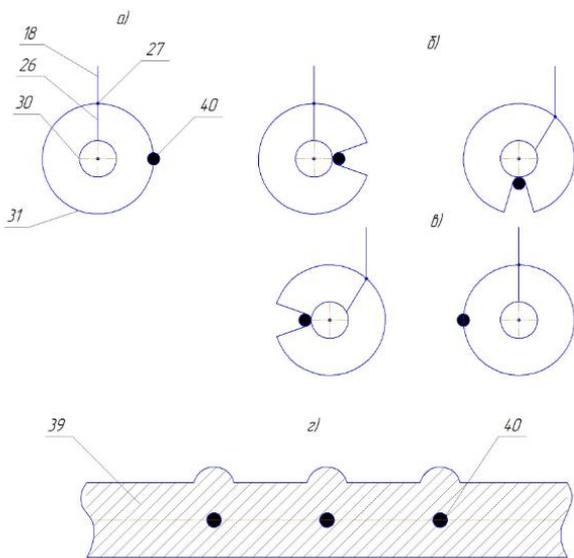
24, 26 – металлический цилиндр; 25 – пневмоакустический распылитель жидкости; 27 – предохранительный механизм; 28 – шланг подачи воздуха; 29 – шланг подачи жидкости; 30 – диск; 31 – полипропиленовые ворсы

Рисунок 2 – Распылительное устройство



32 – блок электрического пульта управления; 33, 34, 35 – джойстики; 36 – общий выключатель; 37, 38 – выключатели для управления электромагнитными клапанами подачи воздуха, соответственно, в левую и правую секции рабочих органов

Рисунок 3 – Блок электрического пульта управления



39 – приствольная полоса; 40 – штамп дерева  
 Рисунок 4 – Технологическая схема работы гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем жидкости при обработке сорных растений вдоль приствольной полосы и вокруг штамба дерева

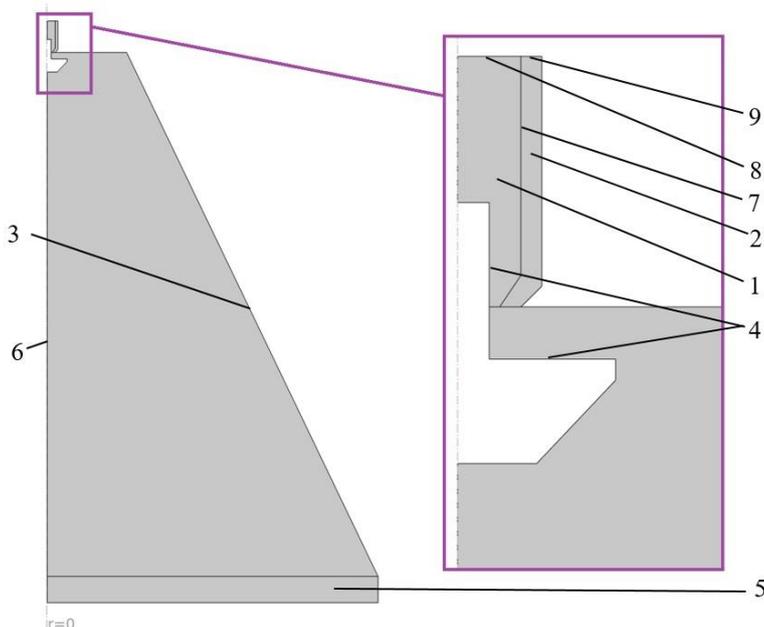
На рисунке 5 показана геометрическая модель распылителя в ПО Comsol Multiphysics. Задача сводится к рассмотрению двухфазного потока внутри кожуха распылительного устройства. Данный поток состоит из воздуха – основная фаза и рабочего раствора гербицида в виде макроскопических капель – дисперсная фаза.

При разработке математической модели принимаем следующие допущения: свойства раствора гербицида тождественны свойствам воды, т.к. она составляет подавляющую часть раствора; плотности каждой из фаз постоянны; обе фазы имеют общее поле давления; капли раствора успевают «подстраиваться» под поток воздуха настолько быстро, что их поведение можно описывать как часть единой смеси, а не как отдельные элементы с собственной динамикой; режим течения турбулентный.

Вектор объемного потока всей смеси можно найти, используя уравнения Навье-Стокса для турбулентного режима течения. Так как было принято допущение о том, что плотности обеих фаз постоянны, с учетом того, что в решаемой задаче не рассматривается никаких химических реакций между фазами, а также пренебрегая скоростью массопереноса ввиду того, что не рассматривается испарение жидкой фазы в воздушную, уравнение неразрывности потока можно записать в виде:

$$\nabla \cdot j = 0, \quad (2)$$

где  $j$  – вектор объемного потока всей смеси, м/с.



1 – воздушная область сопла, 2 – область сопла, через которую подается рабочий раствор гербицида, 3 – кожух, 4 – стенки головки распылителя (резонатор), 5 – воздушная область между кожухом и землей, 6 – ось симметрии, 7 – «тонкая стенка» между воздушной и растворной областями сопла, 8 – вход для воздуха, 9 – вход для гербицидного раствора

Рисунок 5 – Геометрическая модель распылителя в ПО Comsol Multiphysics

Так как размер капель гербицидного раствора очень мал, а за счет турбулентности присутствует их интенсивное перемешивание, то уравнение движения для потока смеси будет иметь вид:

$$\rho \frac{\partial j}{\partial t} + \rho(j \cdot \nabla)j = \nabla \cdot \left[ p \cdot I + (\mu + \mu_T) (\nabla \cdot j + (\nabla \cdot j)^T) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla \cdot j) I - \frac{2}{3} \rho k I \right] + \rho g, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность смеси воздуха и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость смеси воздуха и жидкости, Па·с;  $\mu_T$  – турбулентная вязкость, Па·с;  $I$  – единичный тензор;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Для определения турбулентной вязкости  $\mu_T$  и кинетической энергии турбулентности  $k$  уравнения Навье-Стокса (2) и (3) необходимо дополнить одной из моделей турбулентности. Выбираем  $k-\varepsilon$  модель, как наименее требовательную к вычислительным ресурсам и обладающую большей вероятностью сходимости. Таким образом, уравнения неразрывности и движения будут дополнены уравнениями для определения  $\mu_T$  и  $k$ , а также скорости турбулентной диссипации  $\varepsilon$ :

$$\mu_T = \rho C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(j \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon; \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(j \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (6)$$

$$P_{ki} = \mu_T \left[ \frac{\nabla \cdot j}{\nabla \cdot j + (\nabla \cdot j)^T} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot j)^2 \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla j, \quad (7)$$

где  $C_\mu, C_{\varepsilon_1}, C_{\varepsilon_2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – константы принятой модели турбулентного потока  $k-\varepsilon$ , которые равны, соответственно: 0,09; 1,44; 1,92; 1,0 и 1,3;  $\varepsilon$  – скорость турбулентной диссипации, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>.

Уравнение транспорта для объемной доли дисперсной фазы  $\phi_{жс}$ :

$$\frac{\partial \phi_{жс}}{\partial t} + j \cdot \nabla \phi_{жс} = \nabla \cdot (D \nabla \phi_{жс}), \quad (8)$$

где  $\phi_{жс}$  – объемная доля жидкости, о.е.;  $D$  – коэффициент турбулентной дисперсии, м<sup>2</sup>/с;  $\sigma_T$  – турбулентное число Шмидта, обычно принимается равным 0,35.

Уравнения (2), (3), (5), (6) и (8) математически описывают рассматриваемый процесс распределения мелкодисперсного объема водных растворов гербицидов в распылительном устройстве.

Для разработки компьютерной модели мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве в ПО Comsol Multiphysics задаемся начальными (НУ) и граничными (ГУ) условиями на границах геометрической мо-

дели. В общем виде компьютерная модель мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве представляет собой систему уравнений (9).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{уравнение движения: } \rho \frac{\partial j}{\partial t} + \rho(j \cdot \nabla)j = \\
 = \nabla \cdot \left[ p \cdot I + (\mu + \mu_T)(\nabla j + (\nabla j)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot j)I - \frac{2}{3}\rho k I \right] + \rho g; \\
 \text{уравнение неразрывности: } \nabla \cdot j = 0; \\
 \text{определение турбулентности вязкости: } \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \\
 \text{определение кинетической энергии турбулентности:} \\
 \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(j \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon; \\
 \text{определение скорости турбулентной диссипации:} \\
 \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(j \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k}; \\
 \text{член в уравнениях } k-\varepsilon \text{ модели: } P_k = \mu_T \left[ \frac{\nabla j}{\nabla j + (\nabla j)^T} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot j)^2 \right]; \\
 \text{плотность смеси: } \rho = \phi_g \cdot \rho_g + \phi_{жс} \cdot \rho_{жс}; \\
 \text{уравнение транспорта для объемной доли дисперсной фазы } \phi_{жс}: \\
 \frac{\partial \phi_{жс}}{\partial t} + j \cdot \nabla \phi_{жс} = \nabla \cdot (D \nabla \phi_{жс}); D = \frac{\mu_T}{\rho \sigma_T}; \\
 \text{НУ: } j = 0; p = 1 \text{ атм, } \phi_{жс} = 0; \\
 \text{ГУ на входной границе воздуха в модель: } j_g = -j_{g_0} \cdot n; \phi_{жс} = 0; \\
 \text{ГУ на входной границе раствора в модель: } j_{жс} = -j_{жс_0} \cdot n; \phi_g = 0; \\
 \text{ГУ на выходе: } p = -p_0 \cdot n; p_0 = 1 \text{ атм,} \\
 \text{ГУ на стенках модели: } j \cdot n = 0,
 \end{array} \right. \quad (9)$$

где  $\phi_g, \phi_{жс}$  – соответственно, объемные доли воздуха и жидкости, о.е.;  $\rho_g, \rho_{жс}$  – соответственно, плотности воздуха и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $j_{жс}, j_g$  – соответственно, векторы объемных потоков жидкой и воздушной фаз, м/с;  $j_{g_0}$  – скорость воздуха на входе в сопло, м/с;  $j_{жс_0}$  – скорость гербицидного раствора на входе в сопло, м/с;  $n$  – нормальный вектор.

В результате компьютерного моделирования получено поле скорости потока смеси  $j$ , представленное на рисунках 6, 7.

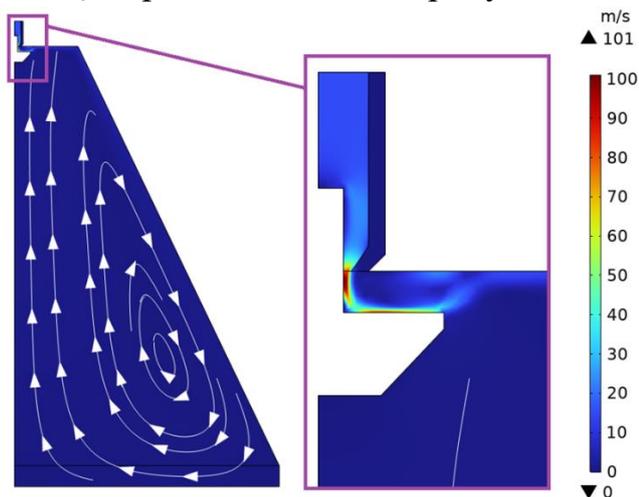


Рисунок 6 – Изображение поля скоростей потока смеси  $j$  при  $j_{\theta_0} = 15$  м/с

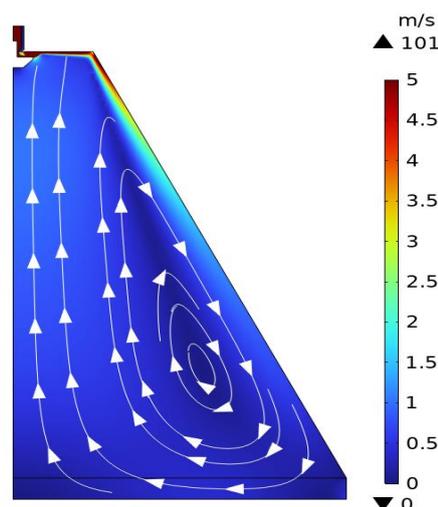


Рисунок 7 – Изображение поля скоростей потока смеси  $j$  в диапазоне от 0 м/с до 5 м/с при  $j_{\theta_0} = 15$  м/с

Т.к. основные скорости сосредоточены в распылителе, то было сделано изображение этого же поля скоростей до 100 м/с в диапазоне от 0 м/с до 5 м/с. Из рисунков 6 и 7 видно, что при скорости  $j_{\theta_0} = 15$  м/с на входе в распылитель скорости смеси внутри него достигают 101 м/с. Максимальные скорости сосредоточены на выходе из сопла, а также на верхних стенках кожуха. Минимально возможная скорость воздуха на входе в сопло должна составлять 12 м/с.

Для того чтобы дать рекомендации по скорости трактора и равномерности распределения раствора гербицидов внутри распылителя при данном диапазоне скоростей следует рассмотреть поле распределения объемной доли дисперсной фазы  $\phi_{жс}$ , а также узнать расход раствора  $q$ . На рисунке 8 показано поле распределения  $\phi_{жс}$  при скорости воздуха на входе в сопло 15 м/с в разное время распыления.

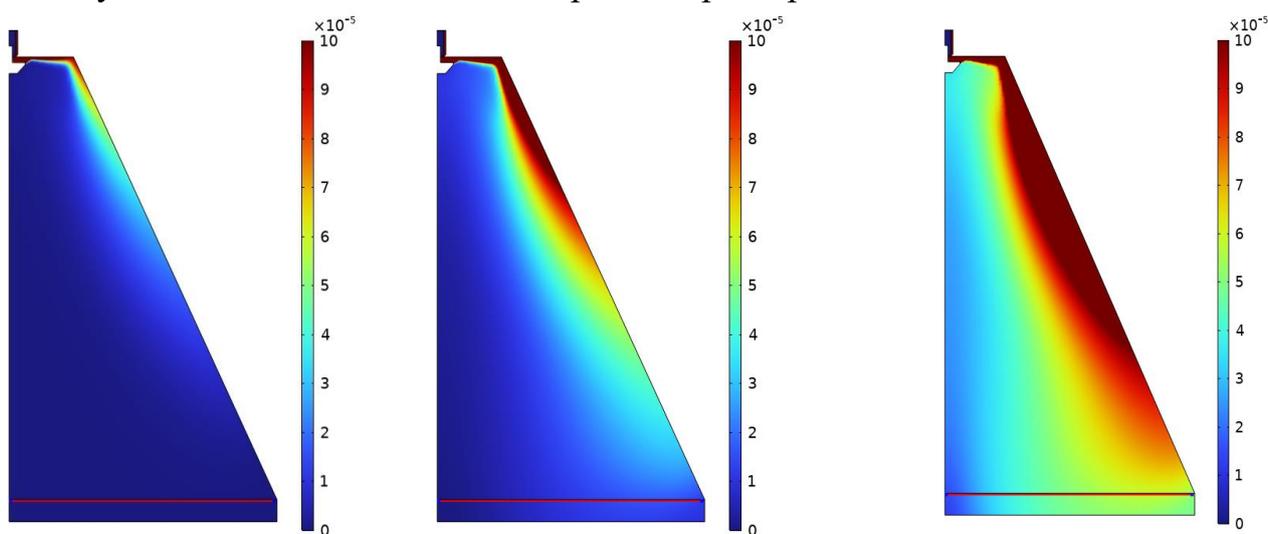


Рисунок 8 – Изображение поля распределения объемной доли дисперсной фазы  $\phi_{жс}$  при  $j_{\theta_0} = 15$  м/с, слева на право: через 1, 2 и 3 с

Как видно, поле распределения объемной доли дисперсной фазы  $\phi_{жс}$  повторяет поле распределения скоростей потока смеси  $j$ , которое было представлено ранее. Основная доля раствора сосредоточена в верхней части кожуха распылителя. На создание полностью развитого потока уходит не более 3 с.

На рисунке 9 показаны графики распределения объемной доли дисперсной фазы  $\phi_{жс}$  вдоль нижней горизонтальной границы кожуха (радиуса нижней его части длиной 250 мм, который показан на рисунке красной линией), где по оси  $x$  ноль соответствует оси симметрии.

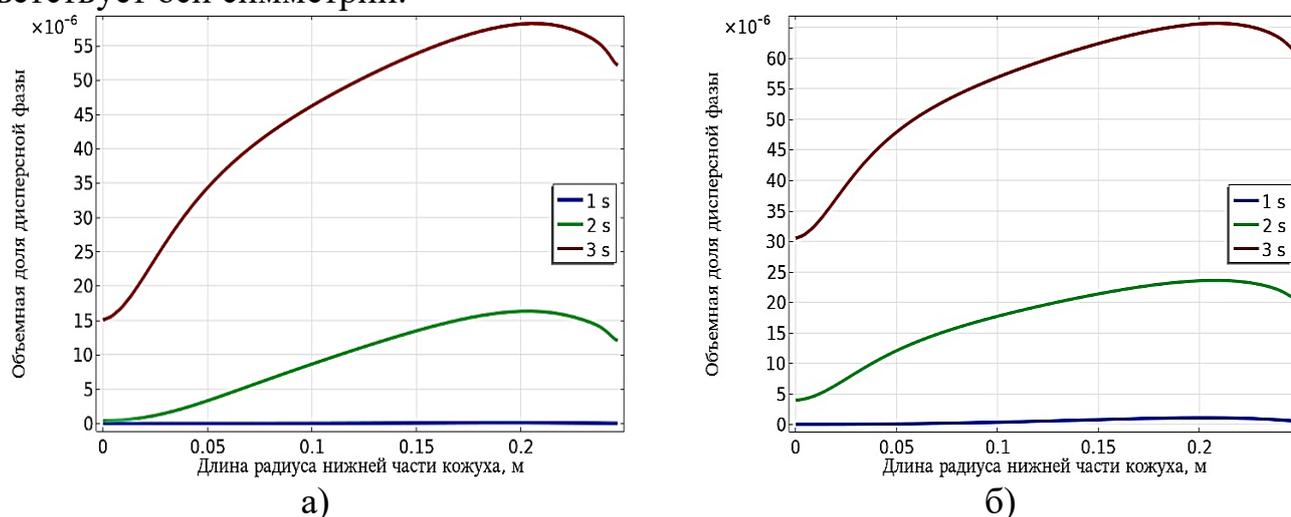


Рисунок 9 – Графики распределения объемной доли дисперсной фазы  $\phi_{жс}$  вдоль нижней горизонтальной границы кожуха при  $j_{e_0} = 15$  м/с (а) и  $j_{e_0} = 25$  м/с (б)

Для того чтобы найти расход раствора  $q$ , ввиду двухмерной осесимметричной геометрической модели, был рассчитан интеграл от произведения скорости потока смеси  $j$  на  $\phi_{жс}$  в рассматриваемом сечении. Расчеты скорости трактора по расходу раствора при разной  $j_{e_0}$  на входе с привязкой к норме полива представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные по расчету скорости трактора для рассматриваемой геометрической модели распылителя

Норма внесения гербицида	50 л/га			100 л/га		
	12	15	25	12	15	25
Скорость на входе, м/с	12	15	25	12	15	25
Расход, м <sup>3</sup> /с	1,6190 ·10 <sup>-6</sup>	2,0095 ·10 <sup>-6</sup>	3,3587 ·10 <sup>-6</sup>	1,6190 ·10 <sup>-6</sup>	2,0095 ·10 <sup>-6</sup>	3,3587 ·10 <sup>-6</sup>
Скорость трактора при диаметре нижней части кожуха 500 мм, км/ч	3	3,6	6,16	1,5	1,8	3,08

Разработана методика инженерного расчета геометрических параметров защитного фартука, установлены пределы их изменения: высота установки над поверхностью земли – 0,23-0,28 м, диаметр нижней части защитного фартука – 0,3-0,5 м, длина ворса – 0,26-0,28 м, угол наклона ворса – 27°30′-43°.

В третьем разделе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» представлены программа, методика экспериментальных исследований, описание экспериментальной установки и измерительная аппаратура.

Общий вид лабораторной установки представлен на рисунке 10.



1 – компрессор; 2 – пневмогидро-аккумулятор; 3 – пневмошланг; 4 – гидравлический шланг; 5 – образцовые манометры; 6 – ресивер; 7 – пневмоакустический распылитель жидкости; 8 – вентиль для подачи воздуха; 9 – вентиль для подачи воды

Рисунок 10 – Общий вид лабораторной установки

Для оценки равномерности распределения капель рабочей жидкости на листовой поверхности сорных растений, улавливающие карточки крепились на листья. С помощью ЭВМ определяли размер капель и их количество, а также рассчитывали площадь покрытия каплями.

Критерием оценки эффективности работы гербицидной установки принята степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности сорных растений.

Теоретические исследования работы гербицидной установки показали, что на степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности сорных растений оказывают влияние следующие основные факторы: скорость движения установки  $V_{Г}$ ; расход рабочей жидкости  $Q_{ж}$ ; скорость воздуха на входе в сопло  $V_{в}$ .

Исследования дисперсности распада капель рабочей жидкости пневмоакустического распылителя показали, что при изменении давления воздуха от 0,08 до 0,25 МПа средние медианные диаметры капли жидкости изменяются от 265 до 42 мкм. Основная масса жидкости содержится в каплях с диаметрами от 40 до 60 мкм при давлении воздуха 0,2 МПа, что позволяет равномерно распределить рабочую жидкость на листовой поверхности сорных растений.

Выявлено, что сорная растительность в плодовом саду представлена в основном щирицей запрокинутой (*Amaranthus retroflexus L.*), осотом полевым (*Sonchus arvensis*), лебедой (марью белой) (*Chenopodium album*) и пыреем ползучим (*Elytrigia repens*). Установлено, что доля пырея ползучего составила 28%, щирицы запрокинутой 22%, осота полевого 16% и лебеды (мари белой) 14%.

Получены уравнения регрессии для функции отклика – «степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности сорных растений  $k, \%$ », которые, согласно проведенного многофакторного эксперимента имеют вид (для верхней стороны листьев сорных растений верхнего яруса):

- в кодированном виде:

$$Y_{k_{BB}} = 86,1333 - 2,6175X_1 + 0,3463X_2 + 5,3888X_3 + 0,6025X_1X_2 - 0,568X_1X_3 - 8,4716X_1^2 - 5,2291X_2^2 - 8,0791X_3^2; \quad (10)$$

- в натуральном виде:

$$k_{BB} = -88,3343 + 32,607V_G + 10,6461Q_{Ж} + 9,261V_B + 0,2678V_GQ_{Ж} - 0,0631V_GV_B - 3,7652V_G^2 - 2,324Q_{Ж}^2 - 0,2244V_B^2. \quad (11)$$

Установлено, что полученные уравнения регрессии адекватно описывают исследуемый процесс ( $F_{расч} = 2,1927 < F_{расч} = 2,3593$ ).

Построены поверхности отклика зависимости степени покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности сорных растений от попарного влияния основных факторов (рисунок 11).

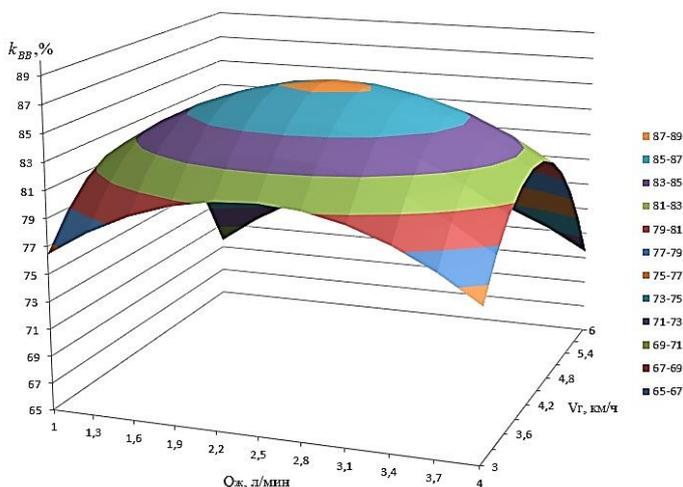


Рисунок 11 – Поверхность отклика зависимости степени покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности сорных растений от расхода рабочей жидкости и скорости передвижения гербицидной установки



Рисунок 12 – Производственные испытания гербицидной установки

Максимальная степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности верхней стороны листьев сорных растений верхнего яруса (87,3%) обеспечивается при: скорости гербицидной установки 4,25 км/ч; расходе рабочей жидкости 2,54 мл/мин; скорости воздуха на входе в сопло 20,04 м/с.

В результате производственных испытаний опытного образца гербицидной установки (рисунок 12) установлена ее высокая работоспособность, определены основные её технические характеристики.

Степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности остальных частей сорных растений составила: нижняя сторона листьев сорных растений верхнего яруса 62,8%; верхняя сторона листьев сорных растений нижнего яруса 76,7%; нижняя сторона листьев сорных растений нижнего яруса 60,4%.

В четвертом разделе «Экономическая эффективность использования гербицидной установки» показано, что использование предлагаемой гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для обработки приствольных полос пло-

довых насаждений в террасном садоводстве позволяет получить годовой экономический эффект в размере 10,17 тыс. руб./га, снизить себестоимость работ на 1 га в 2 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### (итоги выполненного исследования)

1. Разработаны конструктивно-технологическая схема и геометрическая модель распылительного устройства для внесения раствора гербицидов в приствольные области плодовых насаждений (патент РФ № 210870), включающая в себя: резонатор с диаметром рабочей поверхности 30 мм и зазором между соплом и этой поверхностью 5 мм; сопло состоящее из двух частей: воздушной с выходным диаметром 8 мм и жидкостной в виде кольца с внутренним диаметром 12 мм и наружным 16 мм; кожух в виде усечённого конуса верхнее сечение которого имеет диаметр 120 мм, нижнее 500 мм, а высота его составляет 400 мм.

2. Разработана математическая модель мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве на базе уравнений Навье-Стокса,  $k-\varepsilon$  модели турбулентного потока, а также уравнения транспорта дисперсной фазы внутри распылительного устройства, позволяющие описать процессы движения газа и капель раствора гербицидов, как единый поток их смеси. На их базе получена компьютерная модель мелкодисперсного потока водных растворов гербицидов в распылительном устройстве в ПО Comsol Multiphysics, которая включает в себя начальные и граничные условия и учитывающая плотность и вязкость смеси газа и капель гербицидного раствора, аналитически рассчитанную его скорость на входе в сопло.

3. В результате проведённой компьютерной обработки полученной модели определено, что рациональные скорости воздуха на входе в сопло составляют 12-25 м/с. При этом скорости трактора при норме внесения раствора гербицидов 50 л/га составляют от 3 до 6 км/ч, а при 100 л/га от 1,5 до 3 км/ч. Обоснован способ уменьшения неравномерности распределения объемной доли мелкодисперсного раствора гербицидов в нижней части кожуха в 1,5 раза путем изменения формы рабочей зоны резонатора с плоской на полусферическую с тем же диаметром - 30 мм. При этом скорости трактора при норме внесения раствора гербицидов 50 л/га составляют от 2,5 до 4,7 км/ч, а при 100 л/га от 1,3 до 2,4 км/ч.

4. Проведены экспериментальные исследования влияния параметров пневмоакустического распылителя жидкости на качественные показатели распыления, в результате которых установлено следующее: при увеличении давления воздуха средние медианные диаметры капли жидкости уменьшаются; основная масса жидкости при давлении воздуха 0,2 МПа содержится в каплях с диаметрами от 40 до 60 мкм, что позволяет равномерно распределить рабочую жидкость на листовой поверхности сорных растений; максимальная степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности верхней стороны листьев сорных растений верхнего яруса (87,3%) обеспечивается при: скорости гербицидной установки 4,25 км/ч; расходе рабочей жидкости 2,54 л/мин; скорости воздуха на входе в сопло 20,04 м/с. При установленных оптимальных параметрах и режимах работы гербицидной установки степень покрытия каплями рабочей жидкости листовой поверхности остальных частей сорных растений составила: нижняя сторона листьев сорных растений верхнего яруса 62,8%; верхняя

сторона листьев сорных растений нижнего яруса 76,7%; нижняя сторона листьев сорных растений нижнего яруса 60,4%.

5. В результате производственных испытаний гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве установлена ее высокая работоспособность, определены основные ее технические характеристики. Производительность установки составила 3 га/ч при норме расхода рабочей жидкости 50 л/га.

6. Расчеты показали, что использование предлагаемой гербицидной установки с пневмоакустическим распылителем для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве позволяет получить годовой экономический эффект в размере 10,17 тыс. руб. / га.

### **Рекомендации производству**

Предлагается гербицидная установка, состоящая из полуприцепа для транспортировки и подачи рабочей жидкости, навесного гидравлического манипулятора рабочих органов, двух рабочих органов для обработки приствольных полос, адаптера передней навески к трактору и пульта управления с джойстиком, обеспечивающий оперативное управление технологическим процессом из кабины трактора со следующими характеристиками: емкость бака – 2000 л; расход рабочей жидкости – 50 л/га; ширина обработки – 0,3 м; производительность – 24 га/смену.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Теоретический и экспериментальный материал, полученный на основе проведенных исследований, может быть использован для разработки роботизированной техники с целью контроля количества и качества внесения гербицида в приствольные полосы плодовых насаждений в зависимости от диаметра штамба дерева и количества сорных растений на 1 м<sup>2</sup>.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Хажметов, Л. М. Пневмоакустический распылитель для внесения гербицида в приствольные полосы многолетних насаждений / Л. М. Хажметов, Ю. А. Шекихачев, А. Л. Хажметова, Ф. Х. Канкулова, А. Р. Тхагапсова, **К. В. Мишхожев** // АгроЭкоИнфо: электр. науч.-произв. журн. – 2022. – № 2 (50). – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st\\_230.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_230.pdf). – DOI: 10.51419/202122230.

2. Шекихачев, Ю. А. Совершенствование технологии и технических средств применения биопрепаратов при обработке посевов сельскохозяйственных культур / Ю. А. Шекихачев, В. Б. Дзуганов, Л. М. Хажметов, В. Х. Мишхожев, А. Р. Тхагапсова, **К. В. Мишхожев** // АгроЭкоИнфо: электр. науч.-произв. журн. – 2022. – № 3 (51). – Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/3/st\\_306.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/3/st_306.pdf). – DOI: 10.51419/202123306.

3. Мишхожев, К. В. Обоснование конструктивно-технологической схемы гербицидной установки для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве / **К. В. Мишхожев**, Л. М. Хажметов // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2025. – № 1 (47). – DOI: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-72-82.

### *Патент на полезную модель*

4. Патент 218767 U1 Российская Федерация, МПК А01М 7/00. Устройство для внесения гербицида в приствольные полосы плодовых насаждений на террасированных склонах: № 2022129135: заявл. 08.11.2022: опубл. 09.06.2023: бюл. №16 / А.К. Апажев, Л.М.

Хажметов, Ю.А. Шекихачев, А.Л. Хажметова, **К.В. Мишхожев** [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» (Кабардино-Балкарский ГАУ).

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024689855 Российская Федерация. Программа оптимизации параметров и режимов работы технических средств: № 2024688532: заявл. 27.11.2024: опубл. 11.12.2024 / А.К. Апажев, Ю.А. Шекихачев, Л.М. Хажметов, **К.В. Мишхожев** [и др.]; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова» (Кабардино-Балкарский ГАУ).

*Публикации в рецензируемых научных изданиях*

6. Тхагапсова, А. Р. Особенности конструкции защитного фартука гербицидной штанги при обработке приствольных полос плодовых насаждений / А. Р. Тхагапсова, **К. В. Мишхожев**, Л. М. Хажметов // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты: сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 158-162.

7. Шекихачев, Ю. А. Оценка эффективности экологизации аграрного производства / Ю. А. Шекихачев, А. А. Шекихачев, **К. В. Мишхожев** // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность: материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки РФ, КБР, Республики Адыгея, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Б.Х. Фиапшева – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 367-371.

8. Хажметов, Л. М. Особенности обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве / Л. М. Хажметов, **К. В. Мишхожев** // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции, посвященной памяти первого Президента Кабардино-Балкарской Республики Валерия Мухамедовича Кокова. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 299-303.

9. Мишхожев, К. В. Анализ методов борьбы с сорной растительностью в приствольных полосах плодовых насаждений на террасированных склонах / **К. В. Мишхожев**, А. Л. Хажметова, Л. М. Хажметов // Разработка и применение наукоемких технологий в строительстве, природообустройстве и механизации сельскохозяйственного производства: сборник научных трудов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2022. – С. 165-168.

10. Хажметов, Л. М. Акустическое распыливание жидкости: особенности конструкции распылителей и установок для обработки сельскохозяйственных культур / Л. М. Хажметов, А. Л. Хажметова, **К. В. Мишхожев** // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. – 2022. – №4. – С. 136-144. – DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-136-145.

11. Мишхожев, К. В. Тенденция развития установок для внесения гербицида в приствольные полосы плодовых насаждений в террасном садоводстве / **К. В. Мишхожев**, Л. М. Хажметов, К. Л. Хажметов // Актуальные проблемы аграрной науки: прикладные и исследовательские аспекты: материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. – С. 141-146.

12. Мишхожев, К. В. Обоснование типа распылителя для гербицидной установки / **К. В. Мишхожев**, К. Л. Хажметов, Л. М. Хажметов // Наука, образование и бизнес: новый взгляд или стратегия интеграционного взаимодействия: материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной памяти первого Президента Кабардино-

Балкарской Республики Валерия Мухамедовича Кокова. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. – С. 460-464.

13. Мишхожев, К. В. Распылители, используемые для обработки сорной растительности в приствольных полосах плодовых насаждений: достоинства и недостатки / **К. В. Мишхожев**, К. Л. Хажметов // Актуальные проблемы современного строительства, природообустройства и механизации сельскохозяйственного производства: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2023. – С. 144-148.

14. Мишхожев, К. В. Совершенствование конструкции гербицидных установок для обработки приствольных полос плодовых насаждений в террасном садоводстве / **К. В. Мишхожев**, А. Л. Хажметов // Международная научная конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева: сборник статей.– М.: РГАУ-МСХА, 2023. – С. 521-525.

15. Мишхожев, К. В. Актуальные проблемы и пути решения экологизации ухода за плодовыми насаждениями в интенсивном горном и предгорном садоводстве Кабардино-Балкарской республике / **К. В. Мишхожев**, К. Л. Хажметов, Л. М. Хажметов // Сельскохозяйственное землепользование и продовольственная безопасность: материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки РФ, КБР, Республики Адыгея, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Б.Х. Фиапшева. – Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2024.– С. 154-157.

16. Мишхожев, К. В. Стратегия развития средств механизации по уходу за кроной плодовых насаждений в интенсивном горном и предгорном садоводстве / **К. В. Мишхожев**, С. И. Темиржанов, Б. Л. Узденова, Л. М. Хажметов // Энергосбережение и энергоэффективность: актуальные вопросы, достижения и инновации: материалы III Международной научно-практической конференции, посвященная 85-летию д.т.н., профессора Шомахова Л.А.– Нальчик: Кабардино-Балкарский ГАУ, 2024. – С. 132-135.

Подписано в печать 03.10.2025 г.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ №

Типография ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»

360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в