

*На правах рукописи*



**Русинов Дмитрий Алексеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛИВА  
ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНОЙ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ  
ПУТЕМ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ДОЖДЕВАЛЬНОЙ НАСАДКИ**

4.3.1 – Технологии, машины и оборудование  
для агропромышленного комплекса

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
**Кравчук Алексей Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», профессор кафедры «Организация и технологии гидромелиоративных и строительных работ»  
**Журавлева Лариса Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент ГОУ ВО Московской области «Государственный социально-гуманитарный университет», заведующий кафедрой «Технические системы, теория и методика образовательных процессов»  
**Малько Игорь Валерьевич**

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (ФГБНУ ВНИИ «Радуга»)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета 35.2.035.03 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, д. 60, ауд. 325 им. А. В. Дружкина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Вавиловский университет и на сайте <https://sgau.ru/>

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3. E-mail: chekmarev.v@yandex.ru

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

В. В. Чекмарев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Обеспечение населения страны продукцией растениеводства, производимой на орошаемых полях, является одной из важных составляющих «Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации», согласно которой развитие мелиоративного комплекса является одним из основных приоритетов государственной политики в области сельскохозяйственного производства.

Техническое перевооружение мелиоративного комплекса сопровождается установкой на орошаемых полях современных широкозахватных дождевальных машин кругового действия. В Саратовской области из 918 используемых ДМ 861 ед. является широкозахватной кругового действия. С помощью ДМ производят полив различных сельскохозяйственных культур на площади 257,3 тыс. га, которая ежегодно увеличивается в среднем на 6,8 тыс. га.

Однако установленные на современных дождевальных машинах дождеобразующие устройства создают дождевое облако, поднимающееся относительно поверхности поля на высоту до 5 м, что приводит к высокой неравномерности полива и большим потерям воды на испарение и снос ветром. Снижение высоты установки дождеобразующих устройств позволяет повысить ветроустойчивость дождя, но сокращает радиус полива и, как следствие, повышает интенсивность и приводит к смыву плодородного слоя почвы. При этом увеличивается диаметр капель, что усиливает мощность создаваемого дождя, оказывает негативное воздействие на почву и поливаемые растения и снижает урожай. Снижение напора воды перед дождевальной машиной до 0,4 МПа с последующим его сокращением до 0,2 МПа в конце трубопровода усугубляет данный процесс.

В связи с вышеизложенным необходимость совершенствования конструкции дождеобразующих устройств, устанавливаемых на дождевальных машинах кругового действия, позволяющих повысить качественные показатели дождя, является актуальной научной задачей.

**Степень разработанности темы.** Вопросами, связанными с повышением качества дождя, создаваемого дождевальными устройствами, устанавливаемыми на ДМ кругового действия, занимались такие ученые, как Г. М. Гаджиев, Д. П. Гостищев, К. В. Губер, С. Х. Гусейн-Заде, Н. С. Ерхов, А. П. Исаяев, Б. М. Лебедев, Г. П. Лямперт, Г. В. Ольгаренко, В. И. Ольгаренко, Н. Ф. Рыжко, А. И. Рязанцев, Ю. Ф. Снопич, Л. А. Журавлева и многие другие. Анализ выполненных работ и проведенных в них исследований показал, что качество дождя, создаваемого дождеобразующим устройством, напрямую оказывает влияние на физико-механические свойства верхнего слоя почвы, а также на рост и развитие сельскохозяйственных растений. За многие годы исследований были получены значительные результаты по совершенствованию конструкции и условиям применения разных пассивных дождеобразующих устройств. Однако остается ряд не решенных вопросов, связанных с созданием дождеобразующих устройств, работающих в активном режиме, например, вращения. Процесс формирования дождя дождеобразующими

устройствами рассматривался как нарушение целостности потока жидкости, сходящего с устройства, и встреча его с воздухом без учета динамики течения жидкости за счет активизации его движения и принудительного разбивания потока жидкости при каплеобразовании. Проведенные исследования, направленные на совершенствование дождеобразующих устройств, позволили разработать конструкцию дождевальную насадку с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью и обосновать ее конструктивные параметры.

**Цель исследований** – повышение качественных показателей дождя при поливе дождевальной машиной кругового действия путем обоснования рациональных конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ мелиоративного комплекса Саратовской области с обоснованием применения современных дождевальных машин, а также определить способы и направление развития конструкций дождеобразующих устройств, обеспечивающих полив с требуемыми качественными показателями дождя.

2. Разработать конструкцию и провести теоретическое обоснование конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, обеспечивающей создание дождя с требуемыми качественными показателями.

3. Провести экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью на качественные показатели дождя.

4. Определить экономическую эффективность применения широкозахватной дождевальной машины кругового действия, оснащенной разработанной конструкцией дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

**Объект исследования** – технологический процесс полива широкозахватной дождевальной машиной кругового действия, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

**Предмет исследования** – зависимости и взаимосвязь качественных показателей дождя с конструктивными параметрами дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

**Научная новизна:**

- разработана классификация дождевальных насадок и предложена на ее основе новая конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью;

- уточнены математические зависимости, описывающие процесс формирования и определения диаметра капли дождя, создаваемого дождевальной насадкой с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью;

- получена аналитическая зависимость, определяющая радиус полива, выполняемого дождевальными насадкой с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью;
- получены эмпирические зависимости влияния конструктивных параметров дождевальной насадки на качественные показатели дождя.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость работы заключается в выведении аналитических зависимостей, отражающих влияние геометрических параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью на качественные показатели дождя. Рассмотренный процесс равномерного обтекания дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью потоком воды позволил определить постоянство толщины пленки воды, сходящей с вращающегося дефлектора. Исследование вращения дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью за счет потока воды позволило уточнить аналитические зависимости, определяющие диаметр капли создаваемого дождя и радиус полива.

Практическая значимость выполненной работы заключается в том, что была создана, прошла производственные испытания и внедрена в ООО «Наше дело» (Саратовская обл.) и ООО «Мелиоративные машины» (г. Саратов) новая конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, способной обеспечивать требуемые качественные показатели дождя при поливе сельскохозяйственных культур дождевальными машинами кругового действия. Результаты проведенных исследований рекомендуются для проектно-конструкторских предприятий при разработке и проектировании дождевальных машин, а также для сельскохозяйственных предприятий, занимающихся эксплуатацией ДМ.

**Методология и методы исследований.** В работе были использованы основные методы и положения математического моделирования, статистической обработки данных и системный анализ. Теоретическое описание процесса формирования дождя базировалось на основных законах и методах классической механики и гидравлики. Экспериментальные методы включали в себя лабораторные и полевые исследования, проводимые с использованием требований методик СТО АИСТ 11.1-2010 и РД 70.11.1-89 по определению качественных показателей полива дождевальной машиной кругового действия, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- теоретические зависимости, описывающие влияние конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью на радиус полива;
- закономерности, описывающие движение воды по конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора, каплеобразование и дальность полета капли дождя;

- экспериментально-теоретическое обоснование количества рифленых поверхностей, угловой скорости вращения дефлектора и их влияния на диаметр капель формируемого дождя.

**Степень достоверности и апробация работы.** Достоверность результатов выполненных экспериментов подтверждена необходимым количеством проведённых исследований, обработкой результатов исследований путем применения статистического анализа и современного программного обеспечения; применением современных методик проведения эксперимента с использованием поверенных измерительных приборов.

Основные положения диссертационной работы рассмотрены на ежегодных научно-практических конференциях по итогам научно-исследовательской работы профессорско-преподавательского и аспирантского состава ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова» (Саратов, 2020–2022); на VIII Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях» (Саратов, 2022); Национальной научно-практической конференции с международным участием «Национальные приоритеты развития агропромышленного комплекса» (Оренбург, 2022); VII студенческой научно-практической конференции «Молодой исследователь: от идеи к проекту» (Йошкар-Ола, 2023); Международной научно-практической конференции «Вклад аграрных ученых в реализацию десятилетия науки и технологий в Российской Федерации» (Курган, 2023); Всероссийской научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, студентов, аспирантов и молодых ученых «Мобильные машины в условиях цифровой трансформации экономики» (Казань, 2023); на IX Международной научно-практической конференции «Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях» (Саратов, 2023).

Основное содержание диссертации опубликовано в 13 научных работах, в том числе в 2 работах в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, а также в 3 патентах на изобретение. Общий объем с учетом долевого участия в коллективных публикациях составляет 3,75 печ. л., из них 2,09 печ. л принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Работа изложена на 226 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы из 200 наименований, в том числе 9 на иностранном языке, содержит 8 таблиц, 83 рисунков, 6 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во «Введении»** обоснована актуальность исследований, направленных на повышение качества дождя, создаваемого дождевальными насадками, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследования»** представлен анализ состояния мелиоративного комплекса и основных производителей широкозахватных дождевальных машин кругового действия. Отраже-

ны проблемы, возникающие при использовании на дождевальных машинах дождеобразующих устройств, применение которых сопровождается рядом негативных последствий: низкие качественные показатели дождя, низкая равномерность полива и большие потери на испарение и снос ветром. Исследовано влияние конструктивных параметров дождевальных насадок на качественные показатели дождя и равномерность полива на основании научных исследований, проведенных учеными, внесшими наибольший вклад в решение данной проблемы: Г. М. Гаджиев, Д. П. Гостищев, К. В. Губер, С. Х. Гусейн-Заде, Н. С. Ерхов, Л. А. Журавлева, А. П. Исаев, Б. М. Лебедев, Г. П. Лямперт, Г. В. Ольгаренко, В. И. Ольгаренко, Н. Ф. Рыжко, А. И. Рязанцев, Ю. Ф. Снопич и др.

Доказана необходимость совершенствования конструкции дождевальных насадок, обеспечивающих повышение качества дождя, равномерности полива и снижение потерь на испарение и снос ветром. Наиболее перспективным направлением совершенствования конструкции дождевальной насадки является установка вращающегося дефлектора.

Во второй главе «Теоретические исследования формирования дождя дефлекторной насадкой с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью» приведена конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью (рисунок 1).

Она содержит корпус 2 с коническим соплом 3. На корпусе 2 с помощью двух ножек 4 и горизонтальной пластины прикреплен втулка 6, в которой установлен вращающийся дефлектор конической формы с рифленой поверхностью 5, ось которого закреплена во втулке 6 с помощью шайбы 8 и гайки 7 с контргайкой 9 (патент РФ на изобретение № 2615574). Дождевальную насадку с помощью резьбового соединения 1, выполненного на корпусе 2, устанавливают на трубопровод или систему приповерхностного полива дождевальной машины.

Работа насадки происходит следующим образом. Вода из трубопровода дождевальной машины поступает в коническое сопло, выходя из отверстия которого в виде струи попадает на коническую рифленую поверхность дефлектора, равномерно обтекает ее и, попадая на ребра, выполненные на конусообразной рифленой поверхности, обеспечивает вращение дефлектора, который, в свою очередь, выполняет разрыв на капли пленки воды, сходящей с основания дефлектора.

Дождевальная насадка должна обеспечивать полив с высокими качественными параметрами: радиус полива, средняя и мгновенная интенсивно-

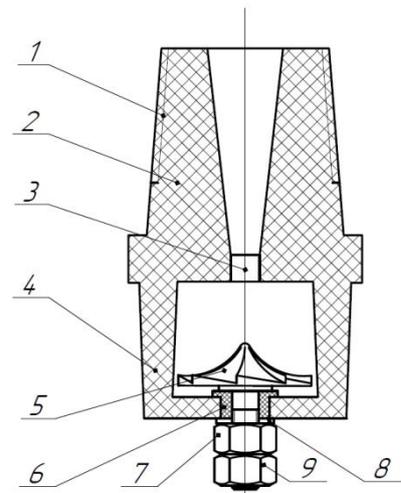


Рисунок 1 – Предлагаемая дождевальная насадка с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью: 1 – резьба; 2 – корпус насадки; 3 – сопло; 4 – ножка; 5 – вращающийся дефлектор; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – шайба; 9 – контргайка

сти дождя, диаметр капель дождя, потери воды на испарение и снос ветром, равномерность полива.

Высокие качественные параметры дождя обеспечиваются безотрывным равномерным обтеканием конусообразной поверхности дефлектора потоком воды, выходящим из сопла дождевальной насадки с заданным давлением (рисунок 2).

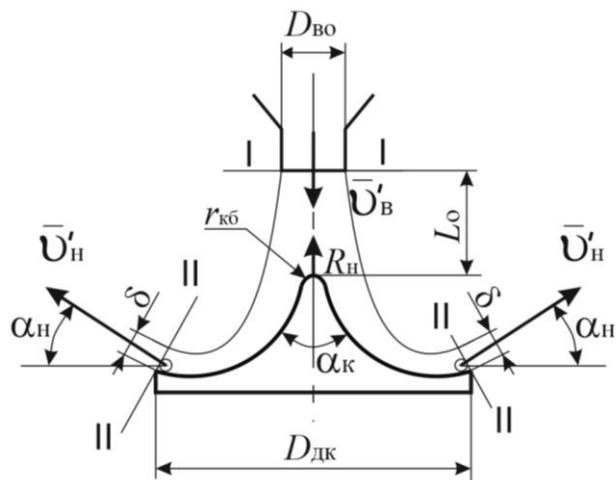


Рисунок 2 – Схема обтекания водой дефлектора дождевальной насадки

При обтекании дефлектора потоком воды рассмотрим две плоскости: I–I – плоскость потока воды на выходе из сопла дождевальной насадки и II–II – плоскость потока воды в виде пленки на сходе с основания дефлектора. На характер распада потока воды, сходящего с основания дефлектора, и диаметр капель дождя оказывает влияние толщина пленки воды  $\delta$  в сечении II–II. Определив площади живого

сечения потока воды в сечениях I–I –  $S_I = \frac{\pi D_{\text{во}}^2}{4}$  и II–II –

$S_{II} = \pi \delta \left( D_{\text{дк}} + \delta \cos \frac{\alpha_k}{2} \right)$ , рассчитали диаметр дефлектора с учетом его безотрывного обтекания потоком воды:

$$D_{\text{дк}} = K_{\text{пр}} \frac{D_{\text{во}}^2}{4\delta} - \frac{\delta}{4} \cos \frac{\alpha_k}{2}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{пр}}$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий начало распада струи воды на капли;  $D_{\text{во}}$  – диаметр выходного отверстия сопла дождевальной насадки, м;  $\delta$  – толщина пленки потока воды, сходящего с основания дефлектора, м;  $\alpha_k$  – угол наклона образующих конусообразной поверхности дефлектора, град.

Для сохранения стабильной толщины пленки воды, сходящей с основания дефлектора, с учетом потерь напора воды, выходящего из сопла дождевальной насадки, а также потерь при обтекании дефлектора необходимо, чтобы его вершина находилась на расстоянии от выходного отверстия сопла дождевальной насадки  $L_0$ :

$$L_0 = K_{\text{прс}} \frac{H_{\text{пт}} D_{\text{во}} \psi_c + \sqrt{(H_{\text{пт}} D_{\text{во}} \psi_c)^2 + 4k_{\text{нас}} \varphi_{\text{ск}}^2 H_{\text{пт}} D_{\text{во}}}}{2k_{\text{нас}} \varphi_{\text{ск}}^2}, \quad (2)$$

где  $K_{\text{прс}}$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий начало распада струи воды на капли;  $H_{\text{пт}}$  – потери напора воды, м;  $\psi_c$  – коэффици-

ент,  $\psi_c = k_{\text{нас}} \varphi_{\text{ск}}^2 / D_{\text{во}}$ ;  $k_{\text{нас}}$  – коэффициент насыщенности потока воды;  $\varphi_{\text{ск}}$  – скоростной коэффициент, зависящий от формы входных кромок отверстия.

Вращение дефлектора обеспечивает поток воды, выходящий из сопла дождевальной насадки и поступающий на ребра конусообразной рифленой поверхности (рисунок 3).

За счет вращения дефлектора поток воды, сходящий с его основания, увеличивает начальную скорость  $v_n$  и, встречаясь с воздухом, распадается на капли, обеспечивая полив, радиус которого  $R_{\text{пк}}$  можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{пк}} = \frac{(v_n - K_{\text{вв}} v_{\text{дст}})^2 \sin 2\alpha_n}{2g} + \sqrt{\frac{[2(v_n - K_{\text{вв}} v_{\text{дст}})^2 \cos^2 \alpha_n]^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_n + 8gh_n (v_n - K_{\text{вв}} v_{\text{дст}})^2 \cos^2 \alpha_n}{2g}}, \quad (3)$$

где  $v_n$  – скорость потока воды на выходе с основания вращающегося дефлектора (начальная скорость полета капли дождя), м/с;  $K_{\text{вв}}$  – коэффициент, учитывающий воздействие сопротивления воздуха (ветра) на каплю дождя;  $v_{\text{дст}}$  – скорость ветра, действующая на каплю дождя, м/с;  $\alpha_n$  – угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту, град.;  $h_n$  – высота установки дождевальной насадки над поверхностью поля, м.

Повышение начальной скорости полета капли дождя происходит за счет дополнительной составляющей скорости, оцениваемой центробежным ускорением. Тогда:

$$v'_n = \frac{\psi_c \sqrt{2gH_{\text{вс}}}}{K_{\text{пр}}} + \frac{H_{\text{вс}} g R_{\text{дк}}}{K_{\text{реб}} \psi_c \sqrt{2gH_{\text{вс}}} (K_{\text{пр}} R_{\text{дк}} \cos \alpha_{\text{абс}} - R_{\text{г}} \cos \beta_{\text{окр}})}, \quad (4)$$

где  $H_{\text{вс}}$  – максимальная длина струи воды (напор), сохраняющей свою компактность без распада на капли, м;  $K_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1 + K_{\text{пр}}}{1 - \frac{2}{F_r}}}$  – поправочный коэффициент,

учитывающий параметр кинетичности набегающего потока воды, обтекающей конусообразную рифленую поверхность дефлектора;  $F_r$  – число Фруда

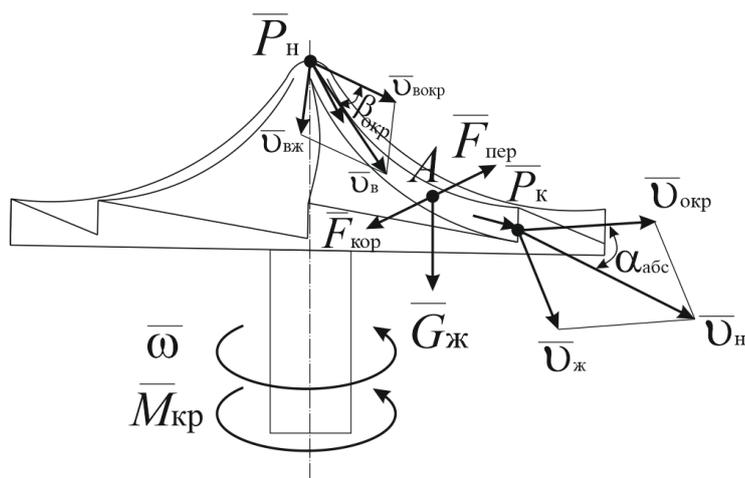


Рисунок 3 – Схема сил, действующих на дефлектор дождевальной насадки для обеспечения его вращения

набегающего потока воды;  $K_{\text{пр}}$  – полный гидравлический коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора воды на конусообразной рифленой поверхности дефлектора и на поверхности раздела фаз «жидкость – воздух»;  $R_{\text{дк}}$  – радиус основания дефлектора, м;  $K_{\text{реб}}$  – коэффициент, характеризующий количество ребер на рифленой конусообразной поверхности дефлектора;  $\alpha_{\text{абс}}$  и  $\beta_{\text{окр}}$  – углы между абсолютной и окружной скоростью струи воды соответственно на выходе с основания дефлектора и на входе на него, град.

На радиус полива оказывает дополнительное влияние угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту, град. Радиус основания дефлектора должен быть больше кривизны его конусообразной поверхности, описывающей траекторию полета капли дождя с учетом угла  $\alpha_{\text{н}}$ , определяемого как угол, образованный между линиями касательной к окружности и дневной поверхности. Тогда  $R_{\text{дк}} > R_{\text{ок}}$  и высота дефлектора  $L_{\text{к}}$ :

$$L_{\text{к}} = \frac{R_{\text{дн}}}{\text{tg } \alpha'_{\text{к}}} + R_{\text{ок}} \cos \frac{\alpha_{\text{кон}}}{2} + \delta_{\text{к}}, \quad (5)$$

где  $R_{\text{дн}}$  – расстояние от оси вращения дефлектора до точки касания окружности с его образующей, м;  $\alpha'_{\text{к}} = \frac{\alpha_{\text{к}}}{2}$  – угол наклона образующей конусообразной рифленой поверхности дефлектора, град.;  $R_{\text{ок}}$  – радиус кривизны конусообразной поверхности дефлектора, обеспечивающей вылет капли дождя под углом  $\alpha_{\text{н}}$ , м;  $\alpha_{\text{кон}}$  – угол контакта окружности с конусообразной рифленой поверхностью дефлектора, град.;  $\delta_{\text{к}}$  – толщина основания дефлектора в точке соприкосновения с окружностью, обеспечивающей вылет капли дождя с основания дефлектора под углом наклона к горизонту  $\alpha_{\text{н}}$ , м.

Радиус кривизны конусообразной поверхности дефлектора  $R_{\text{ок}}$ , обеспечивающий вылет капли дождя с основания дефлектора под углом  $\alpha_{\text{н}}$ :

$$R_{\text{ок}} = \frac{R_{\text{дк}} - L_{\text{кон}} \text{tg } \alpha'_{\text{к}}}{2 \sin \frac{\alpha_{\text{кон}}}{2}}. \quad (6)$$

Угол контакта  $\alpha_{\text{кон}}$  окружности с конусообразной рифленой поверхностью дефлектора:

$$\alpha_{\text{кон}} = 90 + \alpha'_{\text{к}} + \alpha_{\text{н}}. \quad (7)$$

Вращение дефлектора оказывает влияние на изменение диаметра капли дождя. В процессе схода с основания вращающегося дефлектора на нее действуют две силы – центробежная сила и сила поверхностного натяжения. Тогда для определения диаметра капли дождя, сходящей с дефлектора, при учете равенства данных сил, воспользуемся выражением Г. Д. Пажи:

$$d_{\text{кд}} = \frac{K_{\text{с}}}{\omega_{\text{дк}}} \sqrt{\frac{2F_{\text{пр}}}{D_{\text{дк}} \rho_{\text{в}}}}, \quad (8)$$

где  $K_c$  – коэффициент;  $\omega_{\text{дк}}$  – угловая скорость дефлектора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $F_{\text{пн}}$  – сила поверхностного натяжения воды,  $\text{Н/м}$ ;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $D_{\text{дк}}$  – диаметр основания дефлектора, м.

Угловая скорость вращения дефлектора, необходимая для образования капель дождя с требуемым диаметром:

$$\omega_{\text{к}} = \frac{H_{\text{вс}} g}{K_{\text{реб}} (R_{\text{дк}} v_{\text{в}} \cos \alpha_{\text{абс}} - R_{\text{б}} v_{\text{н}} \cos \beta_{\text{окр}})}, \quad (9)$$

где  $v_{\text{в}}$  – скорость движения потока воды на выходе из сопла дождевальной насадки, м/с.

На основе представленных аналитических зависимостей (1), (2), (5), (6) определены оптимальные конструктивные параметры дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, обеспечивающей создание дождя с требуемыми качественными показателями.

**В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований»** представлены программа и методика проведения лабораторных и полевых исследований.

Лабораторные и полевые исследования проводили в специализированных лабораториях ФГБОУ ВО Вавиловский университет и на полях ООО «Наше дело» в соответствии с методикой СТО АИСТ 11.1-2010 «Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей». Для проведения исследований были изготовлены дождевальные насадки с вращающимся дефлектором (рисунок 4).



Рисунок 4 – Общий вид лабораторной установки с исследуемыми дождевальными насадками

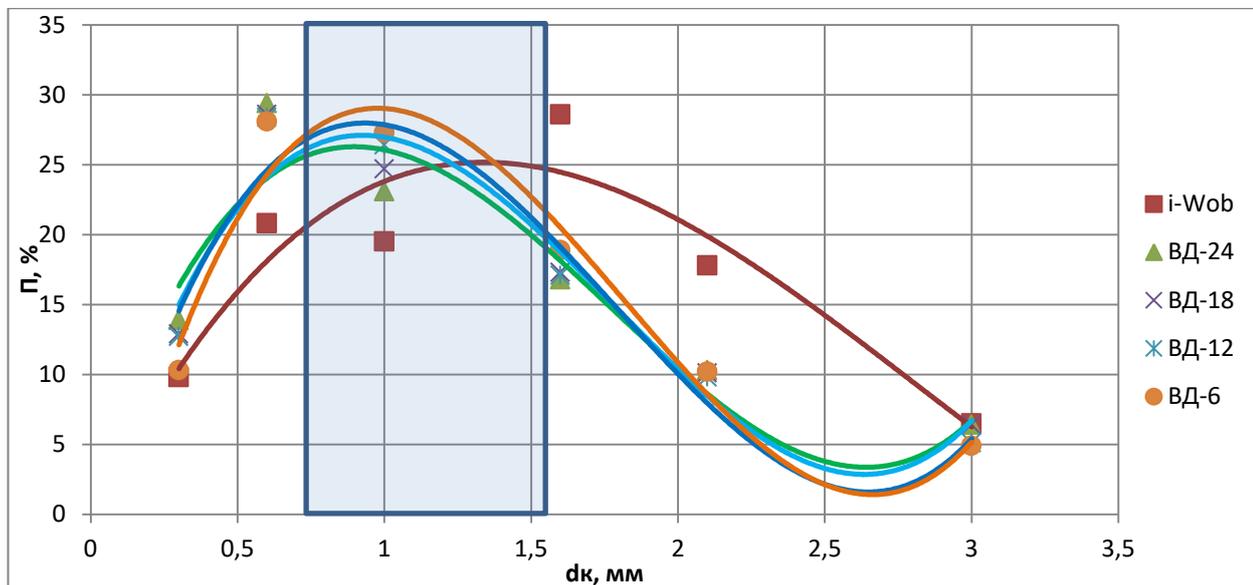
В ходе исследований определяли качественные показатели дождя: диаметр капель; радиус полива; средняя и мгновенная интенсивности дождя; равномерность полива; потери воды на испарение и снос ветром. Достоверность экспериментальных исследований подтверждена многократностью проведения опытов с применением методов математической статистики и современного программного обеспечения Microsoft Office Excel и Statistica.

**В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований»** приведены результаты лабораторных и полевых исследований серийных дождевальных насадок (насадка со стационарным конусом, имеющим глад-

кую поверхность, и насадка с вращающимся дефлектором Senniger i-Wob), а также предлагаемой насадки с вращающимся дефлектором, устанавливаемых на дождевальную машину кругового действия «Каскад» («Кубань-ЛК1»).

В ходе экспериментальных исследований определяли влияние конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором на качественные показатели создаваемого ею дождя.

Установлено, что с увеличением количества ребер, выполненных на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора, с 6 до 24 и давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа угловая скорость повышается с 7,6 до 40,5 с<sup>-1</sup>. Это способствует созданию мелкокапельного дождя, который содержит на 18,7 % больше капель диаметром 0,6...1,5 мм по сравнению с серийной дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, и на 23,1 % больше по сравнению с серийной дождевальной насадкой Senniger i-Wob (рисунок 5).

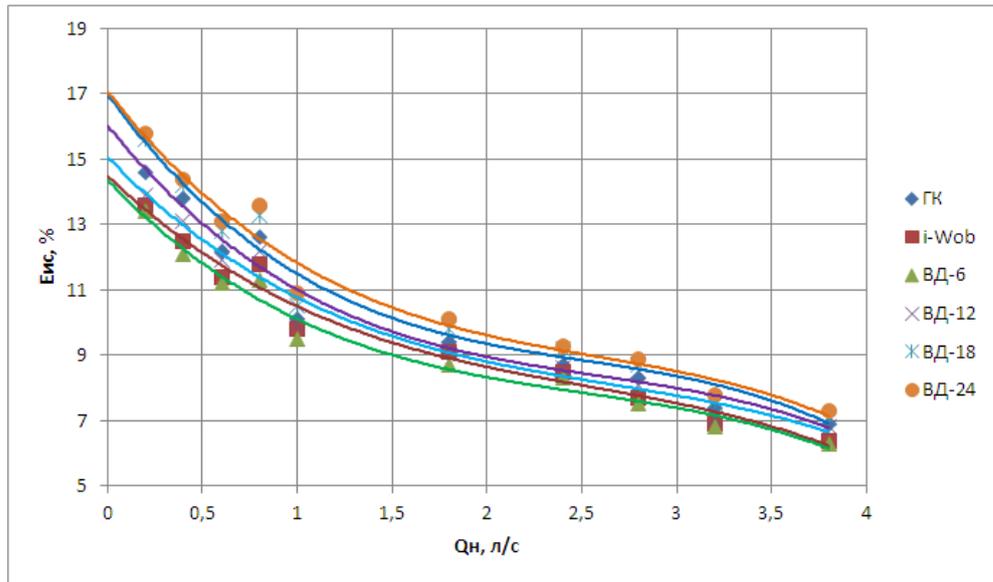


Senniger i-Wob	$\Pi_k = 2,5235d_k^3 - 21,185d_k^2 + 43,162d_k - 0,6884$	$R^2 = 0,8502$
ВД-24	$\Pi_k = 8,6692d_k^3 - 46,015d_k^2 + 61,68d_k + 1,7331$	$R^2 = 0,8655$
ВД-18	$\Pi_k = 9,7281d_k^3 - 51,94d_k^2 + 71,147d_k - 1,9606$	$R^2 = 0,9075$
ВД-12	$\Pi_k = 10,465d_k^3 - 56,203d_k^2 + 77,54d_k - 3,9358$	$R^2 = 0,9361$
ВД-6	$\Pi_k = 11,526d_k^3 - 62,927d_k^2 + 89,943d_k - 9,517$	$R^2 = 0,9445$

Рисунок 5 – Влияние количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора предлагаемой насадки на процентное содержание в дождевом облаке капель дождя разного диаметра при давлении воды на выходе из сопла 0,2 МПа

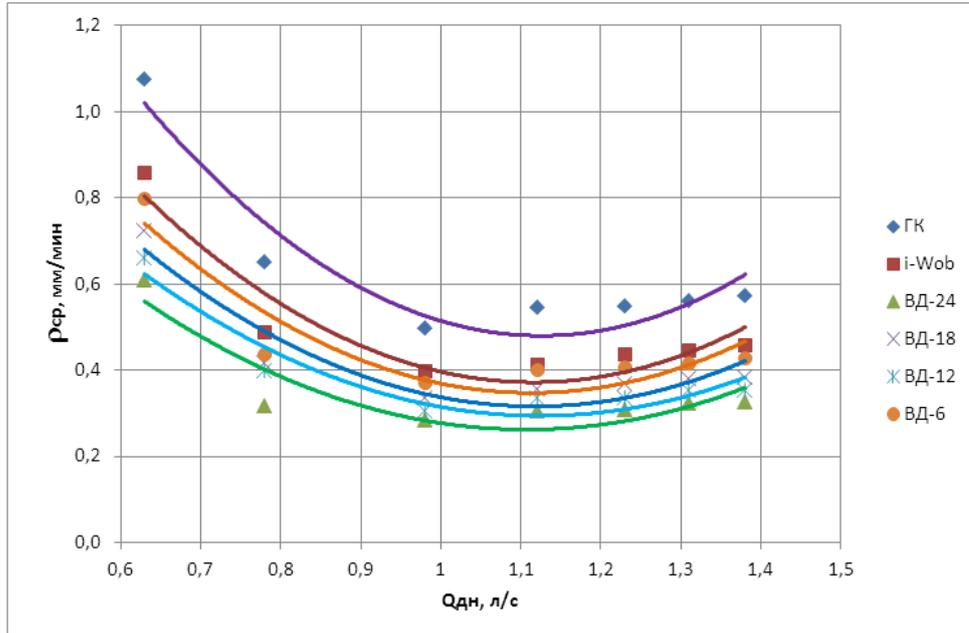
Повышение давления на выходе из сопла приводит к повышению угловой скорости дефлектора предлагаемой дождевальной насадки, что способствует увеличению радиуса полива на 10,9–27,5 % по сравнению с серийными дождевальными насадками. Проведена оценка сходимости теоретических и экспериментальных зависимостей влияния давления на выходе из сопла насадки на радиус полива (рисунок 6). Расхождения составили 1,5–4,5 %.





ГК	$E_{исв} = -0,3087Q_{н}^3 + 2,4032Q_{н}^2 - 7,1071Q_{н} + 16,21$	$R^2 = 0,9696$
Senniger i-Wob	$E_{исв} = -0,3192Q_{н}^3 + 2,4724Q_{н}^2 - 7,3977Q_{н} + 17,069$	$R^2 = 0,9693$
ВД-24	$E_{исв} = -0,2331Q_{н}^3 + 1,7706Q_{н}^2 - 5,533Q_{н} + 14,49$	$R^2 = 0,9733$
ВД-18	$E_{исв} = -0,2344Q_{н}^3 + 1,8681Q_{н}^2 - 5,9254Q_{н} + 15,058$	$R^2 = 0,9693$
ВД-12	$E_{исв} = -0,3661Q_{н}^3 + 2,7722Q_{н}^2 - 7,8929Q_{н} + 16,976$	$R^2 = 0,9657$
ВД-6	$E_{исв} = -0,272Q_{н}^3 + 2,0513Q_{н}^2 - 6,0256Q_{н} + 14,35$	$R^2 = 0,9782$

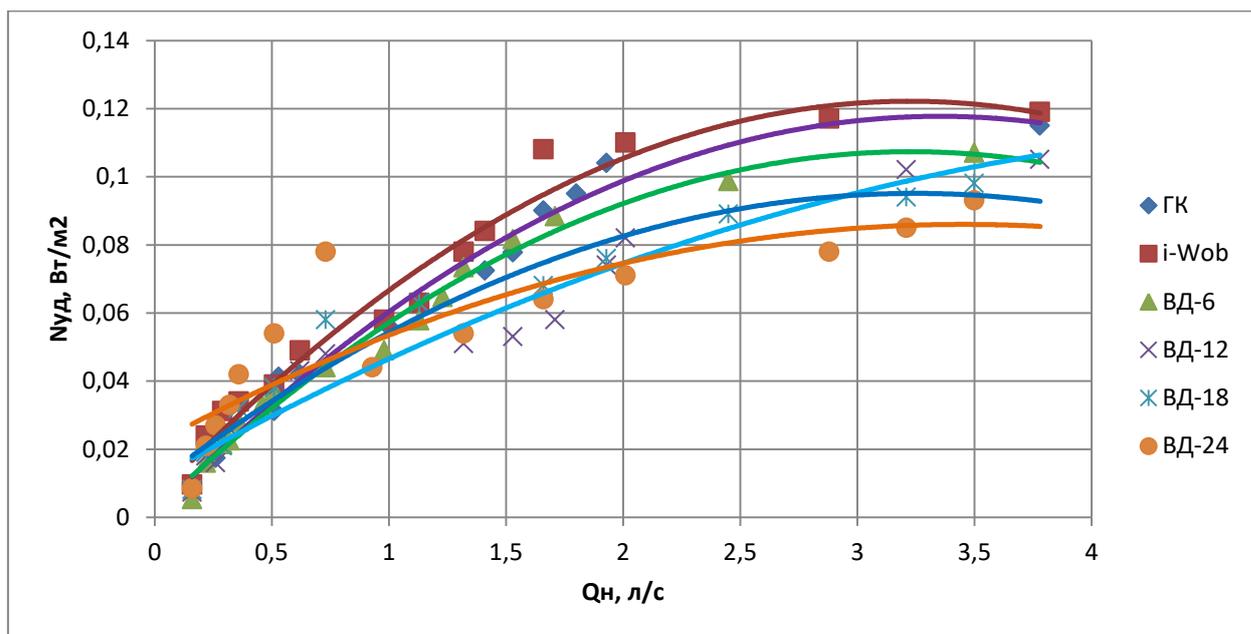
Рисунок 7 – Изменение потерь воды на испарение и снос дождя ветром вдоль трубопровода ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1») при поливе дождевальными насадками, установленными на высоте 1 м относительно поверхности поля



ГК	$\rho_{ср} = 2,1989Q_{дн}^2 - 4,9498Q_{дн} + 3,2649$	$R^2 = 0,9126$
Senniger i-Wob	$\rho_{ср} = 1,3078Q_{дн}^2 - 2,8952Q_{дн} + 1,8641$	$R^2 = 0,8238$
ВД-24	$\rho_{ср} = 1,3534Q_{дн}^2 - 3,0404Q_{дн} + 2,0013$	$R^2 = 0,9082$
ВД-18	$\rho_{ср} = 1,5311Q_{дн}^2 - 3,4216Q_{дн} + 2,2272$	$R^2 = 0,8951$
ВД-12	$\rho_{ср} = 1,686Q_{дн}^2 - 3,754Q_{дн} + 2,4366$	$R^2 = 0,8578$
ВД-6	$\rho_{ср} = 1,8346Q_{дн}^2 - 4,0936Q_{дн} + 2,6549$	$R^2 = 0,8958$

Рисунок 8 – Изменение средней интенсивности дождя дождевальных насадок с диаметром выходного отверстия сопла 8 мм в зависимости от расхода воды

Увеличение интенсивности и диаметра капель дождя усиливает негативное воздействие на почву и растения, которое можно оценить удельной мощностью дождя (рисунок 9). Установлено, что дождь с наибольшей величиной удельной мощности создают серийные дождевальные насадки Senniger i-Wob ( $0,119 \text{ Вт/м}^2$ ) и насадка со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью ( $0,115 \text{ Вт/м}^2$ ). У предлагаемой конструкции этот показатель составляет  $0,0053 \dots 0,105 \text{ Вт/м}^2$  в зависимости от количества ребер, выполненных на конусообразной рифленой поверхности дефлектора.



ГК	$N_{уд} = -0,0104Q_n^2 + 0,0696Q_n + 0,0011$	$R^2 = 0,9851$
Senniger i-Wob	$N_{уд} = -0,0112Q_n^2 + 0,0725Q_n + 0,0054$	$R^2 = 0,972$
ВД-6	$N_{уд} = -0,0101Q_n^2 + 0,0653Q_n + 0,0002$	$R^2 = 0,9848$
ВД-12	$N_{уд} = -0,0036Q_n^2 + 0,039Q_n + 0,0112$	$R^2 = 0,9561$
ВД-18	$N_{уд} = -0,0081Q_n^2 + 0,0525Q_n + 0,0099$	$R^2 = 0,9582$
ВД-24	$N_{уд} = -0,0054Q_n^2 + 0,0373Q_n + 0,0216$	$R^2 = 0,9687$

Рисунок 9 – Удельная мощность дождя, создаваемого дождевальными насадками вдоль трубопровода ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1») в зависимости от расхода воды

Снижение удельной мощности дождя у предлагаемой дождевальной насадки позволило увеличить достокую норму полива на 28,4 % по сравнению с серийными дождевальными насадками.

В совокупности улучшение качественных показателей дождя, создаваемого предлагаемой дождевальной насадкой с вращающимся дефлектором, позволило повысить равномерность полива ДМ «Каскад», что подтверждает коэффициент равномерности полива  $0,73-0,76$ . Для дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью этот показатель составил  $0,72$ , а для Senniger i-Wob –  $0,68$  (см. таблицу).

**Коэффициенты, характеризующие равномерность полива ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1»), оборудованной дождевальными насадками**

Дождевальная насадка	Коэффициент		
	эффективного полива $K_{эф.п}$	недостаточного полива $K_{н.п}$	избыточного полива $K_{из.п}$
Со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью	0,72	0,13	0,15
Senniger i-Wob	0,68	0,14	0,18
Предлагаемая дождевальная насадка с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью			
с 6 ребрами	0,73	0,15	0,12
с 12 ребрами	0,74	0,16	0,1
с 18 ребрами	0,75	0,16	0,09
с 24 ребрами	0,76	0,15	0,09

В пятой главе «*Экономическое обоснование применения на дождевальной машине дождевальных насадок с вращающимся дефлектором*» представлены результаты работы ДМ «Каскад», оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью и дана оценка экономической эффективности их использования.

Производственные испытания были проведены в УНПО «Поволжье» и ООО «Наше дело» (Саратовская обл.) (рисунок 10).



Рисунок 10 – Производственные испытания ДМ «Каскад», оснащенной предлагаемыми дождевальными насадками с оптимальными параметрами

Установка на ДМ дождевальных насадок с вращающимся дефлектором за счет снижения потерь воды на испарение и снос ветром позволила получить годовой экономический эффект в размере 58309,7 руб. на одну машину.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная задача повышения качественных показателей полива дождевальными машинами кругового действия путем применения дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью. Получены теоретические и экспериментальные зависимости, позволяющие обосновать рациональные параметры и режим работы дождевальной насадки: диаметр и высота дефлектора; радиус кривизны конусообразной рифленой поверхности; угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту; радиус полива; диаметр капель дождя. Использование дождевальной машины, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором, позволит повысить эффективность полива сельскохозяйственных культур.

1. Проведенный анализ дождеобразующих устройств, применяемых на современных дождевальных машинах кругового действия, показал, что они формируют дождь с большим диаметром капель, что повышает его интенсивность и удельную мощность дождевого облака и негативно воздействует на сельскохозяйственные растения и верхние слои почвы. Используемые дождеобразующие устройства характеризуются низкой равномерностью полива и большими потерями дождя на испарение и снос ветром. На основании проведенного анализа существующих конструкций дождевальных насадок была разработана конструкция дождевальной насадки (патент РФ на изобретение № 2615574), позволяющая повысить качественные показатели дождя за счет установки вращающегося дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью.

2. Проведенные теоретические исследования позволили получить математические зависимости, позволяющие определить рациональные конструктивно-технологические параметры дождевальной насадки, способной формировать ветроустойчивый дождь с малым диаметром капель и высокой равномерностью полива: расстояние от вершины дефлектора до сопла дождевальной насадки; диаметр дефлектора; высота дефлектора; радиус кривизны конусообразной рифленой поверхности дефлектора; угловая скорость; радиус полива. Рациональные конструктивные параметры дождевальной насадки с вращающимся дефлектором:

- диаметр дефлектора –  $D_{\text{дк}} = 50$  мм;
- высота дефлектора –  $L_{\text{к}} = 34 \dots 38$  мм;
- угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту –  $\alpha_{\text{н}} = 20^\circ \dots 22^\circ$ ;
- расстояние от вершины дефлектора до выходного отверстия сопла дождевальной насадки –  $L_{\text{о}} = 15 \dots 25$  мм;
- радиус кривизны конусообразной рифленой поверхности –  $R_{\text{ок}} = 20 \dots 22$  мм;
- количество ребер на рифленой поверхности дефлектора  $n_{\text{реб}}$  – 6 и 12 шт.

3. Экспериментальные исследования показали, что выполненные на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора 6 или 12 ребер позволяют обеспечивать его стабильное вращение при низком напоре воды (0,1...0,2 МПа), выходящей из сопла дождевальной насадки. Вращение дефлектора способствует формированию дождя с наибольшим процентным

содержанием капель диаметром 0,6...1,5 мм, которое выше на 18,7–29,8 % по сравнению с дождевальными насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, и Senniger i-Wob. Радиус полива предлагаемой дождевальной насадкой выше в среднем на 12,3 % по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, но меньше радиуса полива дождевальной насадкой Senniger i-Wob при одинаковых условиях. Сохранение радиуса полива при уменьшении угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту с 32° до 22° позволяет повысить ветроустойчивость дождя и снизить на 9,4 % потери воды на испарение и снос ветром по сравнению с серийными дождевальными насадками.

4. Предлагаемая дождевальная насадка обеспечивает наименьшую интенсивность дождя 0,294...0,725 мм/мин и полив с минимальным воздействием на почву и растения. Удельная мощность дождя, создаваемого предлагаемой дождевальной насадкой, составляет 0,0053...0,105 Вт/м<sup>2</sup>. Это меньше по сравнению с серийными дождевальными насадками. Коэффициент равномерности полива – 0,73–0,76, что выше по сравнению с серийными дождевальными насадками. Предлагаемая дождевальная насадка позволяет выполнять полив с максимально возможными допустимыми поливными нормами и предотвратить образование стока воды с поверхности поля.

5. Установка на ДМ «Каскад» дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью за счет снижения потерь воды на испарение и снос ветром, лучшей равномерности полива и наименьшего воздействия дождя на почву позволила получить годовой экономический эффект в размере 58309,7 руб. на одну машину.

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ**

1. Сельскохозяйственным организациям для обеспечения эффективного полива сельскохозяйственных культур, восприимчивых к негативному воздействию дождя (например, сои), рекомендуется использовать на широкозахватных дождевальных машинах кругового действия, работающих на пониженном давлении воды в условиях сильных ветров, дождевальные насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

2. Проектным организациям, научно-исследовательским учреждениям, учебным заведениям и производителям дождевальных машин рекомендуется использовать полученные математические зависимости.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Перспективным направлением дальнейшей разработки темы представляется создание автоматизированной системы, обеспечивающей управление подачей воды требуемого давления в дождевальную насадку для регулирования выдаваемой нормы полива в зависимости от микронеровностей орошаемого поля и метеоданных.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ*

1. Русинов, Д. А. Теоретические аспекты создания дождевальной насадки с вращающимся дефлектором / Д. А. Русинов, А. В. Кравчук, Д. А. Колганов // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 4. – С. 142–147.

2. Русинов, Д. А. Теоретическое обоснование конструктивных параметров вращающегося дефлекторного конуса дождевальной насадки, обеспечивающей повышение ветроустойчивости дождя / А. В. Кравчук, Д. А. Русинов // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 5. – С. 146–150.

### *Патенты*

3. Пат. 2615574 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/00. Дождевальная дефлекторная насадка / Русинов А. В., Слюсаренко В. В., Хизов А. В., Русинов Д. А., Акпасов А. П., Рыжко Н. Ф., Надежкина Г. П., Затицацкий С. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». – № 2015148623 ; заявл. 12.11.2015 ; опубл. 05.04.2017, Бюл. № 10.

4. Пат. 2616842 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/00. Дождевальная дефлекторная насадка / Русинов А. В., Слюсаренко В. В., Хизов А. В., Русинов Д. А., Акпасов А. П., Рыжко Н. Ф., Надежкина Г. П., Затицацкий С. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2015148965 ; заявл. 16.11.2015 ; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11.

5. Пат. 2670454 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/00. Способ определения потерь воды на испарение в воздухе при дождевании / Слюсаренко В. В., Русинов А. В., Надежкина Г. П., Акпасов А. П., Русинов Д. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2017114613 ; заявл. 27.04.2017 ; опубл. 23.10.2018, Бюл. № 30.

### *В сборниках научных конференций и прочих изданиях*

6. Слюсаренко, В. В. Определение потерь воды на испарение при поливе сельскохозяйственных культур / В. В. Слюсаренко, А. В. Русинов, Г. П. Надежкина, А. П. Акпасов, Д. А. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2020. – С. 68–77.

7. Русинов, А. В. Сохранение плодородия сельскохозяйственных почв за счет снижения негативного воздействия дождя дождевальными машинами / А. В. Русинов, А. П. Акпасов, Д. А. Русинов. // Развитие научного наследия великого учёного на современном этапе : Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 95-летию члена-корреспондента РАСХН, Заслуженного деятеля науки РСФСР и РД, профессора М.М. Джамбулатова. – Махачкала, 2021. – С. 234–241.

8. *Русинов, Д. А.* Вращающиеся дождевальные насадки, применяемые на дождевальных машинах кругового действия / Д. А. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : Амирит, 2022. – С. 72–78.

9. *Русинов, Д. А.* Исследования качественных показателей дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимся дефлектором / Д. А. Русинов, А. В. Кравчук, Д. А. Колганов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : Амирит, 2022. – С. 78–83.

10. *Русинов, Д. А.* Результаты исследований снижения негативного воздействия дождя дождевальными насадками с вращающимся дефлекторным конусом / Д. А. Русинов, А. В. Кравчук, Д. А. Колганов, А. В. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов : Амирит, 2022. – С. 574–579.

11. *Русинов, Д. А.* Влияние угловой скорости вращения дефлекторного конуса дождевальной насадки на диаметр капель дождя / Д. А. Русинов // Сб. трудов VII студенческой научно-практической конференции «Молодой исследователь : от идеи к проекту» / ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет». – Йошкар-Ола, 2023. – С. 127–130.

12. *Кравчук, А. В.* Влияние конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором на ветроустойчивость дождя / А. В. Кравчук, Д. А. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : сб. трудов IX Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Вавиловский университет – Саратов : 2023. – С. 526–531.

13. *Русинов, Д. А.* Результаты экспериментальных исследований дождевальных насадок с вращающимся дефлектором / Д. А. Русинов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : сб. трудов IX Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО Вавиловский университет – Саратов : 2023. – С. 546–531.

---

Подписано в печать 16.06.2023 г.

Формат 60×84 1/16

Печ. л. 1,0

Тираж 100

---