

**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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Кравчук Алексей Владимирович

Саратов 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	12
1.1 Состояние мелиоративного комплекса России и Саратовской области .....	12
1.2 Анализ дождевальных машин отечественных производителей .....	19
1.3 Требования к качеству технологического процесса полива .....	23
1.4 Дождеобразующие устройства современных дождевальных машин .....	25
1.5 Цель и задачи исследований .....	49
1.6 Выводы по главе .....	49
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДОЖДЯ ДЕФЛЕКТОРНОЙ НАСАДКОЙ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДЕФЛЕКТОРОМ КОНУСООБРАЗНОЙ ФОРМЫ С РИФЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ .....	51
2.1 Предлагаемая конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью .....	51
2.2 Определение конструктивно-технологических параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью .....	54
2.3 Теоретические исследования влияния конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором на процесс формирования дождя и его качественные показатели .....	72
2.4 Обоснование основных эксплуатационных параметров дождевальной машины, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором .....	84
2.5 Выводы по главе .....	87
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	89
3.1 Программа исследований .....	89

3.2 Описание экспериментальной лабораторной установки .....	90
3.3 Методика лабораторных исследований качественных показателей дождя .....	93
3.4 Методика полевых исследований качественных показателей дождя, создаваемого дождевальными машинами кругового действия .....	98
3.5 Программа и методика экспериментальных исследований .....	103
3.6 Последовательность проведения опытов .....	109
3.7 Выводы по главе .....	111
<b>4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>112</b>
4.1 Результаты лабораторных исследований .....	112
4.1.1 Определение расходно-напорной характеристики дождевальной насадки .....	112
4.1.2 Определение радиуса полива дождевальной насадкой .....	115
4.1.3. Определение угловой скорости вращающегося дефлектора дождевальной насадки .....	128
4.1.4 Исследование диаметра капель дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимися дефлекторами .....	130
4.1.5 Распределение интенсивности дождя вдоль радиуса полива дождевальными насадками .....	139
4.2 Расстановка дождевальных насадок на трубопроводе дождевальной машины .....	150
4.3 Потери воды на испарение и снос ветром при поливе дождевальными насадками .....	151
4.4 Равномерность полива дождевальной машиной, оборудованной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором .....	156
4.5 Удельная мощность дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимся дефлектором .....	159

4.6 Норма полива до стока дождевальнoй машиной, оборудованной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором .....	163
4.7 Выводы по главе .....	164
<b>5 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НА ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЕ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ НАСАДОК С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДЕФЛЕКТОРОМ .....</b>	<b>166</b>
5.1 Производственные испытания дождевальнoй машины, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором .....	166
5.2 Расчет технико-экономической эффективности .....	167
5.3 Выводы по главе .....	170
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>171</b>
<b>ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ .....</b>	<b>173</b>
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ .....</b>	<b>173</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>174</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>198</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение населения страны продукцией растениеводства, производимой на орошаемых полях, – одна из важных составляющих Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации, в соответствии с которой развитие мелиоративного комплекса является одним из основных приоритетов государственной политики сельскохозяйственного производства [22].

В настоящее время в Российской Федерации площадь земель сельскохозяйственного назначения составляет 382,4 млн га, из которых только 4,69 млн га приходится на орошаемые земли. Согласно Постановлению Правительства РФ от 14 мая 2021 г. № 731 «О Государственной программе эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации», к 2030 г. планируется увеличить площадь земель сельскохозяйственного назначения до 13234,8 тыс. га, из которых 2956,3 тыс. га будут подвержены реконструкции, техническому перевооружению и строительству объектов мелиоративного комплекса [40].

Техническое перевооружение мелиоративного комплекса сопровождается установкой на орошаемых полях современных многоопорных широкозахватных дождевальных машин кругового действия. Например, в Саратовской области из 918 используемых ДМ 861 машина является многоопорной широкозахватной кругового действия [109]. С их помощью производят полив различных сельскохозяйственных культур на площади 257,3 тыс. га, которая ежегодно увеличивается в среднем на 6,8 тыс. га [44, 106, 110, 181].

Техническое перевооружение мелиоративного комплекса осуществляют путем установки новых ДМ на вводимых орошаемых полях и замены имеющихся изношенных дождевальных машин на новые Российского и зарубежного производства, оснащенные дождеобразующими устройствами. Однако установленные на дождевальных машинах дождеобразующие устройства зарубежных производителей Senninger и Nelson Irrigation, а также дождевальные насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью в климатических условиях Саратов-

ской области обладают значительными недостатками, среди которых – низкая равномерность полива; высокие потери воды на испарение и снос ветром; создание дождя с большим диаметром капель; высокие интенсивность и удельная мощность дождя. Полив серийными дождеобразующими устройствами сопровождается негативным воздействием на почву и сельскохозяйственные растения, что приводит к снижению урожая.

В связи с этим разработка конструкций дождеобразующих устройств, позволяющих повысить равномерность полива и снизить потери воды на испарение и снос ветром, а также минимизировать негативное воздействие на почву и растения, представляет научную проблему, решение которой будет способствовать развитию сельскохозяйственного производства.

**Актуальность темы исследования.** В почвенных и климатических условиях Саратовской области получение стабильно высоких урожаев не возможно без полива. В соответствии с правительственной программой эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса в 2022 г. в области было введено 6,8 тыс. га орошаемых площадей, на которых были установлены новые ДМ кругового действия как Российского, так и зарубежного производства. Несомненно, применение дождевальных машин позволяет осуществлять полив в установленные сроки и с заданными поливными нормами, что так необходимо для роста сельскохозяйственных растений.

Однако установленные на современных дождевальных машинах дождеобразующие устройства создают дождевое облако, поднимающееся относительно поверхности поля на высоту до 5 м, в результате чего наблюдаются высокая неравномерности полива и большие потери воды на испарение и снос ветром. Снижение высоты установки дождеобразующих устройств относительно поверхности поля позволяет повысить ветроустойчивость дождя, но полив выполняется с малым радиусом, что приводит к повышению интенсивности дождя и, как следствие, смыву плодородного слоя почвы. При этом был зафиксирован факт увеличения диаметра капель, приводящий к повышению мощности создаваемого до-

жда, который оказывает негативное воздействие на почву и поливаемое растение, что вызывает снижение урожая. Тенденция уменьшения напора воды перед дождевальными машинами 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. Исаев, 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 развитие и рост 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 встречи 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 дождевальной насадки 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, описывающий процесс формирования и определения диаметра капли дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью;
- получена аналитическая зависимость, определяющая радиус полива, выполняемого дождевальными насадками 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 дождевальными машинами кругового действия, оснащёнными 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 «Сара-

товский 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).

**Реализация результатов исследований.** Дождевальные машины кругового действия, оснащенные дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью внедрены в ООО «Мелиоративные машины», УНПО «Поволжье», ООО «Наше дело».

**Публикации.** 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.

# 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Состояние мелиоративного комплекса России и Саратовской области

В Российской Федерации хорошо развита отрасль агропромышленного производства. Однако необходимо отметить, что более 70 % посевных площадей расположены в засушливой зоне и для получения стабильных и высоких урожаев сельскохозяйственных культур требуется постоянный полив [96, 168]. Для подачи дополнительной воды на посевные площади применяют мелиоративный комплекс.

Следует отметить тот факт, что мелиоративный комплекс Российской Федерации в конце 90-х – начале 2000-х годов находился в кризисном периоде, в ходе которого было утрачено большое количество орошаемых площадей и произошла потеря производства современных дождевальными машин. Итогом этого стали негативные последствия. Так, по данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации [110, 152, 177], на 2022 г. имеется 9,47 млн га мелиорируемых земель, из 4,69 млн га орошаемых и 4,78 млн га осушенных. В хорошем состоянии находятся 2,27 млн га, в удовлетворительном – 1,12 млн га, в неудовлетворительном – 850 тыс. га (таблица 1.1). Из общего объема орошаемых земель под искусственным поливом находилось всего 1,84 млн га. Недостаточное финансирование мелиоративного комплекса России и постоянная эксплуатация мелиоративной техники без капитальных ремонтов на протяжении многих лет привели к значительному износу основных фондов оросительных систем, который составляет 70 % [88, 89].

Снижение финансирования мелиоративного комплекса России негативно отразилось и на количественном составе дождевальных машин. В настоящее время в России их парк насчитывает 6393 ед. (рисунок 1.1), из них ДМ «Фрегат» – 2966 ед. (46,4 % парка отечественной дождевальной техники), широкозахватных электрифицированных ДМ «Кубань» – 47 ед. (0,73 %), ДДА-100М – 513 ед. (8,3 %), ДМ фронтального действия ДКШ-64 «Волжанка» – 575 ед. (8,9 %), прочих дождевальных машин и мобильных систем с разборными трубопроводами – 1374 ед. (21,5 %), из которых шланго-барабанных ДМ 696 ед. (10,8 %) [4, 141]. Необходимо отметить, что более 80 % дождевальных машин имеют высокий износ и отработали свой нормативный срок эксплуатации [98, 99, 171].

Таблица 1.1 – Экологическое состояние орошаемых земель в регионах Российской Федерации

Федеральный округ Российской Федерации	Экологическое состояние, %		
	хорошее	удовлетворительное	неудовлетворительное
Центральный	45	30	25
Северо-Западный	8	54	38
Приволжский	68	28	4
Сибирский	63	28	9
Северо-Кавказский	41	25	34
Южный	60	22	18
Уральский	53	36	11
Дальневосточный	46	21	33

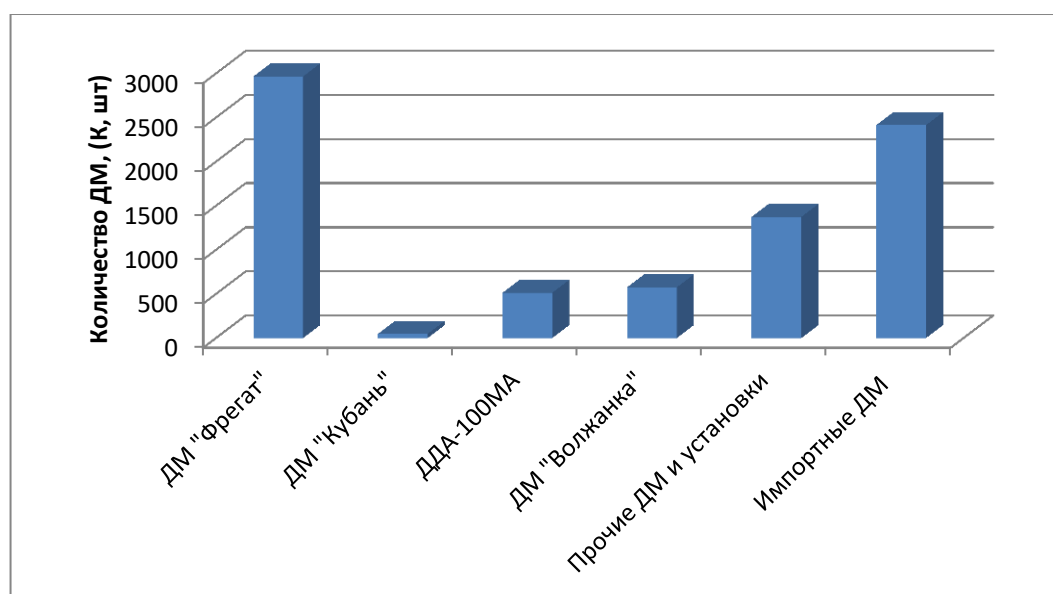


Рисунок 1.1 – Количественный состав дождевальных машин в Российской Федерации на 01.01.2023 г.

Импортных дождевальных машин в России 2414 ед., из них широкозахватных электрифицированных ДМ 952 ед. (39,4 % поставляемых из-за рубежа машин), в том числе широкозахватных дождевальных машин кругового действия 839 ед., фронтальных – 113 ед.; шланго-барабанных – 951 ед., прочих дождевальных машин и установок 511 ед., или 21,3 %. Доля импортных ДМ в структуре их общего числа в Российской Федерации составляет до 25 % [101].

Вследствие морального и физического устаревания происходят снижение количественного состава дождевальных машин «Фрегат», «Волжанка» и «Кубань» [7, 72] и их замещение более новыми ДМ иностранного производства Zimmatic, Valley, Bauer и др., а также российского производства «Кубань ЛК-1», «Каскад», ZDM и др.

В России в 90-х годах XX в. многие предприятия, осуществлявшие выпуск дождевальных машин, закрылись, но часть из них была переориентирована на производство новых конструкций ДМ. В настоящее время активно стали развиваться такие предприятия, как ООО «АгисИнжиниринг» (г. Москва); ООО «Агрополив СПб» (г. Санкт-Петербург); ООО «БСГ» (г. Тольятти); Волгоградский завод оросительной техники; ПО «Кропоткинский машиностроительный завод «Радуга» (г. Кропоткин); ООО «САБОНагро» (г. Гулькевичи); Казанский завод оросительной техники (г. Казань); «Мелиотехмаш» (г. Котельников); ООО «Мелиоративные машины» (г. Саратов) [28, 49, 96].

Однако данные предприятия производят небольшое количество дождевальных машин и полностью не покрывают требуемые объемы. В 2021 г. была принята «Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса Российской Федерации на период 2022–2031 гг.», которая была утверждена постановлением Правительства Российской Федерации № 731 от 14 мая 2021 г. Согласно данной программе, к концу 2031 г. планируется вовлечь в оборот орошаемых земель сельскохозяйственного назначения площадью более 4,28 млн га, и для этих целей необходимо поставить 29 тыс. ед. широкозахватных дождевальных машин в основном кругового действия [71, 72, 87, 108, 130].

При реализации программы развития мелиоративного комплекса планируется поставка дождевальных машин как Российского, так и иностранного производства (Zimmatic, Bauer, Valley, T-L, Western и др.). Однако применение данных машин сопровождается рядом существенных недостатков, среди которых – высокая стоимость; требовательность к качеству подаваемой воды; трудоемкий и дорогостоящий ремонт, а также сложность проведения технического обслуживания и т. д. Кроме того, введенные антироссийские санкции негативно отражаются на поставках новых импортных дождевальных машин, которые фактически полностью прекращены. Таким образом, необходимо делать упор на поставку современных

дождевальных машин кругового действия Российского производства, при этом следует постоянно совершенствовать их конструкцию на основе проводимых научных исследованиях и внедрения перспективных технических решений, направленных на совершенствование технологии полива.

В г. Саратове действует предприятие ООО «Мелиоративные машины», занимающееся производством современных дождевальных машин кругового действия «Каскад» и «Кубань». Данная техника активно поставляется и используется на орошаемых полях Саратовской области, однако производимого количества ДМ недостаточно.

По данным Министерства сельского хозяйства Саратовской области, в настоящее время в регионе насчитывается 918 дождевальных машин, из которых 266 ед. Российского производства и 652 ед. иностранного (таблица 1.2, рисунок 1.2) [109].

Таблица 1.2 – Парк дождевальных машин в Саратовской области на конец 2022 г.

Марка ДМ	Количество, ед.	Площадь орошаемых земель, га
<i>Отечественного производства</i>		
«Фрегат»	203	13 419
«Днепр»	17	1 250
«Волжанка»	1	65
ДДА-100	17	950
«Кубань ЛК1» («Каскад»)	6	475
«Орсис»	1	75
«Иртек»	21	1 396,30
<i>Импортного производства</i>		
Zimmatic	350	29 346,22
T-L	57	4 808
Valley	194	14 747,48
Reinke	7	674,7
Bauer	8	360
IRRIGREAT	3	187
Livada	2	142
Rainstar	20	751,1
Genterliner	2	100
Osmic	9	255
Итого	918	69 001,8

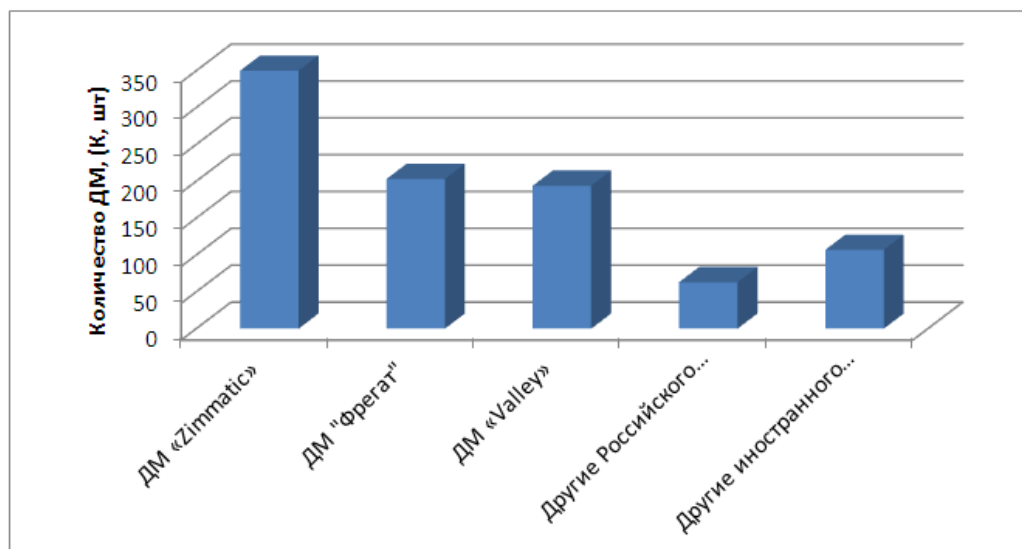


Рисунок 1.2 – Количественный состав дождевальных машин в Саратовской области на конец 2022 г.

В Саратовской области произошло резкое сокращение количества дождевальных машин. Так, согласно данным областного Министерства сельского хозяйства [29, 56] в области в начале 1990 г. насчитывалось 6085 ед. дождевальных машин разного типа, а в 2016 г. их число не превышало 1700 ед., т. е. снижение составило 3,5 раза. В настоящее время в области осталось 918 ДМ, т. е. в 1,8 раза меньше по сравнению с 1990 г. Динамику изменения количественного состава дождевальных машин в Саратовской области можно проследить по гистограмме (рисунок 1.3).

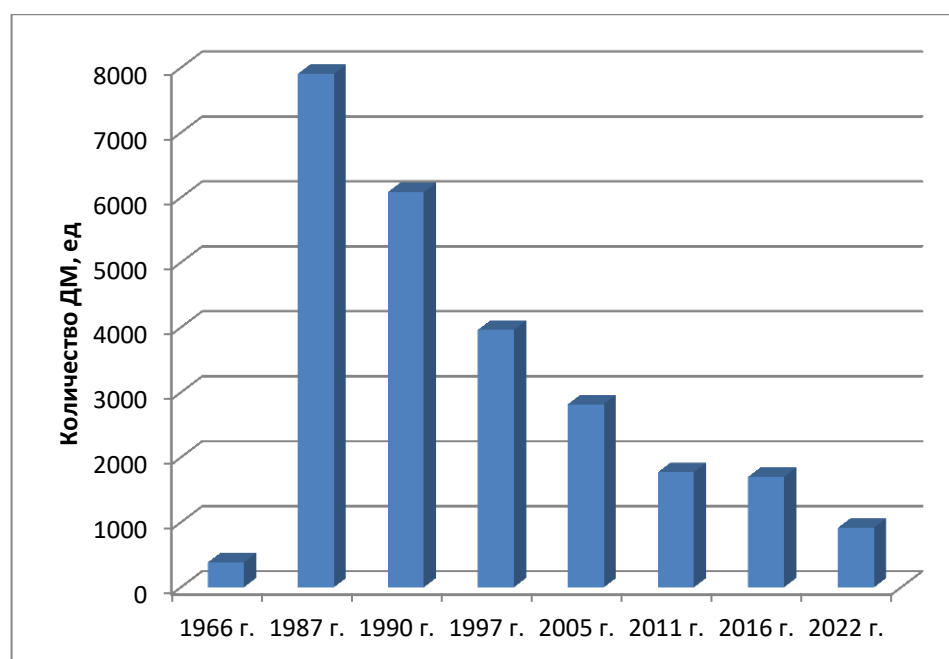


Рисунок 1.3 – Динамика изменения количественного состава дождевальных машин в Саратовской области



Естественно, снижение количественного состава дождевальных машин явилось следствием сокращения орошаемых площадей. Рассматривая динамику изменения орошаемых площадей в Саратовской области за период 1966–2022 гг. (рисунок 1.4), можно сделать следующие выводы. После их увеличения к 1987 г. произошло резкое сокращение к 1997 г. (в 1,6 раза), которое продолжилось до 2016 г. А к 2022 г. наметилась тенденция роста площади орошаемых земель – она увеличилась на 6,8 тыс. га [106]. В настоящее время она составляет 288,8 тыс. га, из которых 257,3 тыс. га находятся под регулярным орошением [44, 106, 110, 181].

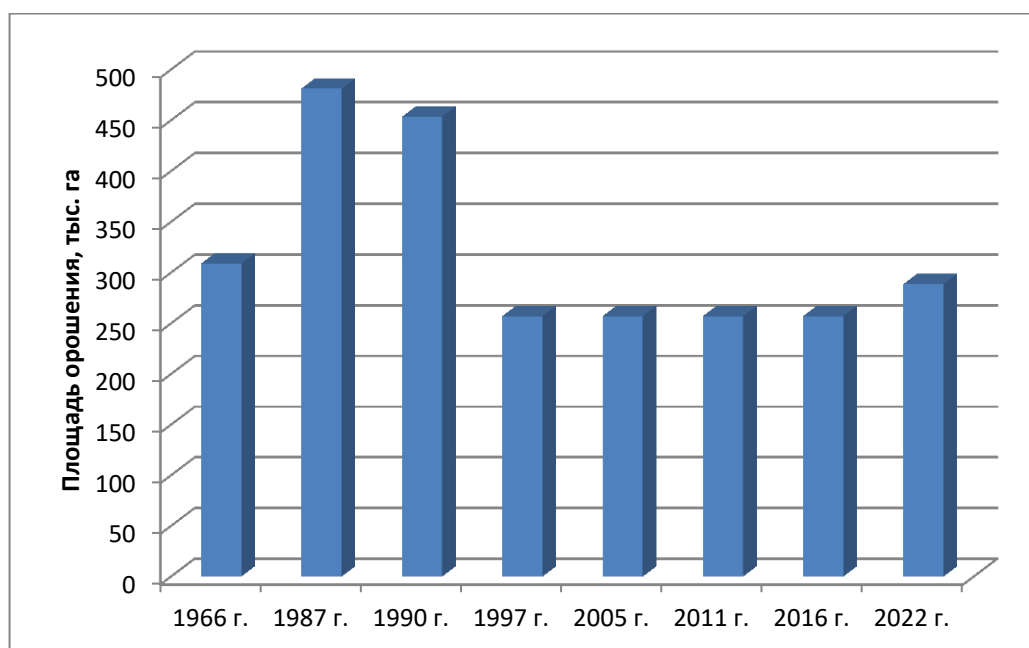


Рисунок 1.4 – Динамика изменения орошаемых площадей в Саратовской области

Несмотря на тенденцию улучшения состояния мелиоративного комплекса Саратовской области и увеличения площади орошения, все же нужно отметить тот факт, что в хорошем состоянии находится около 82 % орошаемых земель, 9,5 % – в удовлетворительном и 8,6 % – в неудовлетворительном [44, 62, 134, 156]. Причинами ухудшения состояния орошаемых земель являются высокая засоленность и чрезмерная уплотненность почвы, вызванная негативным влиянием дождевальных машин и режимов орошения.

Дождевальные машины оказывают негативное влияние на почву и сельскохозяйственные растения вследствие воздействия ходовых систем и создания сле-

дов большой глубины, а также в результате использования дождеобразующих устройств, имеющих высокую удельную мощность и обеспечивающих большую интенсивность дождя [36, 86, 135, 137]. Все это приводит к сокращению урожая сельскохозяйственных культур до 30 % и снижению потенциального плодородия орошаемых почв [81, 157, 165].

Анализируя парк дождевальных машин Саратовской области, можно отметить, что здесь сосредоточено наибольшее количество ДМ Zimmatic производства США, которые обладают рядом недостатков. Так, их дождеобразующие устройства создают крупнокапельный дождь с высокой интенсивностью, что приводит к значительному уплотнению и смыву плодородного слоя почвы с образованием водной и впоследствии воздушной эрозии [6, 25, 79]. Аналогичные проблемы с применением данных дождевальных машин существуют и в зарубежных странах [195, 200].

Второй по количественному составу является ДМ «Фрегат», общая доля этих машин составляет 22 % в парке имеющихся дождевальных машин. Их начали выпускать с 1971 г., и на сегодняшний день они морально и физически устарели, обладают большим количеством недостатков, связанных с неравномерностью полива, высокими потерями на испарение и снос дождя, низкой проходимостью, высокими энергоемкостью полива и интенсивностью создаваемого дождя [5, 45, 80, 161].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать заключение о том, что в мелиоративном комплексе Саратовской области наибольшее распространение получили многоопорные дождевальные машины кругового действия. Однако вследствие значительного количества их недостатков необходима разработка современных и конкурентоспособных дождевальных машин на основе ресурсосберегающих технологий.

Выполнение технологического процесса полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия с минимальными экологическими последствиями, с высокими эффективностью полива и качественными показателями дождя

требует научно обоснованного подхода к созданию современных конкурентоспособных ДМ, имеющих усовершенствованные дождеобразующие устройства.

В условиях наложения санкций на Россию и в рамках импортозамещения увеличилась потребность создания дождевальной техники отечественного производства.

## **1.2 Анализ дождевальных машин отечественных производителей**

Основными конкурентоспособными показателями дождевальных машин кругового действия являются: высокое качество дождя, создаваемого дождеобразующими устройствами, работа в автоматическом режиме в течение всего времени полива, возможность работать на полях с различными почвенными и рельефными условиями. В связи с этим кратко рассмотрим основные конструктивные особенности дождевальных машин, производимых в России.

Основными производителями отечественных широкозахватных дождевальных машин являются: ООО «БилдингСтройГроуп», расположенное в г. Тольятти и выпускающее дождевальные машины «Кубань-С»; ООО «Казанский завод оросительной техники» в г. Казань, выпускающее ДМ «Казанка»; ООО «Экосфера» (г. Казань), производящее ДМ «Орсис»; ООО «Мелиомаш» (г. Волгоград), осуществляющее выпуск ДМ «Ахтуба», а также ООО «Мелиоративные машины» (г. Саратов) – производитель ДМ «Каскад».

«Кубань-С» – это электрифицированная многоопорная дождевальная машина, разработанная на основе конструкции ДМ Valley и обеспечивающая полив до 75 га при расходе воды 70 л/с. Она работает при низком давлении воды (0,25...0,35 Мпа). Как заявляет производитель, за счет установленных на системе приповерхностного полива дождевальных насадок с вращающимся дефлектором Senniger i-Wob (рисунок 1.5) создается дождь с расходом воды 182...4168 л/ч (в зависимости от модификации) и высокой равномерностью полива ( $K_{эф} = 0,75..0,85$ ) [102, 103]. Начиная с 2016 г., было выпущено более 60 таких машин. Однако необходимо отметить, что в климатических и почвенных условиях Саратовской области применение дожде-

вальных насадок Senniger i-Wob приводит к образованию крупнокапельного дождя с высокой интенсивностью, что негативно отражается на сельскохозяйственных культурах и вызывает высокую неравномерность полива [21, 166].



Рисунок 1.5 – Дождевальная машина «Кубань-С»

Дождевальная машина «Казанка» (рисунок 1.6) имеет ферменную конструкцию, разработанную с учетом технических данных ДМ Zimmatic. Она обеспечивает полив на площади 64 га, расход воды – 270...300 м<sup>3</sup>/ч, рабочее давление – 0,35 МПа [105]. Как и на ДМ «Кубань-С», на ДМ «Казанка» установлены дождевальные насадки с вращающимся дефлектором Senniger i-Wob, которые имеют ряд недостатков, указанных ранее. Начиная с 2016 г. было выпущено более 120 этих машин.



Рисунок 1.6 – Дождевальная машина «Казанка»

ДМ «Орсис» (рисунок 1.7) имеет также ферменную конструкцию и осуществляет полив площадью 1,14...95,0 га. Расход воды – до 400 м<sup>3</sup>/ч, рабочее давление – 0,2 МПа [105]. На ней также использованы дождевальные насадки вращающегося типа Senninger LDN, установленные по учащенной схеме на трубопроводе дождевальной машины без применения системы приповерхностного полива.



Рисунок 1.7 – Дождевальная машина «Орсис»

ДМ «Ахтуба» (рисунок 1.8) имеет ферменную конструкцию с высотой пролета 4,2 м, осуществляет полив площадью до 254 га. Расход воды до 550 м<sup>3</sup>/ч, рабочее давление – 0,35 МПа [105]. Дождевальные насадки вращающегося типа Senninger LDN установлены по учащенной схеме на трубопроводе дождевальной машины без использования системы приповерхностного полива.

ДМ «Каскад» (рисунок 1.9) имеет ферменную конструкцию с длиной пролета 59,5 или 65,25 м. Машина осуществляет полив на площади 4,5...105,5 га, расход воды – 230 м<sup>3</sup>/ч, давление воды на входе ДМ – 0,2...0,43 МПа [34]. В отличие от предшествующих дождевальных машин, на ДМ «Каскад» установлены на системе приповерхностного полива дождевальные насадки с гладким дефлекторным конусом, разработанные в ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» (ныне – Вавиловский университет). Как утверждают производитель и разработчики дождевальной машины и дождевальных насадок [28, 162], создаваемый дождь полностью соответствует агротехническим требованиям и характеризуется высокой равномерностью.



Рисунок 1.8 – Дождевальная машина «Ахтуба»



Рисунок 1.9 – Дождевальная машина «Каскад»

Однако применение ДМ «Каскад» в УНПО «Поволжье» (ФГБОУ ВО Вавиловский университет) на поливе сои привело к снижению урожая в 2022 г. на 14 % по сравнению с ДМ «Фрегат», оснащенной дождевальными насадками, разработанными в ФГБНУ ВолжНИИГиМ. Это можно объяснить тем, что установленные на ДМ «Каскад» дождевальные насадки создавали более крупный дождь с высокой интенсивностью, что привело к негативному воздействию на сою и замедлило ее развитие.

Опираясь на вышеизложенное, можно отметить тот факт, что в России активно осуществляется импортозамещение и создают новые конструкции современных дождевальных машин. Однако в качестве дождеобразующих устройств

на них используют дождевальные насадки вращающегося типа Senniger i-Wob или Senniger LDN зарубежного производства, которые имеют крайне низкую эффективность при поливе в условиях Саратовской области. Применение дождевальной насадки с гладким дефлекторным конусом на ДМ «Каскад» также имеет ряд ограничений. В связи с этим необходимо создавать конструкции дождеобразующих устройств, обеспечивающих более качественные показатели дождя, которые способны работать в разных условиях и на различных сельскохозяйственных культурах.

### **1.3 Требования к качеству технологического процесса полива**

Применяемые дождевальные машины кругового действия ориентированы на работу от закрытой оросительной сети в автоматическом режиме. Согласно исследованиям, проведенным Г. В. Ольгаренко [95, 97], рекомендуется соблюдать три группы требований, предъявляемых к технологическому процессу полива дождевальной машиной кругового действия: агробиологические, почвенно-мелиоративные (экологические) и организационно-хозяйственные.

Агробиологические требования в основном сводятся к оптимальным условиям обеспечения сельскохозяйственных растений водой поливной нормой, необходимой в тот или иной период развития культуры.

Почвенно-мелиоративные (экологические) требования являются основанием для создания дождя при минимальном негативном воздействии на почву и сельскохозяйственные растения, обеспечивающего сохранение плодородия почв. В соответствии с данным требованием при выполнении технологического процесса полива сельскохозяйственных культур с помощью дождевальных машин кругового действия необходимо соблюдать следующее:

- малоинтенсивное длительное воздействие на почву и сельскохозяйственные растения, выдача поливной нормы, приближенной к водопотреблению растения и впитывающей способности почвы;
- исключение значительных потерь воды на испарение и снос ветром;

- обеспечение высокого качества полива за счет равномерного распределения воды по всей площади полива, исключив при этом поверхностный сток и образование водной эрозии почвы;

- сохранение целостности структуры почвы в верхних слоях и минимизация воздействия дождя на почву, приводящего к ухудшению ее водно-физических и физико-механических свойств;

- экономное расходование энергетических ресурсов путем создания и применения машин, обеспечивающих полив при давлении не более 0,3...0,5 МПа.

Для реализации вышеуказанных требований технологического процесса полива сельскохозяйственных культур с помощью дождевальных машин кругового действия необходимо рассмотреть качественные показатели дождя (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Критерии ДМ, обеспечивающие качественные показатели дождя

Показатели	Значение
<i>Технико-эксплуатационные</i>	
Расход воды, л/с	0,05–0,3
Напор, МПа	0,01–0,3
Удельная водоподача, л/с/м <sup>2</sup>	0,05–0,5
Радиус полива, м	1–10
Средняя интенсивность, мм/мин	0,1–0,3
Мгновенная интенсивность, мм/мин	0,25
Коэффициент эффективного полива	0,8
Коэффициент равномерности по Кристиансену	0,9
<i>Экологические</i>	
Среднекубический диаметр капель, мм	1,0–1,5
Частотное распределение числа капель по диаметрам, %	
<0,5 мм	20–30
0,5–1,0 мм	40–50
>1,0 мм	10–20
Сила удара капель дождя, Н	0,05
Удельная мощность дождя по среднему диаметру капель, Вт/м <sup>2</sup>	0,25

К организационно-хозяйственным требованиям, предъявляемым к дождевальным машинам кругового действия, относятся: трудоемкость до 1,1 чел.·ч на 1000 м<sup>3</sup> оросительной воды; коэффициент земельного использования до 0,98; энергозатраты 190 кВт·ч на 1000 м<sup>3</sup>, средняя интенсивность дождя до 0,25 мм/мин.



Для обеспечения соблюдения требований, предъявляемых к качеству дождя и технологическому процессу полива дождевальными машинами кругового действия, необходимо проектирование новых конструкций дождеобразующих устройств.

#### **1.4 Дождеобразующие устройства современных дождевальных машин**

Дождеобразующие устройства, устанавливаемые на дождевальных машинах, должны отвечать агротехническим требованиям, которые предъявляют к ним с учетом конструктивных особенностей, места их установки на ДМ и вида поливаемой сельскохозяйственной культуры. Дождь, создаваемый дождеобразующими устройствами, оказывает различное влияние на почву и поливаемые растения. В связи с этим к основным характеристикам дождя можно отнести:

- мгновенную и среднюю интенсивность;
- равномерность полива;
- диаметр капель и их процентное распределение;
- удельную мощность дождя;
- потери воды на испарение и снос ветром.

На урожайность сельскохозяйственных культур сильное влияние оказывают неравномерность полива и распределение слоя дождя, оцениваемые коэффициентом неравномерности полива. Для широкозахватных дождевальных машин кругового действия его значение должно быть менее 0,7 [51, 163]. Уменьшение этого показателя приводит к снижению урожая сельскохозяйственных культур на 30 % [97, 160].

Снижение урожая сельскохозяйственных культур также способствует крупнокапельный дождь, имеющий высокую удельную мощность. Существующие дождеобразующие устройства создают дождь разной крупности с преобладанием дождевой капли диаметром более 2,0 мм. Установлено, что по мере удаления дождевого облака от сопла дождеобразующего устройства процентное содержание капель диаметром более 2,0 мм увеличивается. Это приводит к повышенной

энергии удара капли дождя о почву, увеличивая ее плотность и вызывая разрушение макроагрегатов, угнетение сельскохозяйственных растений и, как следствие, снижения урожая. Наибольшему негативному воздействию крупных капель дождя подвержена соя. Установлено, что для нормального роста и развития этой культуры необходимо, чтобы дождь был умеренным, с интенсивностью не более 0,25 мм/мин, при этом диаметр капель дождя должен составлять 0,5...1,0 мм [146, 173, 182].

Таким образом, одним из качественных показателей дождя является крупность его капель, которую можно определить, используя медианный диаметр, рассчитанный по объему, который, в свою очередь, связан с интенсивностью дождя, нормой полива и сносом капли дождя ветром. Считается, что дождевое облако состоит из примерно равного количества капель малого и большого диаметра. Тогда математическую зависимость, определяющую диаметр капель дождя, можно записать в виде [97]:

$$\sum_{i=1}^{N_i} B_{vi} \Delta L_i = 0,5, \quad (1.1)$$

где  $B_{vi}$  – вероятность образования капли дождя соответствующего диаметра;

$N_i$  – количество интервалов, соответствующих медианному значению диаметра капли дождя  $L_{и}$ ;

$\Delta L_i$  – длина интервала, м.

Для определения изменения размеров медианного  $d_m$  и среднеобъемного  $d_k$  диаметров капель дождя, выпадающего вдоль радиуса полива  $r_{п}$ , можно использовать зависимость, предложенную Г. В. Ольгаренко [97]:

$$d_m = a_{п} r_{п}^2 + b_{п} r_{п} + c, \quad (1.2)$$

где  $a_{п}$ ,  $b_{п}$ ,  $c$  – коэффициенты, отражающие параметры параболической зависимости.

Для определения изменения среднеобъемного диаметра капель дождя коэффициенты параболической зависимости имеют значения:  $a_{п} = 0,0018...0,005$ ;

$b_{\Pi} = 0,01 \dots 0,09$ ;  $c = 0,66 \dots 1,16$ , а для медианного диаметра:  $a_{\Pi} = 0,015 \dots 0,15$ ;  
 $b_{\Pi} = 0,03 \dots 0,26$ ;  $c = 0,63 \dots 2$ .

Также установлена связь между медианным диаметром капли дождя и среднекубическим, которую можно описать следующим образом [97]:

$$d_{\text{м}} = K_{\text{м}} d_{\text{к}} + C_{\text{о}}, \quad (1.3)$$

где  $K_{\text{м}}$ ,  $C_{\text{о}}$  – коэффициенты линейной зависимости;

$d_{\text{к}}$  – среднеобъемный диаметр капель дождя, мм.

В ходе проведенных исследований были определены значения коэффициентов:  $K_{\text{м}} = 1,1 \dots 3,4$ ;  $C_{\text{о}} = 0 \dots 1,2$  мм.

Рассчитать количество падающих капель дождя  $N$  можно путем замера объема воды, находящейся в дождемере:

$$N = \frac{V_{\text{вд}}}{V_{\text{к}}}, \quad (1.4)$$

где  $V_{\text{вд}}$  – объем воды, находящейся в дождемере, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{к}}$  – средневзвешенный объем капли дождя, м<sup>3</sup>.

Определить средневзвешенный объем капли дождя можно каплемером, используя зависимость:

$$V_{\text{к}} = \frac{\pi}{6n_i} \sum d_i^3, \quad (1.5)$$

где  $n_i$  – количество капель дождя  $i$ -го размера;

$d_i$  – диаметр капель дождя  $i$ -го размера, который измеряют с помощью каплемера или другого устройства [16].

В ходе исследований капель дождя, создаваемого разными дождеобразующими устройствами, было установлено, что их диаметр в дождевом облаке изменяется от 0,7 до 2,4 мм. Считается, что оптимальный диаметр капли дождя, обеспечивающей полив с наименьшим воздействием на почву и сельскохозяйственные растения, должен составлять менее 1,5 мм [12, 32, 33, 60, 70].

Другим качественным показателем дождя является равномерность полива дождеобразующим устройством, на которую оказывают влияние скорость ветра и его направление, давление в трубопроводе дождевальной машины и закрытой оросительной сети, величина перекрытия установленных дождеобразующих устройств и другие параметры [61, 144, 148, 174].

Также к качественным показателям дождя, создаваемого дождеобразующими устройствами, следует отнести его интенсивность. Установлено, что интенсивность дождя изменяется в больших пределах при использовании разных дождеобразующих устройств. Так, например, при установке дождевальных насадок с гладким дефлекторным конусом на ДМ «Фрегат» средняя интенсивность дождя составляет 0,06–0,12 мм/мин в начале трубопровода дождевальной машины и увеличивается в конце машины до 0,46 мм/мин [148, 149, 150]. Высокая интенсивность дождя негативно влияет на почву, так как создается поверхностный сток воды с выносом питательных элементов, что снижает урожай сельскохозяйственных культур.

Показателем дождя, оценивающим его негативное воздействие на почву и сельскохозяйственное растение, является его удельная мощность, которая зависит от диаметра капель, их высоты подъема и скорости падения и др. Удельная мощность дождя  $N_{уд}$  – это отношение энергии дождевого потока, создаваемого дождеобразующим устройством, к единице времени:

$$N_{уд} = \frac{\mathcal{E}_д}{T_{воз}}, \quad (1.6)$$

где  $\mathcal{E}_д$  – энергия дождевого потока, создаваемого дождеобразующим устройством, Дж;

$T_{воз}$  – время воздействия дождя, с.

Удельную мощность дождя, создаваемую дождеобразующим устройством, можно определить по уточненной зависимости [46]:

$$N_{уд} = 0,0083\rho_{ср} \sum_{i=1}^n (n_i V'_{ki})^2 = 0,14\rho_{ср} d_k, \quad (1.7)$$

где  $\rho_{\text{ср}}$  – интенсивность дождя, мм/мин;

$n_i$  – доля капель дождя  $i$ -го диаметра;

$V_{ki}$  – скорость падения капель дождя диаметром  $i$ -го размера, м/с;

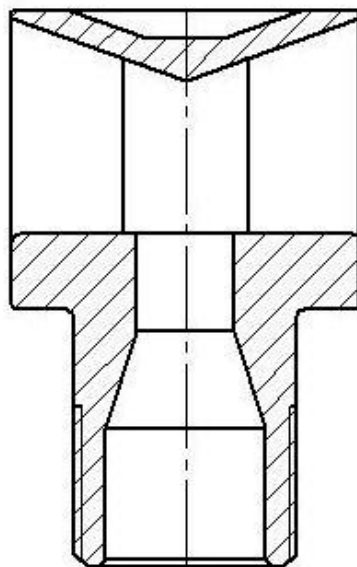
$d_k$  – среднеобъемный диаметр капель дождя, мм.

Как правило, в течение роста сельскохозяйственного растения полив производят многократно, что также может вызвать негативные последствия, связанные со стоком воды с поверхности орошаемого поля. Установлено, что при повторном поливе ДМ «Фрегат» в центре дождевальной машины создается сток воды, который доходит до 17 %, а к концу машины он увеличивается до 22 % [150]. Образование стока вдоль дождевальной машины вызывает необходимость снижения поливной нормы с 63 до 54 мм в середине машины и до 25 мм в ее конце. Исследования, проведенные Н. Ф. Рыжко, доказывают, что с увеличением количества поливов возрастает объем стока. Например, при первом поливе с интенсивностью дождя 0,55...0,6 мм/мин сток увеличивается с 8 до 11 %, а при дальнейшем увеличении количества – с 21 до 33 % (пятый полив) [150]. Исследования многих авторов также подтверждают тот факт, что объем стока воды возрастает по длине трубопровода дождевальной машины и от увеличения количества поливов [17, 35, 53, 180, 188].

Исходя из представленных исследований и полученных результатов, можно утверждать, что в конце трубопровода дождевальной машины кругового действия происходит увеличение интенсивности дождя и диаметра капель, ведущее к образованию поверхностного стока и развитию эрозионных процессов. Снижается также равномерность полива, что негативно отражается на урожае сельскохозяйственных культур. В связи с этим разработкой конструкций дождеобразующих устройств, обеспечивающих малый диаметр капель дождя и его среднюю интенсивность, а также снижение испарения воды и снос ветром, является актуальной задачей.

Для того, чтобы решить данную задачу, необходимо познакомиться с существующими дождеобразующими устройствами, устанавливаемыми на дождевальные машины кругового действия, и их перспективными разработками.

В настоящее время на ДМ «Фрегат», которую используют в Саратовской области, устанавливают дождевальную дефлекторную насадку с круглым гладким дефлекторным конусом кругового или секторного полива, разработанную в ФГБНУ ВолжНИИГиМ (рисунок 1.10). Ее применение позволило снизить давление на входе в трубопровод машины с 0,7 до 0,4 МПа. При этом создается мелкодисперсный дождь с высотой подъема дождевого облака до 4...7 м. Радиус полива составляет 6...12 м, средняя интенсивность дождя 0,3...0,4 мм/мин.



а



б

Рисунок 1.10 – Дождевальная дефлекторная насадка, разработанная ФГБНУ ВолжНИИГиМ:  
а – схема дождевальной насадки; б – ее установка на трубопроводе дождевальной машины

Дождевальные насадки кругового полива создают дождь с хорошими качественными показателями и обеспечивают большой диапазон изменения расхода воды – от 0,1 до 3,8 л/с [75, 83, 147, 148, 151]. При этом возможность регулирования параметров дождевальной насадки возможна на стадии ее изготовления, а

простота конструкции и дешевизна обусловили ее широкое распространение в Саратовской области.

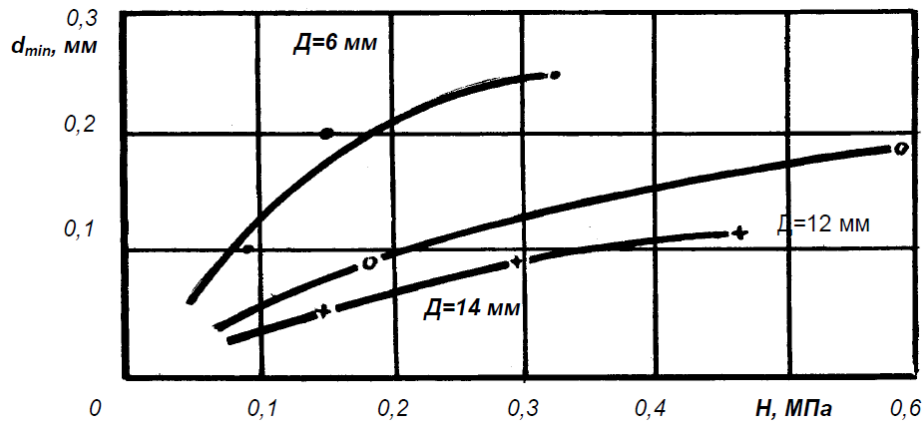
Среди недостатков дождевальной дефлекторной насадки следует отметить высокую неравномерность полива и большие потери на испарение и снос ветром.

Исследования, проведенные учеными ФГБНУ ВолжНИИГиМ, показали, что на радиус полива дождевальной насадки сильное влияние оказывает ветер. Н. Ф. Рыжко [75, 142] установил, что при увеличении скорости ветра с 2,5 до 3,5 м/с происходит снижение радиуса полива против направления ветра до 8 м и его увеличение по направлению ветра до 16 м. С возрастанием скорости ветра до 10 м/с радиус полива против направления ветра уменьшается до 4 м и увеличивается по направлению ветра до 30 м. При такой неравномерности полива наблюдается недолив соседними дождевальными насадками на участке шириной до 12 м.

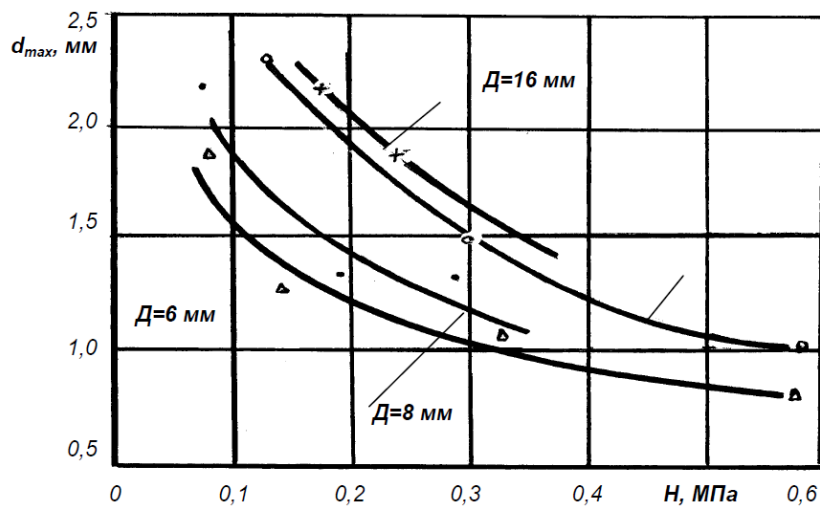
Исследуя данные о равномерности полива дождевальной дефлекторной насадкой, можно отметить то, что требуемый коэффициент равномерности полива дождевальной машиной, равный 0,7, достигается только при поливе со скоростью ветра, не превышающей 3 м/с [83, 142, 144]. При скорости ветра более 3,0 м/с резко снижается равномерность полива при направлении ветра перпендикулярно трубопроводу дождевальной машины и увеличивается до нормативных показателей при его направлении вдоль оси трубопровода. Также было установлено, что при скорости ветра не более 3,5 м/с и направлении движения ветра под углом  $30^\circ \dots 40^\circ$  к трубопроводу дождевальной машины коэффициент эффективного полива площади увеличивается до 0,855 и достигает максимального значения. При дальнейшем увеличении угла направления ветра к оси трубопровода дождевальной машины до  $50^\circ$  коэффициент эффективного полива уменьшается до 0,694 [83, 144, 172].

Рассматривая интенсивность дождя, создаваемого дефлекторной насадкой, можно отметить, что при возрастании скорости ветра с 3 до 10 м/с интенсивность полива увеличивается от 0,108 до 0,648 мм/мин. При этом наибольшая интенсивность зафиксирована при наибольшей скорости ветра.

Как видно, рассматриваемая дождевальная дефлекторная насадка характеризуется высокой неравномерностью полива, которую можно объяснить большим изменением диаметра капель создаваемого дождя. Исследования Г. П. Надежкиной [85] показали, что при одинаковых параметрах напора и диаметра выходного отверстия сопла дефлекторной насадки диаметр капель изменяется в широком диапазоне – от 0,1 до 2,14 мм (рисунок 1.11).



а



б

Рисунок 1.11 – Минимальный (а) и максимальный (б) диаметр капель дождя, создаваемого дефлекторной дождевальной насадкой кругового полива

Относительно количества воды, подвергшейся испарению в процессе полива дефлекторной насадкой, нужно отметить, что впервые данное явление было рассмотрено в работах [26, 176, 184], где было отмечено, что увеличение потерь воды на испа-



рение сопровождается повышением высоты поднимаемого облака дождя. Результаты проведенных исследований многих авторов [15, 30, 94, 100, 175] подтверждают, что испарение капель дождя в процессе полета может достигать 20–30 %. Однако некоторые авторы утверждают, что испарение воды в процессе полива не превышает 10 %.

Снизить испарение воды и удельную мощность дождя можно за счет применения системы приповерхностного полива (рисунок 1.12). Исследования, проведенные в Саратовском ГАУ [46, 84, 85, 145, 159, 164], показали, что установка дождевальных дефлекторных насадок кругового полива на систему приповерхностного полива позволяет снизить высоту поднимаемого дождевого облака до 1,1...1,7 м над уровнем дневной поверхности. Это дает возможность сократить потери воды на испарение и снос ветром с 22,5 до 4, % с сохранением коэффициента равномерности полива в пределах 0,7...0,75.

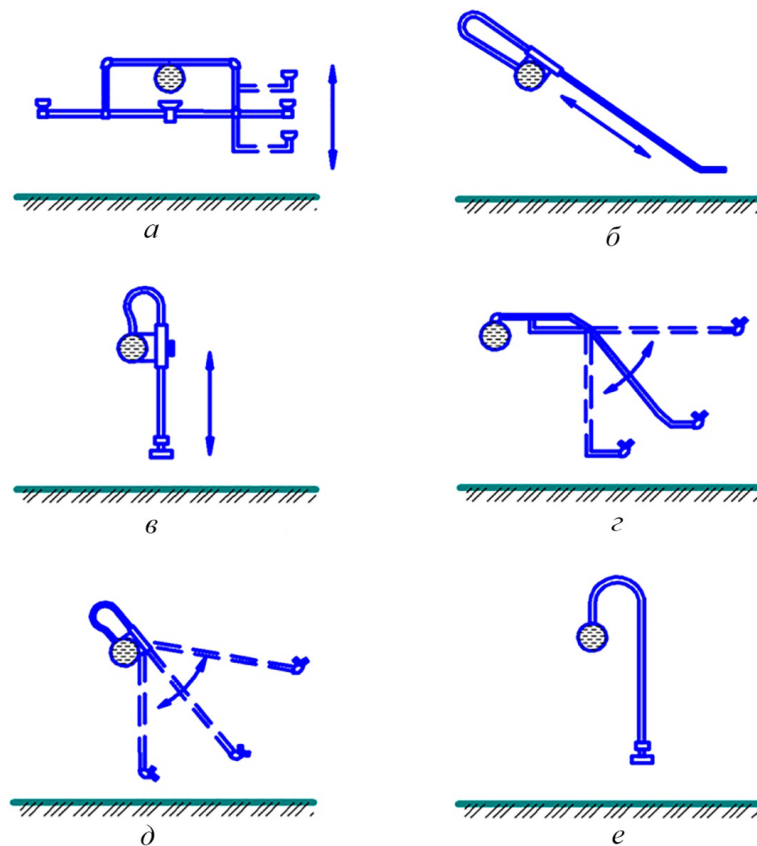


Рисунок 1.12 – Принципиальные схемы устройств приповерхностного полива для дождевальных машин: *а* – дополнительные трубопроводы вертикального перемещения; *б* – штанга наклонного перемещения; *в* – штанга вертикального перемещения; *г* – устройство рычажного типа; *д* – устройство рычажного типа с поворотом вокруг трубопровода машины; *е* – устройство типа «сборная штанга»

Во время полива создается дождь с диаметром капель 0,4...0,5 мм в начале ДМ с последующим их увеличением до 0,9...1,0 мм в конце трубопровода машины. Уменьшение диаметра капель создаваемого дождя позволяет снизить скорость их падения до 3...6 м/с, что приводит к сокращению мощности дождя и меньшему энергетическому воздействию на почву и сельскохозяйственные растения. Вследствие этого урожай повышается на 5–18 %.

Необходимо отметить, что использование на дождевальными машинах кругового передвижения дополнительной системы приповерхностного полива усложняет их конструкцию, повышает материалоемкость и требует постоянного проведения монтажно-регулирующих работ.

Другим направлением, позволяющим повысить качественные показатели дождя, создаваемого дождевальными дефлекторными насадками, устанавливаемыми на широкозахватных дождевальными машинами кругового действия, является применение разнообразных форм дефлекторного конуса, обеспечивающего предварительное разрушение пленки воды, сходящей с него. В качестве примера можно привести дождевальную насадку, имеющую на дефлекторном конусе кольцевую канавку, выполненную по всему периметру конуса (рисунок 1.13).



а



б

Рисунок 1.13 – Дождевальная дефлекторная насадка с дефлекторным конусом, имеющим кольцевую канавку: а – общий вид насадки; б – дефлекторный конус с кольцевой канавкой, выполненной по всему его периметру

Применение дождевальной насадки с кольцевой канавкой, выполненной по всему периметру дефлекторного конуса, на ДМ «Фрегат» позволяет создавать дождь с диаметром капель 0,6...0,8 мм при давлении в трубопроводе дождевальной машины 0,1...0,15 МПа, что соответствует давлению воды в конце трубопровода. Коэффициент равномерности полива может достигать 0,8 с интенсивностью дождя 0,17–0,276 мм/мин. Однако следует отметить, что радиус полива при использовании такой данной дождевальной насадки снижается на 15 % по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей гладкий ровный дефлекторный конус. Данные значения достигаются при оптимальных геометрических параметрах канавки, имеющей треугольное сечение с основанием 4 мм по всему периметру дефлекторного конуса на расстоянии от центра 12,4 мм [3, 12, 154, 157].

Сокращение радиуса полива дождевальной насадкой с кольцевой канавкой на дефлекторном конусе вызывает необходимость их количественного увеличения на трубопроводе дождевальной машины «Фрегат» до 159 шт. с учетом двукратного перекрытия. Это ведет к дополнительным затратам на установку дождевальных дефлекторных насадок и удорожанию дождевальной машины. При этом мелкокапельный дождь, создаваемый дождевальной насадкой, имеет высокую испаряемость и снос ветром.

Повысить ветроустойчивость дождевальных дефлекторных насадок можно за счет снижения угла вылета струи к горизонту и обеспечения дисперсности факела распыла [31, 37, 149, 170]. Создать ветроустойчивую дождевальную насадку кругового полива попытались ученые Саратовского ГАУ. Разработанную ими конструкцию дождевальной насадки применяют на ДМ «Каскад» (рисунок 1.14).

Дождевальные насадки устанавливают на трубопровод ДМ «Каскад» на расстоянии 3,0...3,5 м друг от друга. Радиус полива дождевальной насадки можно варьировать от 4,3 до 13 м в зависимости от диаметра выходного сопла, который может составлять 3...15 мм, при постоянном давлении в трубопроводе дождевальной машины 0,3 МПа.



Рисунок 1.14 – Дождевальная машина «Каскад» с дождевальными насадками кругового полива

Дождевальная насадка обеспечивает полив со средней интенсивностью дождя 0,08...1,2 мм/мин, тогда как мгновенная интенсивность составляет 0,08...1,1 мм/мин. Диаметр капель создаваемого дождя изменяется от 0,2 до 1,6 мм, при этом потери на испарение и снос капель дождя ветром – 0,4–1,2 % при скорости ветра менее 1 м/с. Повышение скорости ветра до 3 м/с приводит к увеличению потерь на испарение и снос капель дождя на 2,5 %. В процессе полива дождевальная насадка создает дождь, имеющий высокую удельную мощность, изменяющуюся в интервале от 0,005 до 0,106 Вт/м<sup>2</sup> [30, 32, 34].

Как видно, данная дождевальная насадка также имеет ряд недостатков, связанных с высокой интенсивностью дождя и большой высотой поднимаемого дож-

девого облака, что приводит к значительному сносу и испарению капель дождя. Также было установлено, что уменьшение давления в конце трубопровода дождевальной машины до 0,2 МПа вызывает резкое ухудшение качественных показателей дождя.

На импортных дождевальных машинах, таких, как Zimatic, Valley и др., которые нашли широкое распространение на орошаемых полях Саратовской области, а также на ряде дождевальных машин Российского производства («Кубань-С», «Казанка», «Ахтуба», «Орсис») устанавливаются дождевальные насадки иностранного производства Senninger и Komet (рисунок 1.15). Производители позиционируют их как насадки, способные работать на пониженном давлении до 0,07 МПа и противостоять ветру с высокой скоростью.

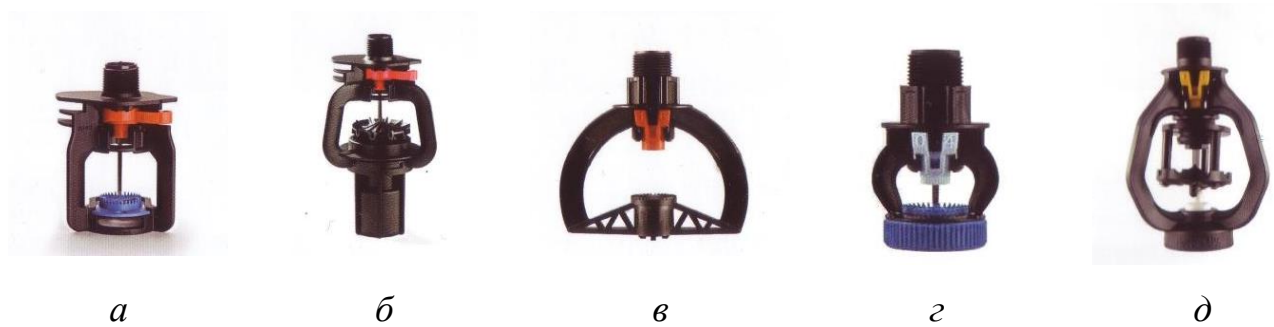


Рисунок 1.15 – Дождевальные насадки, устанавливаемые на дождевальные машины Российского и зарубежного производства: *а* – Komet KPS; *б* – Komet Twister; *в* – Senninger Superspray; *г* – Senninger LDN; *д* – Senniger i-Wob

Дождевальная насадка Komet KPS (см. рисунок 1.15, *а*) рекомендуется для бережного полива. Она работает при низком давлении и создает дождь малой мощности.

Komet Twister (см. рисунок 1.15, *б*) позиционируют как насадку, используемую на почвах с малой скоростью инфильтрации. Она способна работать при давлении воды 0,14 МПа, создавая дождь с малым диаметром капли и низкой интенсивностью.

Дождевальная насадка Senninger Superspray (см. рисунок 1.15, *в*) характеризуется простотой конструкции, в которой предусмотрено быстросъемное регулировочное устройство, упрощающее регулировку и монтаж.

Senninger LDN (см. рисунок 1.15, *з*) способна работать при малом давлении и создавать мелкокапельный дождь, имеющий малую интенсивность и обеспечивающий высокую равномерность полива, но только в безветренную погоду.

Дождевальная насадка Senninger i-Wob (см. рисунок 1.15, *д*) обладает большим радиусом полива с низкой интенсивностью дождя, способного противостоять ветру с высокой скоростью [50, 65, 138, 183, 193, 194].

Производители зарубежных дождевальных насадок утверждают, что основными направлениями совершенствования их конструкции являются: обеспечение высокой надежности и энергоэффективности; формирование дождевого облака с постоянством диаметра капель; равномерность полива. Однако результатов исследований, доказывающих данные суждения и дающих представление о качественных параметрах дождя, создаваемого дождевальными насадками, очень мало, особенно при их использования на полях Саратовской области.

Проведенные исследования качественных показателей дождя, создаваемого дождевальной насадкой Senniger i-Wob, показали, что увеличение диаметра выходного отверстия сопла насадки с 3,8 до 7,9 мм приводит к увеличению радиуса полива с 15 до 19 м, средней интенсивности дождя с 7,7 до 22,7 мм/ч, его максимальной интенсивности с 15,1 до 43,9 мм/ч. Данные значения были зафиксированы при давлении воды 0,14 МПа, установке дождевальной насадки на высоте 2,4 м от дневной поверхности и скорости ветра 0,54–4,24 м/с [196]. При снижении высоты установки дождевальной насадки до 1 м радиус полива уменьшается на 2,6 м, при этом средняя интенсивность дождя возрастает до 12 %, а максимальная – до 15 % [196].

Проведя анализ представленных данных результатов исследований, можно утверждать, что дождевальные насадки Senniger i-Wob обеспечивают высокую интенсивность и создание крупнокапельного дождя. В почвенных условиях Саратовской области их применение на дождевальных машинах сопровождается образованием поверхностного стока, что приводит к эрозии почвы и снижению потенциального плодородия. В конечном итоге данные процессы отрицательно сказываются на урожае сельскохозяйственных культур.

Техническим решением, обеспечивающим повышение равномерности полива и ветроустойчивости дождевальных насадок, зарубежные производители считают вращательное движение дефлектора с эксцентриситетным смещением оси вращения, что позволяет при высоких давлениях воды создавать вибрацию. На основании данных суждений была разработана конструкция дождевальной насадки Comet 3-D со сложным движением дефлектора (рисунок 1.16).

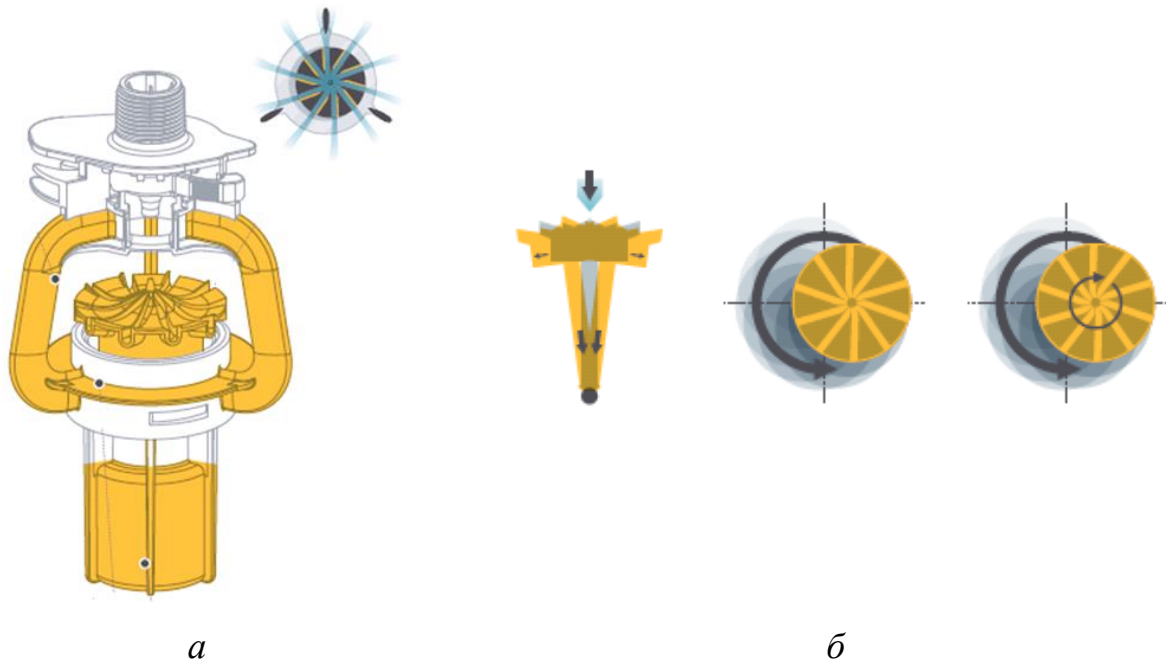


Рисунок 1.16 – Дождевальная насадка Comet 3-D со сложным вращательным движением дефлектора: *а* – общий вид дождевальной насадки; *б* – схема движения дефлектора

Производители этой дождевальной насадки заявляют о ее способности работы при низком давлении воды (0,04–0,14 МПа). Диаметр сопла изменяется от 2,0 до 10,3 мм, что дает возможность повышать радиус полива и создавать дополнительное колебательное движение, позволяющее создавать дождь с низкой интенсивностью [47].

Предлагается набор дефлекторов, которые обеспечивают разные режимы работы насадки, повышающие эффективность ее применения. Так, дефлектор черного цвета позволяет применять данную насадку в обычных условиях, при этом траектория полета капли дождя стандартная. В местах с повышенной скоростью ветра рекомендуется использовать дефлектор синего или желтого цвета, который

создает низкую траекторию полета капли дождя, повышая его ветроустойчивость и обеспечивая малый расход воды. Дефлектор белого цвета предназначен для полива высокостебельных сельскохозяйственных культур, он позволяет устанавливать дождевальную насадку выше трубопровода дождевальной машины.

Однако практического применения данных дождевальных насадок на дождевальных машинах, работающих в условиях Саратовской области, не зафиксировано вследствие их высокой стоимости и отсутствия точных данных о равномерности полива, а также средней и мгновенной интенсивности дождя.

На современных дождевальных машинах нашли широкое применение дождевальные насадки фирмы Nelson Irrigation: Rotator, Accelerator, Spinner, Orbitor, Sprayhead (рисунок 1.17) [48, 138].



Рисунок 1.17 – Дождевальные насадки фирмы Nelson Irrigation: *а* – Rotator; *б* – Accelerator; *в* – Spinner; *г* – Orbitor; *д* – Sprayhead

Производитель дождевальных насадок Nelson утверждает, что насадка Rotator (см. рисунок 1.17, *а*) способна работать при давлении воды 0,07...0,34 МПа и при этом создавать радиус полива, изменяющийся от 15,2 до 22,6 м, что снижает интенсивность дождя и увеличивает равномерность полива за счет перекрытия струй между соседними насадками, установленными на трубопроводе дождевальной машины. С целью экономии воды и энергоресурсов данные дождевальные насадки обеспечивают низкую норму полива, что приводит к увеличению его продолжительности. При этом не выдается полная поливная норма, приводящая к



дефициту влаги в почве и, как следствие, к угнетению сельскохозяйственных растений и снижению урожайности.

Accelerator (см. рисунок 1.17, б) позиционируется как насадка, работающая при пониженном давлении 0,04...0,1 МПа. Радиус полива составляет 9,1...16,8 м, что обеспечивается высокой скоростью вращения дефлектора за счет увеличения диаметра выходного отверстия сопла насадки. Производитель утверждает о высокой равномерности полива и низких потерях воды на испарение и снос ветром. Устанавливать данную насадку рекомендуется на системе приповерхностного полива между сельскохозяйственными культурами.

Дождевальная насадка Spinner (см. рисунок 1.17, в) способна работать при малом давлении воды (0,07...0,14 МПа) и обеспечивать радиус полива 12,8...16,5 м. Вращающийся дефлектор создает капли малого диаметра с низкой интенсивностью дождя, что позволяет создавать дождь малой мощности и производить полив чувствительных к негативному воздействию дождя сельскохозяйственных культур и почв с низкой впитываемостью.

Дождевальная насадка Orbitor (см. рисунок 1.17, г) имеет обтекаемую конструкцию, что обеспечивается исключением из нее подпирающих стоек корпуса. Это повышает равномерность полива за счет удаления препятствий на пути движения потока воды. Производитель утверждает, что эта дождевальная насадка может работать при пониженном давлении 0,04...0,14 МПа. Капли дождя малого диаметра сходят с вращающегося дефлектора под малым углом, что обеспечивает повышение ветроустойчивости и полив с радиусом 11,0...18,3 м. Считается, что данная насадка практически не засоряется.

Дождевальная насадка Sprayhead (см. рисунок 1.17, д) также способна работать при низком давлении 0,04...0,28 МПа. Она предназначена для полива радиусом 4,9...12,2 м с высокой ветроустойчивостью и малой удельной мощностью дождя.

Рассматривая существующие конструкции дождевальных насадок с вращающимся дефлектором фирмы Nelson и опираясь на данные зарубежных авторов, а

также на собственные исследования, можно утверждать, что дождь, создаваемый всеми насадками, имеет высокую интенсивность с образованием капель диаметром более 1,5 мм [192, 198]. Несомненно, эти дождевальные насадки разрабатывали для типов почв, способных впитывать большой объем воды. Однако тяжелые по гранулометрическому составу орошаемые почвы Саратовской области такой способностью не обладают, и использование этих насадок сопровождается образованием стока с выносом питательных элементов с орошаемых полей, что приводит к снижению их потенциального плодородия и эффективности применения минеральных удобрений. Следует отметить также достаточно высокую стоимость рассматриваемых дождевальных насадок, цена которых в 5–10 раз превышает стоимость дождевальных дефлекторных насадок, разработанных в ФГБНУ ВолжНИИГиМ и ФГБОУ ВО Вавиловский университет.

Основной задачей, решаемой производителями при разработке дождевальных насадок, является экономия воды за счет повышения равномерности полива, уменьшения потерь на снос ветром и испарения, а также создания мелкокапельного дождя с низкой интенсивностью. Техническим решением данной задачи могут быть каскадные или многоярусные дождевальные насадки. Например, компания Senninger разработала конструкцию дождевальной насадки с тремя дефлекторами, расположенными друг над другом (рисунок 1.18).

В предлагаемой конструкции ярусной дождевальной насадки может быть установлено от 1 до 3 дефлекторов с углом наклона выходящей струи воды к горизонту от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  [107]. Это позволяет увеличивать количество сходящих струй воды с 33 до 99 и повысить расход воды с 0,01 до 1,4 л/с [183]. Однако применение данных дождевальных насадок ограничено видами поливаемых сельскохозяйственных культур, так как создаваемые струи воды имеют высокую интенсивность и удельную мощность, обеспечивают малый радиус полива и большой диаметр капель.



*а*



*б*

Рисунок 1.18 – Многоярусная дождевальная насадка компании Senninger:  
*а* – общий вид; *б* – дождевальная насадка в работе

Компания Senninger предлагает также дождевальные насадки Super Spray (рисунок 1.19), которые могут быть оснащены 22 видами дефлекторов, обеспечивающих разные режимы работы и качественные показатели дождя. Они способны работать в разных климатических условиях и на разных типах почв [107].



*Плоский с желобками*



*Вогнутый с желобками*



*Выпуклый с желобками*



*Плоский гладкий*



*Вогнутый гладкий*



*Выпуклый гладкий*

Рисунок 1.19 – Дождевальные насадки Super Spray производства компании Senninger

Дефлекторы, разработанные для дождевальной насадки Super Spray, имеют различную конфигурацию по форме и типу поверхности. Это определяет схему полива (струя или поток) и размер капель создаваемого дождя.

Несмотря на все перечисленные достоинства дождевальных насадок зарубежного производства, все же нужно отметить, что для улучшения качественных показателей дождя зарубежные производители сознательно идут на усложнение конструкции насадок, стараются их выполнять модульными для возможности подбора и приспособления к разным условиям полива. Это приводит к резкому удорожанию конструкции. Проведенные исследования качественных показателей дождя, создаваемого данными дождевальными насадками, показали, что чрезмерная турбулизация потока воды в процессе выхода из сопла дождевальной насадки и высокие энергетические затраты на дробление потока воды, сходящего на дефлектор, приводят к ограничению радиуса полива и увеличивают разность между мелкими и крупными каплями дождя, что в итоге повышает неравномерность полива. Кроме того, наличие большого количества конструктивных и вращающихся элементов снижает надежность данных дождевальных насадок [187, 192, 198, 199].

Помимо дождевальных насадок, имеющих вращающийся и неподвижный дефлекторы, на дождевальных машинах используют различные дождевальные аппараты и устройства. Например, на ДМ «Фрегат» устанавливают среднеструйные дождевальные аппараты № 1, 2, 3, 4 и 5; насадки секторного полива (СибНИИГиМ, УкрНИИГиМ, ЮжНИИГиМ и ВНИИ «Радуга»); насадки грибкового типа (СтавНИИГиМ); центробежные насадки (ВНИИ «Прогресс»); дождеватели типа «сегнерово колесо» (ВНИИ «Радуга»); насадки щелевого типа (ВИСХОМ); дефлекторные насадки (ВНИИГиМ) [46, 77, 82, 85, 97, 148, 149, 150, 186].

Среднеструйные дождевальные аппараты имеют ряд достоинств, к которым можно отнести большой радиус полива (10...25 м), низкую среднюю интенсивность дождя (0,05...0,40 мм/мин) и высокую равномерность полива [46, 149, 150]. Однако их существенными недостатками можно считать создаваемый ими дождь с крупными каплями (0,8...3,5 мм) и высокую мгновенную интенсивность дождя (1,2...2,6 мм/мин) [149, 150]. Такое сильное воздействие негативно влияет на сельскохозяйственные растения и почву. Указанные недостатки и высокая стоимость дождеваль-

ных аппаратов способствовали практически полному исключению их применения на широкозахватных дождевальными машинами кругового действия.

Разработанная СтавНИИГиМ дождевальная насадка грибового типа создает мелкокапельный дождь с небольшим радиусом полива. Ее можно использовать при поливе сельскохозяйственных культур, восприимчивых к воздействию дождя. Недостатками этой насадки являются трудность регулирования расхода и равномерности полива по длине трубопровода дождевальной машины, а также низкая надежность и частые поломки [149, 150].

Секторные дождевальные насадки способны работать при высоком давлении (0,6...0,7 МПа), что позволяет им иметь небольшой диаметр выходного отверстия сопла (1,5...2,0 мм), которое, к сожалению часто засоряется. Создаваемый мелкокапельный дождь подвержен сильному испарению и сносу ветром [61].

Достоинствами центробежной насадки являются небольшой коэффициент расхода воды (0,27–0,3) и создаваемый мелкокапельный дождь. Однако вследствие малого радиуса полива (до 6 м) они создают дождь высокой интенсивности [149, 150].

Дождеобразующее устройство «сегнерово колесо» имеет высокую материалоемкость, характеризуется трудностью монтажа и демонтажа, что ограничивает его применение [97].

На основании проведенного обзора конструкций дождевальных насадок с учетом их конструктивных особенностей была составлена классификация (рисунок 1.20).

При анализе перспективных конструкций дождевальных насадок [113, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 124] и дождевальных аппаратов [114, 115, 116, 126] было установлено, что все технические решения, представленные в данных конструкциях, по заявлению авторов, обеспечивают улучшение равномерности полива, снижение интенсивности дождя и повышение его ветроустойчивости. В действительности данные технические решения не были реализованы из-за сложности конструкций, высокой стоимости и низкой надежности.

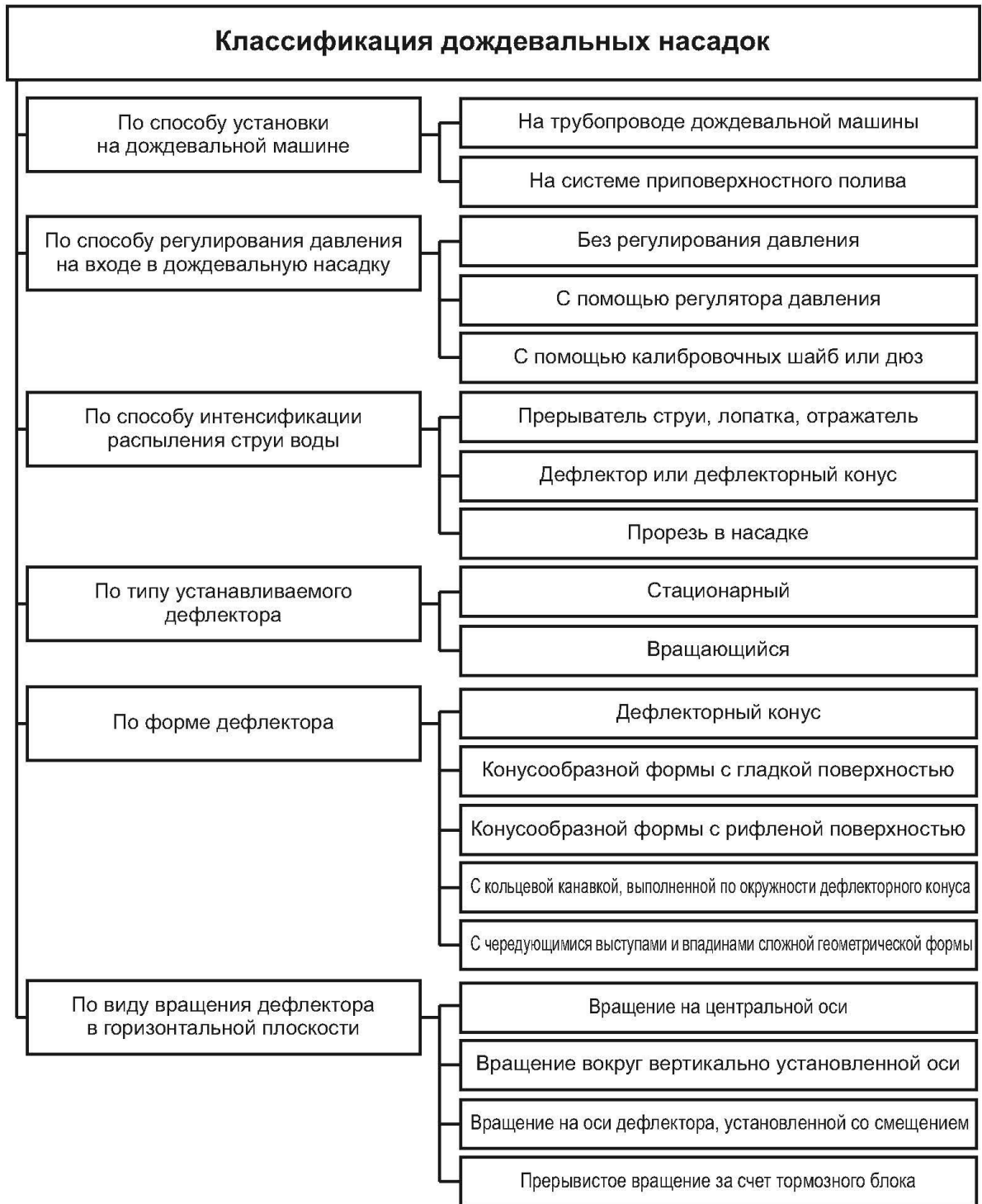


Рисунок 1.20 – Классификация дождевальных насадок

Необходимо учесть тот факт, что количество дождевальных аппаратов, устанавливаемых на трубопровод, значительно меньше по сравнению с дождевальными насадками. Так, например, на трубопроводе ДМ «Фрегат» размещают 49 среднеструйных дождевальных аппаратов или 159 дождевальных насадок. На ДМ

«Кубань ЛК1М» («Каскад») устанавливают по учащенной схеме 212 дождевальных насадок с расстоянием между ними 2,9 м. На более 80 % широкозахватных дождевальных машинах применяют дождевальные насадки с вращающимся дефлектором и стационарным дефлекторным конусом. Из-за большого количества дождевальных насадок на трубопроводе дождевальной машины вопрос, связанный со снижением их стоимости, является достаточно острым.

Исследованиями установлено, что при создании конструкций дождевальных насадок необходимо учитывать следующее [13, 31, 37, 52, 131, 150, 178]:

- повышения ветроустойчивости струи или капли дождя, создаваемого насадкой, можно достичь за счет снижения угла наклона вылета струи с образующей дефлектора;
- создание мелкокапельного дождя и увеличение радиуса полива можно обеспечить повышением частоты вращения дефлектора;
- интенсивность полива зависит от расхода воды, проходящей через выходное отверстие сопла насадки, и охватываемой площади полива.

На основе на данных направлений совершенствования конструкции дождевальных насадок необходимо создавать новые перспективные конструкции, обеспечивающие повышение качества дождя, а также надежности и снижения стоимости насадок.

В связи с этим в диссертационной работе предлагается провести исследования, направленные на разработку дождевальной насадки, повышающей качественные показатели дождя, и обоснование ее конструктивных параметров (рисунок 1.21).

Работу проводили по трем направлениям: теоретические, лабораторные и полевые исследования.

В ходе теоретических исследований были рассмотрены процессы, обеспечивающие формирование дождя с рациональным диаметром капли и радиусом полива.



Рисунок 1.21 – Структурная схема исследований, направленных на повышение качественных показателей дождя

На основании исследуемых процессов было запланировано получение аналитических зависимостей, определяющих конструктивные параметры разрабатываемой дождевальной насадки.

Для подтверждения теоретических предпосылок предусмотрено проведение экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных параметров разрабатываемой дождевальной насадки на качественные показатели дождя.

По результатам проведенных исследований разработана конструкция дождевальной насадки, обеспечивающей формирование дождя с лучшими качественными показателями.



## 1.5 Цель и задачи исследований

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

### **Задачи исследований:**

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

2. Разработать конструкцию и выполнить 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 ДМ кругового действия, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью разработанной конструкции.

## 1.6 Выводы по главе

1. Анализ мелиоративного комплекса России и Саратовской области показал, что в настоящее время происходит увеличение орошаемых площадей с применением на них широкозахватных дождевальных машин кругового действия Российского и зарубежного производства. На орошаемых полях Саратовской области работает более 900 дождевальных машин кругового действия, оборудованных дождевальными насадками отечественного и зарубежного производства.

2. Анализ проведенных исследований позволил установить, что значительное количество насадок дождевальных машин, работающих в климатических и почвенных условиях Саратовской области, формируют дождь с каплями большого диаметра. Это приводит к повышению средней и мгновенной интенсивности дождя, увеличивает его удельную мощность и энергоёмкость, что негативно отражается на сельскохозяйственных культурах и верхних слоях почвы. Негативное воздействие дождя на верхние слои почвы сопровождается разрушением её структуры, увеличением плотности, что снижает ее впитывающую способность и, как следствие, сокращает достаточные поливные нормы. Данный процесс негативно отражается на росте и развитии сельскохозяйственных культур, снижая урожайность.

3. Несмотря на значительное разнообразие дождевальных насадок, разработанных под заданные требования полива, эффективность их работы обусловлена рядом условий. Накопленный многолетний опыт и проведенные исследования, направленные на совершенствование конструкций дождевальных насадок, продолжает процесс создания конструкций насадок с оптимальными значениями крупности капель создаваемого ими дождя с учетом повышения равномерности полива и распределения интенсивности дождя по всей площади полива.

4. Существующие математические зависимости не в полной мере отражают взаимосвязь конструкторско-технологических параметров дождевальной насадки с качественными показателями создаваемого ими дождя. В большинстве случаев представленные зависимости и выполненные исследования носят частный характер и ориентированы на определённые условия работы.

5. Наиболее перспективной конструкцией, обеспечивающей изменение качественных показателей дождя, является дождевальная насадка с вращающимся дефлектором. Для обоснования её конструктивно-технологических параметров, влияющих на равномерность и интенсивность полива, распределение диаметров капель дождя, его удельную мощность и другие качественные показатели дождя, обеспечивающего качественный полив, необходимы исследования, направленные на получение новых математических зависимостей или уточнение существующих.

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДОЖДЯ ДЕФЛЕКТОРНОЙ НАСАДКОЙ С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДЕФЛЕКТОРОМ КОНУСООБРАЗНОЙ ФОРМЫ С РИФЛЕНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

Получение стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур в климатических условиях Саратовской области невозможно без полива. Его осуществляют дождевальными машинами кругового действия с дождеобразующими устройствами. Однако существующие серийные конструкции дождеобразующих устройств, устанавливаемых на ДМ, создают дождь, не отвечающий качественным показателям, а именно с большим содержанием капель диаметром более 1,5 мм, высокой интенсивностью, большими потерями на испарение и снос ветром, низкой равномерностью полива. Для устранения данных недостатков и обеспечения качественных показателей дождя нами предлагается использовать на дождевальных машинах разработанную конструкцию дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с ребристой поверхностью.

### **2.1 Предлагаемая конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью**

Опираясь на выводы, полученные в ходе проведенного анализа конструкций дождевальных насадок и качественных показателей создаваемого ими дождя, было установлено, что большая часть конструкций дождеобразующих устройств не обеспечивают требуемых качественных показателей дождя. Процесс полива существующими дождевальными насадками сопровождается большими потерями воды на испарение и снос ветром, низкой равномерностью полива, что вызывает необходимость совершенствования конструкции дождевальных насадок и обоснования конструктивных параметров, влияющих на качественные показатели дождя.

Поскольку перспективным направлением улучшения качественных показателей дождя является использование вращающегося дефлектора, то была разработана конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью (рисунок 2.1) [123].

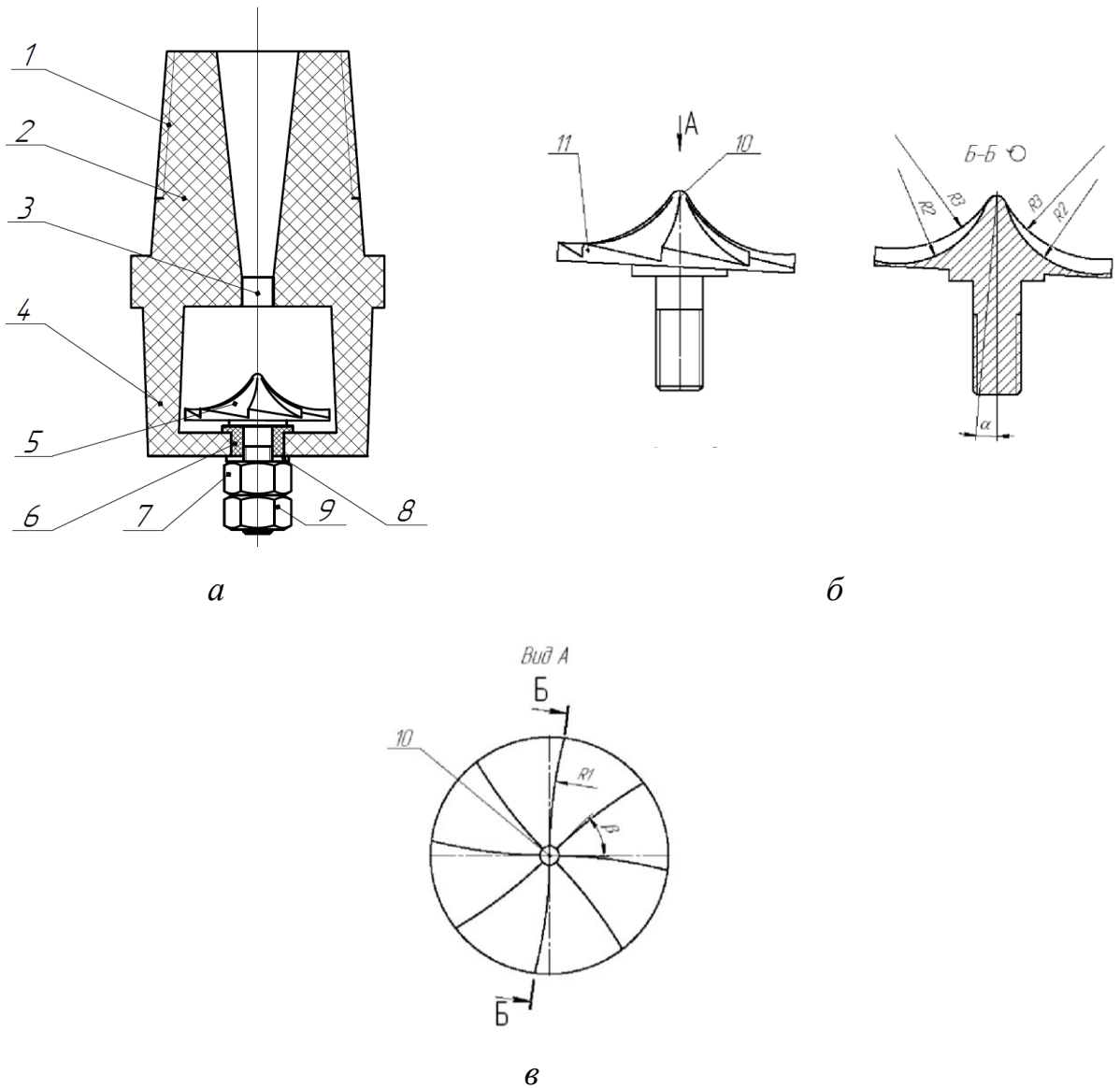


Рисунок 2.1 – Предлагаемая дождевальная насадка с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью: *а* – общий вид; *б, в* – вращающийся дефлектор (соответственно вид сбоку и сверху): 1 – резьба; 2 – корпус; 3 – сопло; 4 – ножки; 5 – дефлектор; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – шайба; 9 – контргайка; 10 – бульб; 11 – уступ

Предлагаемая дождевальная насадка (см. рисунок 2.1, *а*) включает в себя корпус 2, присоединяемый к водоподводящему трубопроводу дождевальной машины с помощью резьбы 1. В верхней части корпуса 2 выполнено сопло 3 с выходным калиброванным отверстием, а в нижней части имеются две ножки 4,

установленные напротив друг друга и соединенные между собой пластиной круглой формы, в центре которой сделано отверстие для установки втулки 6, необходимой для крепления и вращения дефлектора 5 с осью, закрепленной во втулке 6 посредством резьбового соединения гайкой 7, шайбы 8 и контрагайки 9.

Полость сопла 3 выполнена в виде усеченного конуса, диаметр которого уменьшается в сторону дефлектора 5. Ножки 4 имеют каплевидную форму переменного сечения, увеличивающегося в сторону дефлектора 5. Дефлектор конусообразной формы с рифленой поверхностью расположен на оси, установленной во втулке 6 и вращающейся относительно корпуса 2. При этом ось втулки не совпадает с осью дефлектора, их пересечение в вершине дефлектора образует угол  $\alpha$  (см. рисунок 2.1, б), что приводит к наклону дефлектора относительно собственной оси на такой же угол  $\alpha$ .

Бульб 10 выпуклой эллипсовидной формы расположен в центре дефлектора 5 и направлен в сторону сопла 3, по образующей которого выполнены криволинейные уступы 11 треугольной формы переменного сечения, попеременно увеличивающегося и уменьшающегося к периферии (см. рисунок 2.1, б), а каждая лежащая в радиальной плоскости к оси вращения дефлектора грань каждого предыдущего уступа является началом каждого последующего вертикально расположенного уступа, выполненного с кривизной радиусами  $R1$ ,  $R2$  и  $R3$  (см. рисунок 2.1, в) как в продольной, так и в поперечной плоскостях. Уступы 11 на дефлекторе 5 начинаются на дуге, образующей бульб 10, на расстоянии, равном длине малой полуоси эллипса от вершины бульба 10. Корпус 2 и ножки 4 выполнены единой деталью [123].

Дождевальная дефлекторная насадка работает следующим образом.

Выполняют монтаж дождевальной насадки. Корпус 2 с помощью резьбы 1 крепят на отводе трубопровода дождевальной машины, в который подается вода. Поток воды из трубопровода по отводу попадает в корпус насадки и, проходя через сопло 3, в виде струи поступает на бульб 10. Поскольку последний выполнен в виде выпуклой эллипсовидной формы, то струя воды равномерно распределяет-

ся по корпусу дефлектора 5 с криволинейно вогнутой поверхностью, заставляя его вращаться относительно оси, закрепленной с помощью гайки 7, шайбы 8 и контргайки 9 во втулке 6, установленной на ножках 4. Вращение дефлектора 5 происходит за счет энергии струи воды, подаваемой на криволинейные уступы 11 треугольной формы, выполненные по поверхности дефлектора. За счет формы уступов и сопротивления воздуха струи воды, сходящие с дефлектора, разбиваются на мелкие капли. Это способствует равномерному распределению дождя по всей площади полива, что снижает негативное воздействие на почвы и растения, уменьшая вымывание и предотвращая водную эрозию [123].

Необходимо определить конструктивные параметры предлагаемой конструкции дождевальной насадки и оценить их влияние на качественные показатели создаваемого дождя.

## **2.2 Определение конструктивно-технологических параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью**

Для установления связи между конструктивными параметрами дождевальной насадки и качественными показателями дождя необходимо определить толщину пленки воды, сходящей с основания вращающегося дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью, поскольку этот показатель оказывает влияние на распад пленки с образованием капель дождя разного диаметра, а также на расход воды.

Исследованиями установлено [93, 158], что сходящая с основания дефлектора пленка воды сохраняет свою целостность и имеет конусообразную форму, соответствующую параметрам дефлектора. Сойдя с дефлектора, пленка воды на некотором расстоянии начинает распадаться на капли за счет взаимодействия с воздухом.

Струя воды, выходя из выходного отверстия дождевальной насадки диаметром  $D_{во}$  и пройдя расстояние  $L_0$  до вершины вращающегося дефлектора, попадает на его вершину с радиусом скругления  $r_{кб}$ , разделяется и равномерно распределяется по всей конусообразной рифленой поверхности. Угол наклона рифленых по-

верхностей (образующих) –  $\alpha_k$ , диаметр дефлектора при основании –  $D_{дк}$  (рисунок 2.2). В процессе обтекания конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора пленка воды движется по криволинейной поверхности и сходит с образующей дефлектора, имея толщину  $\delta$  и угол наклона к горизонтальной поверхности  $\alpha_n$ .

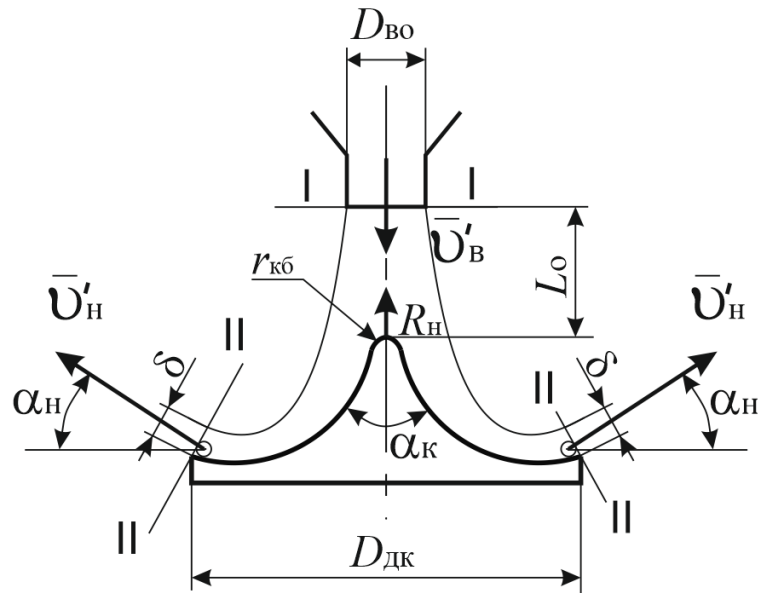


Рисунок 2.2 – Схема обтекания водой вращающегося дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью

Авторы [10, 41] при определении толщины пленки воды, сходящей с основания вращающегося дефлектора, не учитывали силовое воздействие, возникаемое в процессе движения воды по конусообразной рифленой поверхности дефлектора. По их мнению, на конусообразной рифленой поверхности дефлектора не создаются потери напора, связанные с трением, скорость движения воды остается постоянной и на сходе с основания дефлектора остается такой же, как и на выходе из сопла насадки. Однако это утверждение противоречит результатам, полученным в ходе проведенных исследований [46, 85, 150, 155].

Из сопла дождевальной насадки поток воды выходит в турбулентном режиме. Тогда рассмотрим процесс обтекания дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью в плоскости вертикального сечения с наибольшей кривизной, потоком воды, имеющим избыточное давление.

Согласно процессу обтекания дефлектора жидкостью, следует рассмотреть две плоскости (см. рисунок 2.2): I–I – плоскость на выходе потока воды из сопла дождевальной насадки и II–II – плоскость потока воды на сходе с основания дефлектора. С учетом этого запишем уравнение Бернулли [93]:

$$K_I \frac{v_B^2}{2g} - K_{II} \frac{v_H^2}{2g} = L_o + h_{тр}, \quad (2.1)$$

где  $K_I$  и  $K_{II}$  – коэффициенты Кориолиса;

$v_B$  и  $v_H$  – средние скорости движения потока воды в сечениях I–I и II–II, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$L_o$  – расстояние от вершины дефлектора до выходного отверстия сопла дождевальной насадки, м;

$h_{тр}$  – суммарные потери напора воды, м.

Для полного и равномерного обтекания поверхности дефлектора необходимо, чтобы поток воды, выходящий из сопла дождевальной насадки, не разрушался при встрече с воздухом. За данный процесс в зависимости (2.1) отвечает величина  $L_o$ , которая в свою очередь является конструктивным параметром, оказывающим влияние на формирование потока воды, обтекающей дефлектор. В процессе выхода струи воды из сопла дождевальной насадки она встречается с потоком воздуха, который приводит к ее распаду на капли. Установлено, что напор воды на выходе из сопла дождевальной насадки имеет большую величину, чем высота компактной части струи. Тогда компактная часть струи воды, необходимой для обтекания дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью будет сохраняться до величины  $L_o$ :

$$L_o = K_{прс} H_{вн}, \quad (2.2)$$

где  $K_{прс}$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий начало распада струи воды на капли;

$H_{вн}$  – максимальная длина струи воды, сохраняющая свою компактность без распада на капли, м.



При выходе из сопла дождевальной насадки струя воды встречается с потоком воздуха, создающим внешнее воздействие на нее приводящее к потере напора  $H_{пт}$ , которую можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} H_{пт} &= H_{вс} - H_{вн}; \\ H_{пт} &= K_{прс} \frac{H_{вн}}{D_{во}} \frac{v_{в}^2}{2g}, \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

где  $H_{вс}$  – напор воды на выходе из сопла дождевальной насадки, м;

$D_{во}$  – диаметр выходного отверстия сопла дождевальной насадки, м.

Поток воды выходит из сопла дождевальной насадки со скоростью  $v_{в}$ , которую можно определить по формуле [185]:

$$v_{в} = \varphi_{ск} \sqrt{2gH_{вс}}, \quad (2.4)$$

где  $\varphi_{ск}$  – скоростной коэффициент, зависящий от формы входных кромок отверстия, для выходного отверстия сопла дождевальной насадки круглой формы принимаем  $\varphi_{ск} = 0,8$  [185].

Подставим зависимость (2.4) в уравнение (2.3) и обозначим  $\psi_c = \frac{k_{нас} \varphi_{ск}^2}{D_{во}}$ ,  $M^{-1}$ .

Получим:

$$\left. \begin{aligned} H_{пт} &= k_{нас} \frac{H_{вн}}{D_{во}} \varphi_{ск}^2 H_{вс}; \\ H_{вн} &= \frac{H_{вс}}{1 + \psi_c H_{вс}}, \end{aligned} \right\}, \quad (2.5)$$

В системе уравнений (2.5) значение скоростного коэффициента  $\psi_c$  можно определить по эмпирической зависимости [112]:

$$\psi_c = \frac{0,00025}{D_{во} + (10D_{во})^3}. \quad (2.6)$$

Решая систему уравнений (2.5) относительно величины  $H_{вс}$  и подставив полученное значение в зависимость (2.2), определим оптимальную длину удаления

вершины вращающегося дефлектора от выходного отверстия сопла дождевальной насадки в зависимости от его диаметра:

$$L_o = K_{\text{прс}} \frac{H_{\text{пт}} D_{\text{во}} \psi_c + \sqrt{(H_{\text{пт}} D_{\text{во}} \psi_c)^2 + 4k_{\text{нас}} \phi_{\text{ск}}^2 H_{\text{пт}} D_{\text{во}}}}{2k_{\text{нас}} \phi_{\text{ск}}^2}. \quad (2.7)$$

В процессе обтекания конусообразной рифленой поверхности дефлектора в потоке воды образуются потери напора  $h_{\text{тр}}$ , которые можно определить по формуле Вейсбаха [185]:

$$h_{\text{тр}} = K_{\text{пт}} \frac{v_{\text{н}}^2}{2g}, \quad (2.8)$$

где  $K_{\text{пт}}$  – коэффициент суммарных гидравлических сопротивлений, учитывающий потери напора потока воды при обтекании конусообразной рифленой поверхности дефлектора и сходе пленки воды с его основания.

Приняв допущение, что в процессе обтекания дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью поток воды сохраняет турбулентный режим и  $K_{\text{I}} = K_{\text{II}} = 1$ , а также выполнив переход от скорости движения потока воды на его расход из сопла дождевальной насадки, получим:

$$Q_{\text{нас}} = K_{\text{рас}} S_{\text{I}} \sqrt{2gL_o}, \quad (2.9)$$

где  $Q_{\text{нас}}$  – расход воды, выходящей из сопла дождевальной насадки, м<sup>3</sup>/с;

$K_{\text{рас}}$  – коэффициент расхода воды, выходящей из сопла дождевальной насадки и обтекающей конусообразную рифленую поверхность дефлектора;

$S_{\text{I}}$  – площадь живого сечения потока воды, выходящего из выходного отверстия сопла дождевальной насадки, м<sup>2</sup>.

Коэффициент расхода воды, выходящей из сопла дождевальной насадки в сечении I–I, отнесенный к сходу воды с основания дефлектора в сечении II–II можно по формуле:

$$K_{\text{рас}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 + K_{\text{пр}}) \left( \frac{S_I}{S_{II}} \right)^2}}, \quad (2.10)$$

где  $K_{\text{пр}}$  – полный гидравлический коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора воды на конусообразной рифленной поверхности дефлектора и на поверхности раздела фаз «жидкость – воздух»;

$S_I$  и  $S_{II}$  – соответственно площади живого сечения потока воды в сечениях I–I и II–II, м<sup>2</sup>.

В плоскости I–I площадь живого сечения потока воды:

$$S_I = \frac{\pi D_{\text{во}}^2}{4}. \quad (2.11)$$

В плоскости II–II:

$$S_{II} = \pi \delta \left( D_{\text{дк}} + \delta \cos \frac{\alpha_{\text{к}}}{2} \right), \quad (2.12)$$

где  $\delta$  – толщина пленки потока воды, сходящего с основания дефлектора, м;

$D_{\text{дк}}$  – диаметр основания дефлектора дождевальная насадка, м;

$\alpha_{\text{к}}$  – угол наклона образующей рифленной поверхности конусообразного дефлектора, град.

В процессе движения потока воды в виде пленки по конусообразной рифленной поверхности дефлектора происходит ее постоянный подпор за счет набегающего потока воды. Тогда зависимость (2.9) с учетом формулы (2.10) можно записать в следующем виде:

$$K_{\text{рас}} = \frac{Q_{\text{нас}}}{S_I \sqrt{2gL_0}} = \frac{v_{\text{в}}}{\sqrt{2gL_0}} = \sqrt{\frac{F_r}{2}}, \quad (2.13)$$

где  $F_r$  – число Фруда набегающего потока воды,  $F_r = \frac{v_{\text{в}}}{\sqrt{gL_0}}$ .

На величину числа Фруда, или параметр кинетичности движущегося потока воды, оказывает влияние сопротивление, возникаемое в процессе обтекания конусообразной рифленой поверхности дефлектора (рисунок 2.3).

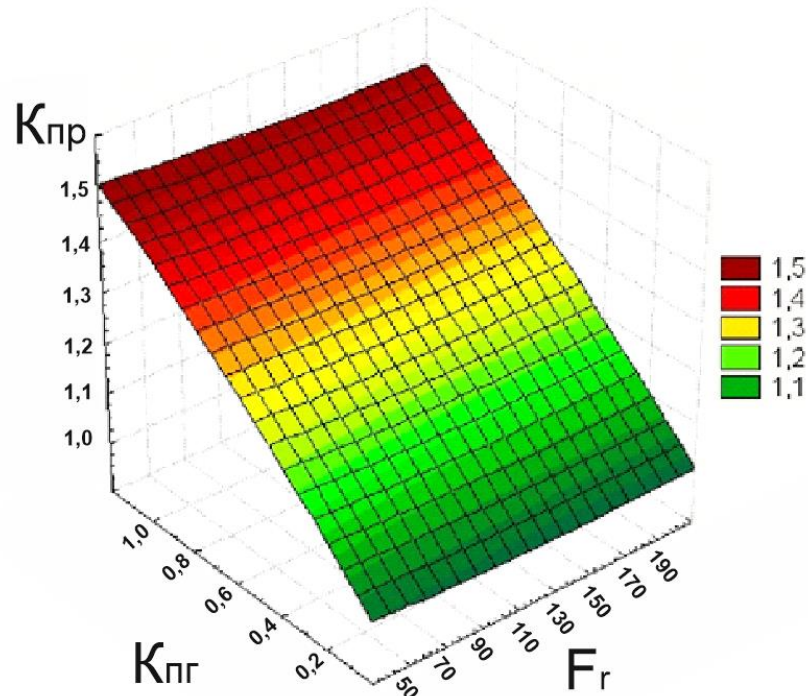


Рисунок 2.3 – Зависимость величины  $K_{пр}$  от  $K_{пр}$  и  $F_r$

Для определения толщины пленки потока воды, сходящего с основания дефлектора, необходимо приравнять зависимости (2.10) и (2.13). Тогда:

$$\sqrt{\frac{F_r}{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (1 + K_{пр}) \left( \frac{\frac{\pi D_{во}^2}{4}}{\pi \delta \left( D_{дк} + \delta \cos \frac{\alpha_k}{2} \right)} \right)}}. \quad (2.14)$$

Решив уравнение (2.14), определим толщину пленки потока воды, сходящего с основания дефлектора:

$$\delta = -\frac{D_{дк}}{2 \cos \frac{\alpha_k}{2}} + \sqrt{\frac{D_{дк}^2}{4 \cos^2 \frac{\alpha_k}{2}} + K_{пр} \frac{D_{во}^2}{\cos \frac{\alpha_k}{2}}}, \quad (2.15)$$

где  $K_{\text{пр}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий работу сил трения, а также параметр кинетичности набегающего потока воды, обтекающей конусообразную

рифленую поверхность дефлектора,  $K_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1 + K_{\text{пр}}}{1 - \frac{2}{F_r}}}$ .

Проводя анализ полученной зависимости (2.15), можно установить, что толщина пленки потока воды возрастает при увеличении коэффициента сопротивления  $K_{\text{пр}}$  и снижается при повышении параметра кинетичности набегающего потока воды. Тогда диаметр дефлектора с учетом безотрывного обтекания потоком воды:

$$D_{\text{дк}} = K_{\text{пр}} \frac{D_{\text{во}}^2}{4\delta} - \frac{\delta}{4} \cos \frac{\alpha_{\text{к}}}{2}. \quad (2.16)$$

Удержание вращающегося дефлектора дождевальной насадки осуществляется с помощью двух ножек, на которые действуют усилия, равное динамическому воздействию струи воды, и сила тяжести дефлектора с креплением. В процессе выхода струи воды из сопла дефлекторной насадки под действием напора происходит удар о криволинейную вершину конусообразной поверхности дефлектора с силой  $F_{\text{н}}$  и последующим разделением потока воды на равные части, обтеканием конусообразной рифленой поверхности дефлектора и схода с нее со скоростями  $v_{\text{н1}}$  и  $v_{\text{н2}}$  (рисунок 2.4).

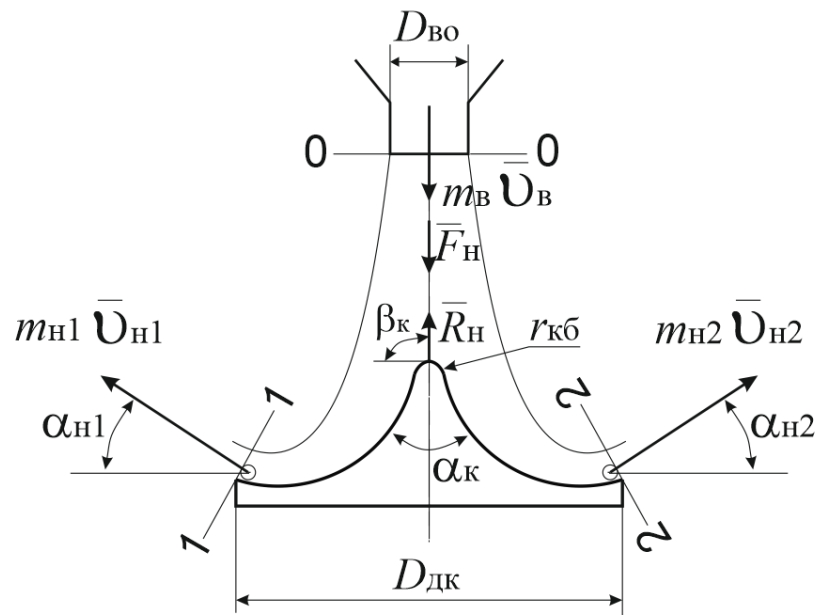


Рисунок 2.4 – Схема воздействия струи воды на вращающийся дефлектор конусообразной формы с рифленой поверхностью

Движение потока воды по дефлектору будет сопровождаться наклоном струи воды с углами  $\alpha_{н1}$  и  $\alpha_{н2}$  к горизонту и углом  $\beta_k$  наклона реакции на дефлекторе от воздействия струи воды  $R_n$  к горизонту.

На основании теории импульса [43] и зная, что изменение количества движения массы движущейся струи воды, выходящей из сопла дождевальная насадки за какой-то промежуток времени, равно импульсу силы, вызвавший это изменение за тот же промежуток времени. Составив на вертикальную ось проекцию изменения количества движения струи воды за время  $t_b$ , которая должна быть равна импульсу силы за то же время, получим:

$$m_b v_b - m_{н1} v_{н1} \sin \alpha_{н1} - m_{н2} v_{н2} \sin \alpha_{н2} = R_n \cos \beta_k t_b, \quad (2.17)$$

где  $m_b, m_{н1}, m_{н2}$  – масса струи воды, движущейся в сечениях 0–0, 1–1 и 2–2, кг;

$v_b, v_{н1}, v_{н2}$  – скорости движения воды в сечениях 0–0, 1–1 и 2–2, м/с;

$\alpha_{н1}, \alpha_{н2}, \beta_k$  – углы наклона струи воды к горизонту, град.;

$R_n$  – реакция на дефлекторе от воздействия струи воды, Н;

$t_b$  – время изменения силы, с.

В процессе движения струи воды по конусообразной рифленной поверхности дефлектора происходит ее двукратное воздействие: на вершине дефлектора при разделении струи и на конусообразной рифленной поверхности дефлектора, когда струя движется по криволинейной поверхности. Тогда результирующая сила  $F_n$ :

$$F_n = R_{н1} + R_{н2}, \quad (2.18)$$

где  $R_{н1}, R_{н2}$  – соответственно реакции на дефлекторе от воздействия струи воды на его вершине и основании, Н.

Подставив в зависимость (2.18) значения величин с учетом зависимости (2.17), получим:

$$F_n = \frac{1}{t_b} \left[ 2m_b v_b - m_{н1} v_{н1} \sin \alpha_{н1} + m_{н2} v_{н2} \sin \alpha_{н2} - \right. \\ \left. - m_{н1} v_{н1} \sin(180 - \alpha_{н1}) + m_{н2} v_{н2} \sin(180 - \alpha_{н2}) \right]. \quad (2.19)$$

Вследствие симметричности конусообразной рифленой поверхности дефлектора относительно его центра и вертикального расположения можем записать условия:  $\alpha_{н1} = \alpha_{н2} = \alpha_{н}$ ;  $\beta_{к} = 90^{\circ}$ ;  $\nu_{н1} = \nu_{н2} = \nu_{н}$ . Решая уравнение (2.19) с учетом того, что на вершине конусообразной рифленой поверхности дефлектора скорость струи воды равна скорости струи на выходе из сопла дождевальной насадки, а  $m_{в} = m_1 + m_2 = \rho_{в} S_1 L_{отв} = \rho_{в} Q_{нас} t_{в} = \rho_{в} \nu_{в} S_1 t_{в}$ , получим:

$$F_{н} = \rho_{в} Q_{нас} \left[ \nu_{в} \sin \frac{\alpha_{к}}{2} + \nu_{н} (1 - \cos \alpha_{н}) \right], \quad (2.20)$$

где  $\rho_{в}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha_{н}$  – угол, образованный между линиями траектории движения струи воды, сходящей с основания дефлектора, и горизонтальной поверхностью (далее по тексту – угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту), град.

Так  $\nu_{н} \neq \nu_{в}$ , из уравнения (2.1) и зависимости (2.13) выразим скорость течения потока воды на сходе с основания дефлектора с учетом возникаемых сопротивлений:

$$\nu_{н} = \frac{\nu_{в}}{\sqrt{1 - K_{пр}}} \sqrt{1 - \frac{2}{F_r}}. \quad (2.21)$$

Ранее было введено обозначение  $K_{пр} = \sqrt{\frac{1 + K_{пр}}{1 - \frac{2}{F_r}}}$ . Тогда искомое значение

скорости потока воды на сходе с основания дефлектора:  $\nu_{н} = \frac{\nu_{в}}{K_{пр}}$ .

Подставив зависимость (2.21) в формулу (2.20), рассчитаем искомую силу, действующую на дефлектор за счет воздействия струи воды:

$$F_{н} = \rho_{в} Q_{нас} \nu_{в} \left[ K_{пр} \sin \frac{\alpha_{к}}{2} + (1 - \cos \alpha_{н}) \right]. \quad (2.22)$$

В конструкции дождевальной насадки предусмотрена установка двух ножек. Тогда сила  $F_{сн}$ , действующая на ножку насадки:

$$F_{\text{сн}} = \frac{F_{\text{н}}}{2}. \quad (2.23)$$

Геометрические параметры ножки насадки определим с учетом необходимого условия прочности материала на разрыв [153], из которого будет выполнена дождевальная насадка. Тогда:

$$\sigma = \frac{F_{\text{сн}}}{S_{\text{псн}}} \leq [\sigma_{\text{р}}] = \frac{[\sigma_{\text{в}}]}{K_{\text{зап}}}, \quad (2.24)$$

где  $\sigma$  – напряжение, возникающее в материале под действием максимальной силы  $F_{\text{сн}}$ , Па;

$F_{\text{сн}}$  – максимальная сила, действующая на ножку насадки, Н;

$S_{\text{псн}}$  – площадь поперечного сечения ножки дождевальной насадки, м<sup>2</sup>;

$\sigma_{\text{р}}$  – допустимое напряжение при растяжении материала, Па;

$\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности при растяжении материала насадки, Па;

$K_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса прочности конструкции ножки дождевальной насадки, с учетом динамического воздействия принимаем  $K_{\text{зап}} = 1,5 \dots 2,0$ .

При рассмотрении существующих конструкций дождевальных насадок было установлено, что наиболее частой формой их ножек считается прямоугольная. Тогда площадь ножки насадки  $S_{\text{псн}}$ :

$$S_{\text{псн}} = H_{\text{сн}} L_{\text{сн}}, \quad (2.25)$$

где  $H_{\text{сн}}$  – толщина ножки дождевальной насадки, м;

$L_{\text{сн}}$  – длина ножки дождевальной насадки, м.

В процессе работы дождевальной насадки поток воды, сходящий с основания дефлектора, попадает на ножку, где происходит разрыв сплошного потока с обтеканием ножки, что оказывает влияние на равномерность полива. При этом ножка насадки испытывает дополнительную силу воздействия на лобовой поверхности  $F_{\text{лоб}}$ , которую можно определить по формуле [167, 185]:

$$F_{\text{лоб}} = K_{\text{лоб}} S_{\text{псн}} \frac{\rho_{\text{в}} v_{\text{н}}^2}{2}, \quad (2.26)$$

где  $K_{\text{лоб}}$  — коэффициент лобового сопротивления ножки дождевальной насадки.



Считаем, что ножку дождевальной насадки обтекает поток воды, сходящий с дефлектора. Тогда местная скорость движения воды  $v_{\text{мест}}$  по поверхности ножки [167, 185]:

$$v_{\text{мест}} = \frac{v_{\text{н}}}{1 - \frac{K_{\text{пк}} S_{\text{псн}}}{S_{\text{I}}}}, \quad (2.27)$$

где  $K_{\text{пк}}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние формы ножки дождевальной насадки, для ножки, имеющей обтекаемую форму,  $K_{\text{пк}} \leq 1,0$ ; для других форм  $K_{\text{пк}} > 1,0$  [127].

Решая совместно зависимости (2.26) и (2.27), получим связь между коэффициентами местного  $K_{\text{мест}}$  и лобового  $K_{\text{лоб}}$  сопротивлений ножки дождевальной насадки:

$$K_{\text{мест}} = \frac{K_{\text{лоб}} S_{\text{псн}}}{S_{\text{I}}} \left( \frac{v_{\text{мест}}}{v_{\text{н}}} \right)^3. \quad (2.28)$$

В связи с разностью скоростей движения струи воды на выходе из сопла дождевальной насадки и схода ее с основания дефлектора найдем их отношение с учетом возможного места установки ножки насадки:

$$\frac{v_{\text{н}}}{v_{\text{мест}}} = K_{\text{ф}} \left[ 1 - \left( \frac{2L_{\text{сд}}}{D_{\text{во}}} \right)^2 \right], \quad (2.29)$$

где  $K_{\text{ф}}$  – коэффициент, учитывающий обтекаемую форму ножки дождевальной насадки, для пространственного обтекания круга или прямоугольника при соотношении  $L_{\text{сн}}/H_{\text{сн}} = 0,5 \dots 2,0$   $K_{\text{ф}} = 2$  [112];

$L_{\text{сд}}$  – расстояние от центра выходного отверстия сопла дождевальной насадки до места установки ножки на пластине, выполненной на корпусе дождевальной насадки, м.

Подставляя в зависимость (2.28) формулу (2.29), получим связь между коэффициентом местного сопротивления ножки дождевальной насадки с учетом места ее установки на пластине, выполненной на корпусе дождевальной насадки:

$$K_{\text{мест}} = K_{\text{лоб}} \frac{K_{\phi}^3 \frac{S_{\text{псн}}}{S_1} \left[ 1 - \left( \frac{2L_{\text{сд}}}{D_{\text{во}}} \right)^2 \right]^3}{\left( 1 - \frac{K_{\text{пк}} S_{\text{псн}}}{S_1} \right)^3}. \quad (2.30)$$

С целью снижения негативного воздействия на поток воды, сходящий с основания дефлектора, ножка дождевальной насадки должна иметь обтекаемую форму с наименьшим сопротивлением, что соответствует ее малой толщине, которая связана с прочностными свойствами используемого материала. Исследованиями установлено, что поперечная площадь ножки насадки должна иметь форму линзы или треугольника с острым углом при вершине  $30^\circ$  [112]. Для обтекания ножки насадки с наименьшим сопротивлением необходимо, чтобы ее ширина была больше, чем ее толщина, а конец ножки насадки должен иметь минимальную толщину. Оптимальная форма поперечного сечения ножки дождевальной насадки показана на рисунке 2.5.

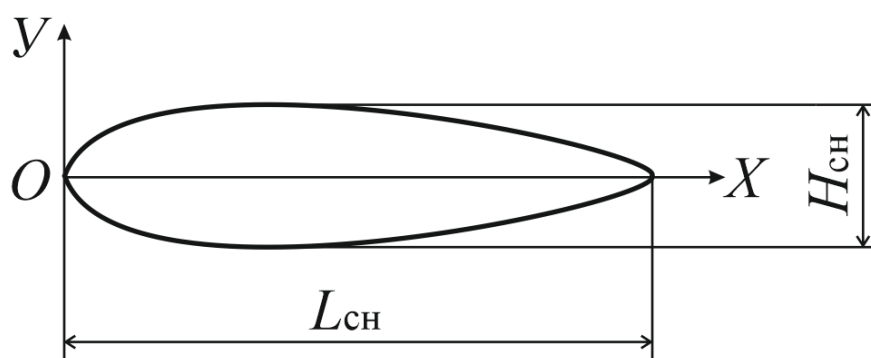


Рисунок 2.5 – Форма поперечного сечения ножки дождевальной насадки, обеспечивающая наименьшее сопротивление

Исходя из вышеизложенного, ширина  $L_{\text{сн}}$  стойки дождевальной насадки с учетом минимального сопротивления при ее обтекании потоком:

$$L_{\text{сн}} = \frac{K_{\text{мест}} \pi D_{\text{во}}^2}{4K_{\text{лоб}} H_{\text{сн}}} \left\{ K_{\phi} \left[ 1 - \left( \frac{2L_{\text{сд}}}{D_{\text{во}}} \right)^2 \right] \right\}^3. \quad (2.31)$$

Зависимость (2.31) обеспечивает связь ширины и толщины ножки дождевальной насадки с диаметром выходного отверстия ее сопла. На дождевальных машинах целесообразнее использовать дождевальные насадки одного типоразмера с одинаковыми конструкционными параметрами, за исключением диаметра выходного отверстия сопла насадки. В связи с этим при выполнении расчета ширины и толщины ножки дождевальной насадки следует принять максимальный диаметр выходного отверстия 16 мм [34].

При изготовлении дождевальной насадки лучше использовать полимерный материал, например полиамид ПА-6, у которого  $\sigma_{\text{в}} = 50$  МПа. Тогда, выполнив расчет, получим: толщина ножки дождевальной насадки  $H_{\text{сн}}$  должна составлять 2,5...3,0 мм, ширина ножки  $L_{\text{сн}} = 8,0...9,0$  мм, расстояние от оси выходного отверстия сопла дождевальной насадки до места установки ножки на пластине, выполненной на корпусе дождевальной насадки,  $L_{\text{сд}} = 28...30$  мм.

Для обеспечения равномерного обтекания конусообразной рифленой поверхности дефлектора струей воды, выходящей из сопла дождевальной насадки, за счет ее разделения на вершине дефлектора имеется выступ с радиусом скругления  $r_{\text{кб}}$ . Согласно проведенным исследованиям [112],  $r_{\text{кб}}$  должен составлять 1,5...2,5 мм.

Далее определим геометрические параметры дефлектора. С целью увеличения радиуса полива дождем, создаваемым дождевальной насадкой, необходимо, чтобы угол  $\alpha_{\text{н}}$  наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту составлял  $30^\circ...32^\circ$  [185]. Считается, что при данных значениях угла дождь обладает хорошей ветроустойчивостью за счет малой высоты подъема. Повышение ветроустойчивости дождя обеспечивается при снижении угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту до  $20^\circ...25^\circ$  [34, 59], но при этом происходит снижение радиуса полива.

На величину угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, сильное влияние оказывает радиус кривизны конусообразной рифленой поверхности дефлектора дождевальной насадки. Этот показатель связан с другими геометрическими параметрами дефлектора, такими, как его высота и диаметр.

Для определения оптимального радиуса кривизны конусообразной рифленой поверхности дефлектора рассмотрим схему (рисунок 2.6).

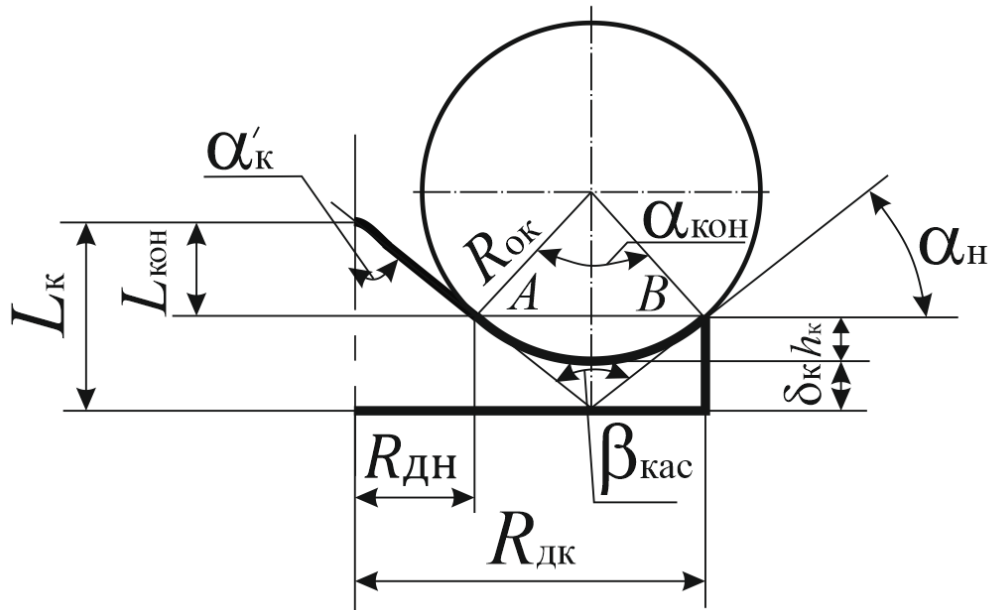


Рисунок 2.6 – Схема к определению геометрических параметров дефлектора дождевальной насадки

Исходя из конструктивных особенностей дефлектора дождевальной насадки, необходимо выполнить предельное условие, чтобы радиус основания дефлектора был больше радиуса окружности, описывающей траекторию полета капли дождя с учетом угла  $\alpha_n$ . Последний определяется как угол, образованный между линиями касательной к окружности и горизонтальной поверхностью. Тогда  $R_{dk} > R_{ok}$ .

Высота дефлектора  $L_k$ :

$$L_k = L_{kon} + h_k + \delta_k, \quad (2.32)$$

где  $L_{kon}$  – длина от вершины дефлектора до точки  $A$  касания окружности на конусообразной рифленой поверхности дефлектора, м;

$h_k$  – глубина дугообразной канавки на конусообразной рифленой поверхности дефлектора, м;

$\delta_k$  – толщина основания дефлектора в точке соприкосновения с окружностью, обеспечивающей вылет капли дождя с основания дефлектора под углом наклона к горизонту  $\alpha_n$ , м.

Длина от вершины дефлектора до точки касания окружности на конусообразной рифленой поверхности связана с углом наклона образующей конусообразной рифленой поверхности дефлектора  $\alpha'_k = \frac{\alpha_k}{2}$ , тогда:

$$L_{\text{кон}} = \frac{R_{\text{дн}}}{\text{tg } \alpha'_k}, \quad (2.33)$$

где  $R_{\text{дн}}$  – расстояние от оси вращения дефлектора до точки  $A$  касания окружности с его образующей, м.

Глубина дугообразной канавки на конусообразной рифленой поверхности дефлектора  $h_k$ :

$$h_k = R_{\text{ок}} \cos \frac{\alpha_{\text{кон}}}{2}, \quad (2.34)$$

где  $R_{\text{ок}}$  – радиус окружности, обеспечивающей вылет капли дождя с основания дефлектора под углом наклона к горизонту  $\alpha_n$ , м;

$\alpha_{\text{кон}}$  – угол контакта окружности с конусообразной рифленой поверхностью дефлектора, град.

Толщина основания дефлектора в точке соприкосновения с окружностью определяется из условия прочности материала, из которого изготовлена дождевальная насадка, на изгиб. В расчете принимаем, что на основании дефлектора действует сила потока воды, определяемая по зависимости (2.20), на плече, равным радиусу основания дефлектора  $R_{\text{дк}}$ . Тогда:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{F R_{\text{дк}}}{W_{\text{изг}} K_{\text{зап}}} \leq [\sigma_{\text{изг}}], \quad (2.35)$$

где  $W_{\text{изг}}$  – момент сопротивления изгибу в опасном сечении дефлектора, Н·м;

$\sigma_{\text{изг}}$  – допустимый предел прочности материала на изгиб, Па.

С учетом того, что момент сопротивления изгибу дефлектора круглого сечения с толщиной  $\delta_k$  определяется как  $W_{изг} = \frac{\pi R_{дк}^3 \delta_k}{16}$  и планируется изготавливать дождевальную насадку из полиамида ПА-6, у которого  $\sigma_{изг} = 60 \dots 70$  МПа, при максимальном воздействии потока воды на основание дефлектора, диаметр которого не превышает 50 мм,  $\delta_k = 2,0 \dots 2,5$  мм.

Так как касание окружности на конусообразной рифленой поверхности дефлектора происходит в точках  $A$  и  $B$ , то длина хорды  $AB$   $L_{AB}$ :

$$L_{AB} = R_{дк} - R_{дн} = R_{дк} - L_{кон} \operatorname{tg} \alpha'_k, \quad (2.36)$$

где  $R_{дк}$  – радиус основания дефлектора, м.

Для перехода к расчету радиуса окружности, по которой движется поток воды по конусообразной рифленой поверхности дефлектора, воспользуемся формулой, определяющей связь между длиной хорды  $AB$  с радиусом окружности и центральным углом:

$$L_{AB} = 2R_{ок} \sin \frac{\alpha_k}{2}. \quad (2.37)$$

Как видно, в зависимостях (2.36) и (2.37) левые части равны. Тогда, приравняв их, получим искомый радиус окружности:

$$R_{ок} = \frac{R_{дк} - L_{кон} \operatorname{tg} \alpha'_k}{2 \sin \frac{\alpha_{кон}}{2}}. \quad (2.38)$$

Для определения угла  $\alpha_{кон}$  контакта окружности с конусообразной рифленой поверхностью дефлектора воспользуемся формулой для расчета угла  $\beta_{кас}$  между двумя касательными линиями к окружности. Согласно теории, величина угла, образованного двумя касательными к окружности, равна половине разности величин дуг, заключенных между ее сторонами [27]. Опираясь на теорему Гаусса [129] о представлении дуги в градусной мере, получим:

$$\beta_{\text{кас}} = 180 - \alpha'_{\text{кон}}. \quad (2.39)$$

В свою очередь, исходя из геометрии дефлектора, угол  $\beta_{\text{кас}}$  можно определить по формуле:

$$\beta_{\text{кас}} = 90 - \alpha'_{\text{кон}} - \alpha_{\text{н}}. \quad (2.40)$$

Приравняв зависимости (2.39) и (2.40), определим угол контакта окружности с конусообразной рифленой поверхностью дефлектора:

$$\alpha_{\text{кон}} = 90 + \alpha'_{\text{к}} + \alpha_{\text{н}}. \quad (2.41)$$

Расчеты геометрических параметров дефлектора по зависимостям (2.32) и (2.38) выявили оптимальный диаметр основания дефлектора  $D_{\text{дк}} = 50$  мм, а для обеспечения угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту  $\alpha_{\text{н}} = 20^\circ \dots 32^\circ$  необходимо обеспечить высоту дефлектора  $L_{\text{к}} = 22,7 \dots 37,8$  мм (рисунки 2.7 и 2.8).

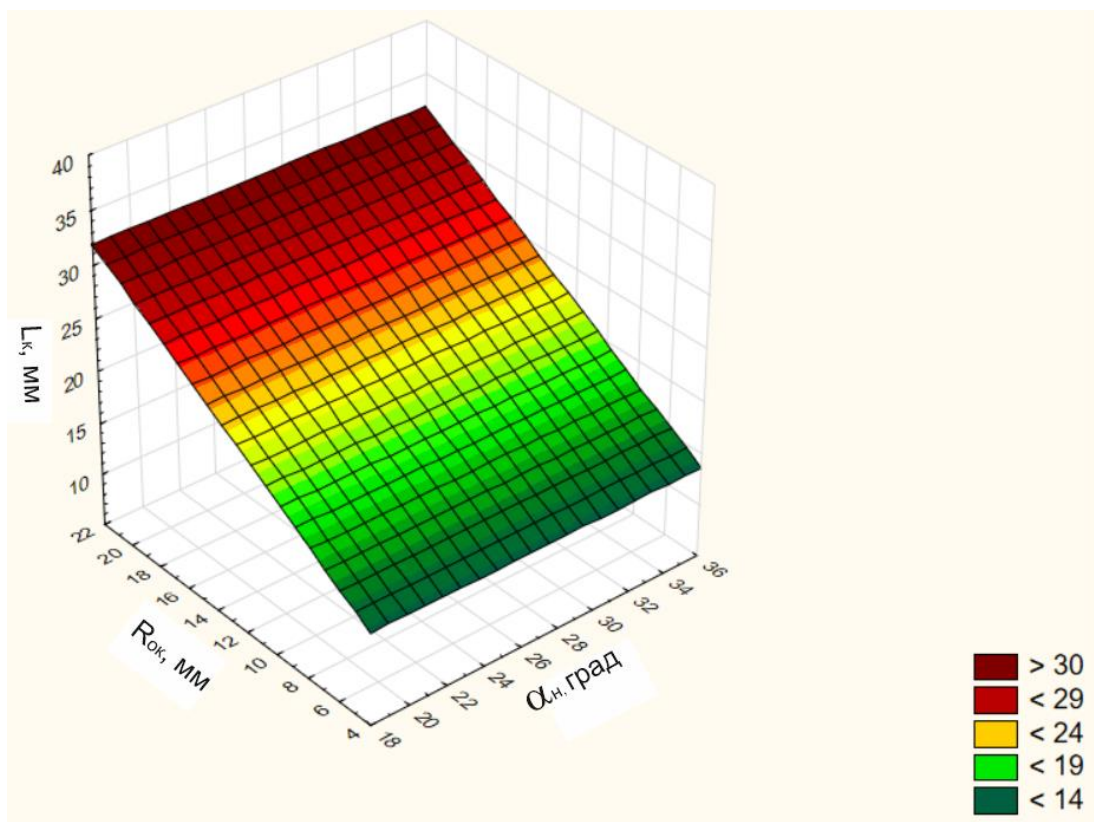


Рисунок 2.7 – Влияние угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту и радиуса кривизны конусообразной рифленой поверхности дефлектора на его высоту

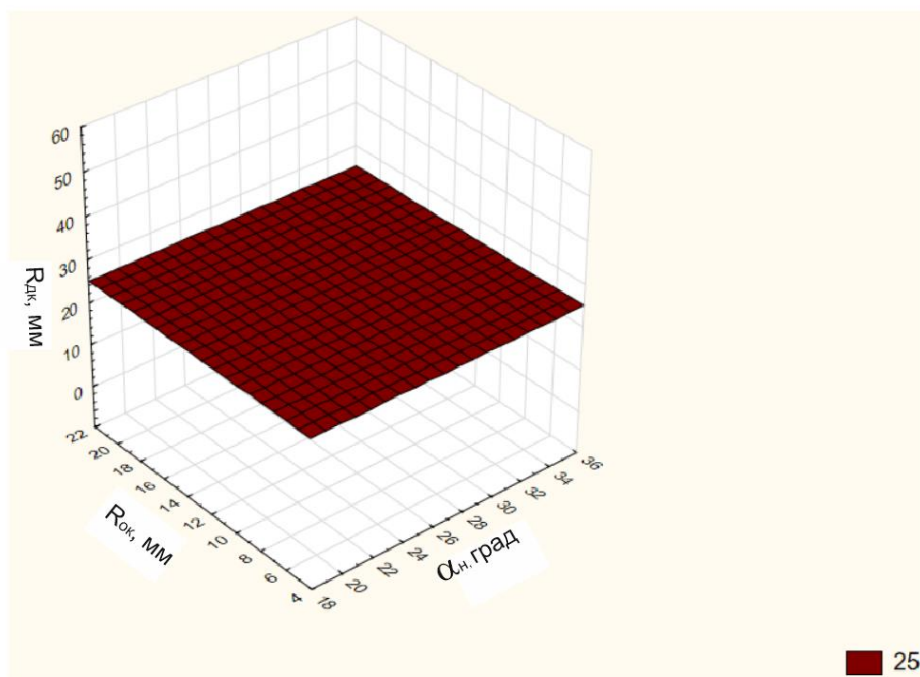


Рисунок 2.8 – Влияние угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту и радиуса кривизны конусообразной рифленой поверхности дефлектора на радиус его основания

Определив оптимальные геометрические параметры дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, оценим их влияние на качественные показатели дождя.

### **2.3 Теоретические исследования влияния конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором на процесс формирования дождя и его качественные показатели**

С целью минимизации негативного воздействия дождя на почву и растения необходимо устанавливать дождевальные насадки на высоту от поверхности почвы 0,8...1,0 м [46, 85]. Тогда предлагаемую дождевальную насадку с вращающимся дефлектором следует размещать на трубопроводе дождевальной машины через гибкие трубопроводы, обеспечивающие ее установку на рекомендуемую высоту.

В предлагаемой конструкции дождевальной насадки предусмотрена установка вращающегося дефлектора, вращение которого осуществляется поступающим на него потоком воды, выходящим из выходного отверстия сопла дождевальной



насадки под напором. Движущийся поток воды, обтекая конусообразную рифленую поверхность дефлектора, попадает на выступы, что обеспечивает создание момента сил от сходящего потока воды, заставляя дефлектор вращаться с определенной частотой. После начала вращения дефлектора вновь поступающий объем воды попадает на вращающийся дефлектор, увеличивая начальную скорость полета капли дождя, сходящего с его основания. При этом образуется дождь с наиболее равномерным распределением диаметра капель, состоящий из первичных капель требуемого диаметра и более мелких.

В процессе схода капли дождя с основания вращающегося дефлектора на нее действуют две силы – центробежная сила и сила поверхностного натяжения. Тогда для определения диаметра капли дождя  $d_{\text{кд}}$ , сходящей с дефлектора, при учете равенства данных сил, можно воспользоваться формулой Д. Г. Пажи [112, 139]:

$$d_{\text{кд}} = \frac{K_c}{\omega_{\text{дк}}} \sqrt{\frac{2F_{\text{пн}}}{D_{\text{дк}}\rho_{\text{в}}}}, \quad (2.42)$$

где  $K_c$  – коэффициент;

$\omega_{\text{дк}}$  – угловая скорость дефлектора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$F_{\text{пн}}$  – сила поверхностного натяжения воды,  $F_{\text{пн}} = 72,86 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$  [104];

$D_{\text{дк}}$  – диаметр основания дефлектора, м;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ .

В формуле (2.42) величина коэффициента  $K_c$  находится в диапазоне от 1,9 до 4,6 [112].

На рисунке 2.9 представлен график, отражающий изменение медианного диаметра капель дождя, создаваемого вращающимся дефлектором, в зависимости от угловой скорости.

Проведя анализ полученных данных, можно утверждать, что с увеличением частоты вращения дефлектора происходит снижение диаметра капель дождя. Вращение дефлектора с осью осуществляется потоком воды, а ось установлена в подшипниковый блок. Тогда осевую силу, действующую на подшипник в процессе вращения дефлектора, можно определить по формуле (2.22).

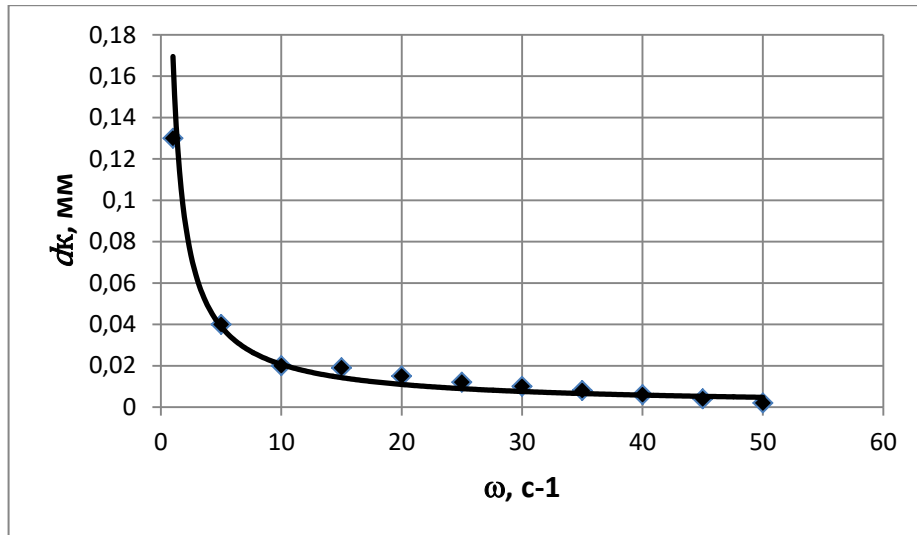


Рисунок 2.9 – Изменение медианного диаметра капель дождя, создаваемого вращающимся дефлектором, в зависимости от угловой скорости

Как было отмечено ранее, вращение дефлектора осуществляется за счет силы проходящего потока воды, действующего на выступающие ребра рифленой конусообразной поверхности (рисунок 2.10).

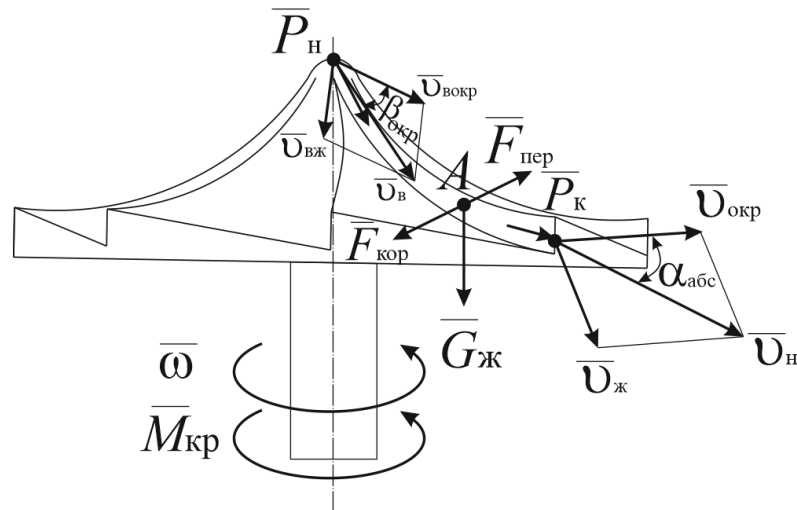


Рисунок 2.10 – Схема сил, действующих на дефлектор дождевальной насадки для обеспечения его вращения

Примем, что движение жидкости считается установившимся с начальными параметрами давления  $P_n$  и скорости потока  $u_v$ . Тогда с учетом уравнения количества движения жидкости получим силу  $\bar{F}_p$  действия потока на ребро рифленой конусообразной рифленой поверхности дефлектора [140]:

$$\bar{F}_p = \bar{P}_n + \bar{P}_k + \bar{G}_ж + \bar{F}_{пер} + \bar{F}_{кор} + \rho_v Q_{от} (v_v - v_n), \quad (2.43)$$

где  $P_k$  – давление воды на выходе с дефлектора, Па;

$G_ж$  – вес воды, Н;

$F_{пер}$  – переносная сила инерции, Н;

$F_{кор}$  – кориолисова сила инерции, Н;

$v_v$  – скорость потока воды на выходе из сопла насадки, м/с;

$v_n$  – скорость потока воды на выходе с основания дефлектора (начальная скорость полета капли дождя), м/с.

Так как при вращении дефлектора кориолисова сила равна нулю, а действие сил заменим результирующими углами, то суммарный крутящий момент  $M_{кр}$ , созданный потоком воды, можно определить по формуле:

$$M_{кр} = Q_{пот} \rho_v K_{реб} (R_{дк} v_v \cos \alpha_{абс} - R_{об} v_n \cos \beta_{окр}), \quad (2.44)$$

где  $K_{реб}$  – коэффициент, характеризующий количество ребер на рифленной конусообразной поверхности дефлектора;

$\alpha_{абс}$  и  $\beta_{окр}$  – углы между абсолютной и окружной скоростью струи воды соответственно на выходе с основания дефлектора и на входе на него, град.

Опираясь на метод Стодола – Майзеля [78], коэффициент, характеризующий количество ребер на рифленной конусообразной поверхности дефлектора, можно рассчитать по формуле:

$$K_{реб} = 1 - \frac{v_{окр}}{v_n} \frac{\pi}{n_{реб}} \sin \alpha_{абс}, \quad (2.45)$$

где  $v_{окр}$  – окружная скорость дефлектора, м/с;

$n_{реб}$  – количество ребер на рифленной конусообразной поверхности дефлектора.

Мощность  $N_{дк}$ , затрачиваемая на вращение дефлектора:

$$N_{дк} = M_{кр} \omega_{дк} = \frac{2\pi M_{кр} n}{60}, \quad (2.46)$$

где  $n$  – частота вращения дефлектора, мин<sup>-1</sup>.

Мощность потока воды  $N_{\text{пв}}$ , обеспечивающая вращение дефлектора:

$$N_{\text{пв}} = Q_{\text{пот}} \rho_{\text{в}} H_{\text{вс}} g. \quad (2.47)$$

Приравняв зависимости (2.46) и (2.47) и подставив в полученное равенство величину крутящего момента, определяемого по формуле (2.44), получим величину угловой скорости дефлектора  $\omega_{\text{к}}$ :

$$\omega_{\text{к}} = \frac{H_{\text{вс}} g}{K_{\text{реб}} \left( R_{\text{дк}} v_{\text{в}} \cos \alpha_{\text{абс}} - R_{\text{о}} v_{\text{н}} \cos \beta_{\text{окр}} \right)}. \quad (2.48)$$

Из анализа зависимостей (2.44) и (2.48) можно сделать вывод о том, что крутящий момент, создаваемый проходящим потоком воды, увеличивает скорость потока на сходе с основания дефлектора, что в свою очередь должно увеличить дальность полета капли дождя. Н. Ф. Рыжко [144] утверждает, что на дальность полета капли дождя оказывают влияние начальная скорость капли дождя  $v_{\text{н}}$ , угол  $\alpha_{\text{н}}$  наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту, высота установки дождевальной насадки  $h_{\text{н}}$  относительно горизонтальной поверхности и скорость воздуха  $v_{\text{воз}}$  (рисунок 2.11).

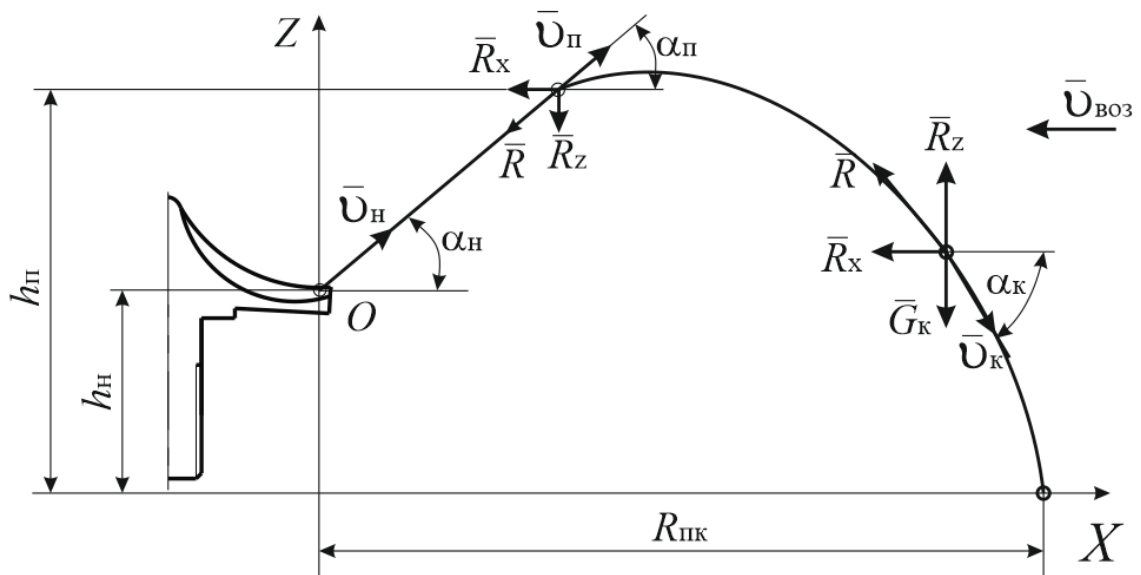


Рисунок 2.11 – Схема сил, действующих на каплю дождя в процессе полета

Для определения дальности полета капли дождя (радиуса полива), сходящего с основания дефлектора, воспользуемся методикой, предложенной Д. В. Штеренлихтом [185]. При отсутствии сопротивления воздуха в процессе полета капли дождя координаты траектории ее полета можно записать в виде (см. рисунок 2.11):

$$\begin{cases} X = v_{\text{н}} \cos \alpha_{\text{н}} t_{\text{п}}; \\ Z = h_{\text{н}} + v_{\text{н}} \sin \alpha_{\text{н}} t_{\text{п}} - \frac{gt_{\text{п}}^2}{2}, \end{cases} \quad (2.49)$$

где  $t_{\text{п}}$  – время полета капли дождя, с;

$h_{\text{н}}$  – высота установки дождевальной насадки над поверхностью поля, м.

С учетом зависимостей (2.49) уравнение, описывающее траекторию полета капли дождя, имеет вид:

$$Z = h_{\text{н}} + Xtg \alpha_{\text{н}} - \frac{gX^2}{2v_{\text{н}}^2 \cos^2 \alpha_{\text{н}}}, \quad (2.50)$$

где  $Z$  и  $X$  – координаты траектории полета капли дождя, м.

Радиус полива дождевальной насадкой (или дальность полета капли дождя) является горизонтальной проекцией ее траектории полета. Тогда определить ее возможно при нулевой вертикальной координате, т. е.  $Z = 0$ :

$$h_{\text{н}} + Xtg \alpha_{\text{н}} - \frac{gX^2}{2v_{\text{н}}^2 \cos^2 \alpha_{\text{н}}} = 0, \quad (2.51)$$

Решение уравнения (2.51) возможно при условии введения переменной  $A = 2v_{\text{н}}^2 \cos^2 \alpha_{\text{н}}$ . Тогда зависимость (2.51) будет иметь следующий вид:

$$Ah_{\text{н}} + AXtg \alpha_{\text{н}} - gX^2 = 0. \quad (2.52)$$

Решая уравнение (2.52) и подставив ранее введенную величину  $A$ , получим формулу для определения радиуса полива дождевальной насадкой:

$$X = R_{\text{пк}} = \frac{2v_{\text{н}}^2 \cos^2 \alpha_{\text{н}} tg \alpha_{\text{н}} + \sqrt{(2v_{\text{н}}^2 \cos^2 \alpha_{\text{н}})^2 tg^2 \alpha_{\text{н}} + 4gh_{\text{н}} 2v_{\text{н}}^2 \cos^2 \alpha_{\text{н}}}}{2g}. \quad (2.53)$$

Исследования Б. М. Лебедева [63, 64] и А. П. Исаева [41, 42] доказывают, что струя воды, сходящая с основания дефлектора, при встрече с воздушным потоком сразу распадается на капли дождя разного диаметра. Сопротивление воздуха (ветра), действующее на каплю дождя в процессе ее полета, снижает радиус полива, а повышение скорости ветра усиливает данный процесс. Скорость ветра зависит от рельефа местности и высоты стояния растений, произрастающих на данном поле (рисунок 2.12).

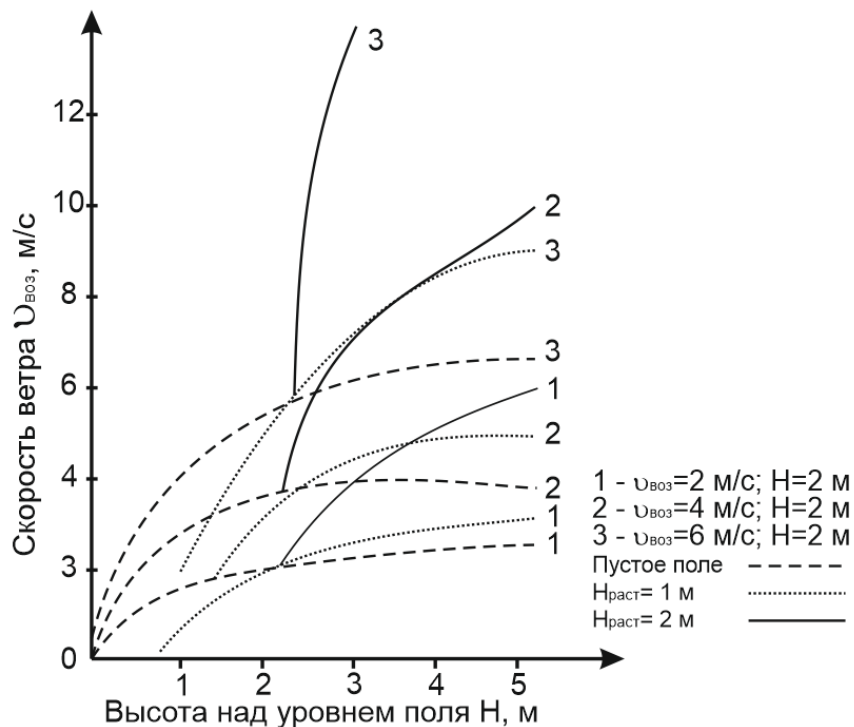


Рисунок 2.12 – Графическая зависимость изменения скорости ветра с учетом высоты стояния растений

Так как скорость ветра изменяется по высоте стояния растений по логарифмической зависимости [18], то скорость ветра  $v_{\text{дст}}$ , действующего на каплю дождя, можно определить по формуле:

$$v_{\text{дст}} = \frac{v_{\text{воз}}}{K_{\text{кар}}} \ln \frac{h_{\text{н}}}{h_{\text{раст}}}, \quad (2.54)$$

где  $K_{\text{кар}}$  – постоянная Кармана,  $K_{\text{кар}} = 0,38$  [18];

$h_{\text{раст}}$  – высота поливаемых растений, м.

Зная предварительную высоту установки дождевальной насадки над поверхностью поля, можно определить величину сопротивления воздуха  $R_x$ , действующего на каплю дождя:

$$R_x = K_{св} S_{пк} \frac{\rho_{воз} v_{воз}^2}{2}, \quad (2.55)$$

где  $K_{св}$  – коэффициент сопротивления воздуха;

$S_{пк}$  – площадь поперечного сечения капли дождя,  $m^2$ ;

$\rho_{воз}$  – плотность воздуха,  $kg/m^3$ ;

$v_{воз}$  – скорость движения воздуха (ветра),  $m/s$ .

Коэффициент сопротивления воздуха, действующего на каплю дождя в процессе ее полета, можно рассчитать по эмпирической зависимости [169]:

$$K_{св} = 0,25 \left( 1 - e^{-\frac{H_{вс}}{1000 d_{во}}} \right). \quad (2.56)$$

Площадь поперечного сечения капли дождя  $S_{пк}$ :

$$S_{пк} = 0,25 \pi D_{мед}^2, \quad (2.57)$$

где  $D_{мед}$  – медианный диаметр капли дождя,  $m$ .

Медианный диаметр капли дождя можно определить по зависимости, предложенной Г. Д. Пажи [112]:

$$D_{мед} = \frac{1,1 K_{всб}^{-0,3} K_{лап}^{0,07} \rho_{в}}{D_{во} \rho_{воз}}, \quad (2.58)$$

где  $K_{всб}$  – критерий Вейбера,  $K_{всб} = \frac{v_{н}^2 L_{лв} \rho_{в}}{F_{пн}}$ ;

$K_{лап}$  – критерий Лапласа,  $K_{лап} = \frac{L_{лв} \rho_{в} \tau_{в}}{\mu_{в}^2}$ .

В процессе полета капля дождя в результате воздействия воздуха (ветра), действующего в противоположном направлении траектории ее полета, теряет скорость и запас кинетической энергии, полученной на сходе с основания дефлек-

тора. Тогда коэффициент  $K_{\text{вв}}$ , учитывающий воздействие сопротивления воздуха (ветра) на каплю дождя, определим как отношение силы, обеспечивающей полет капли дождя, и сопротивления воздуха:

$$K_{\text{вв}} = \frac{F_{\text{кап}}}{R_x}, \quad (2.59)$$

где  $F_{\text{кап}}$  – сила, обеспечивающая полет капли дождя, Н:

$$F_{\text{кап}} = \frac{m_k v_H}{t_H}, \quad (2.60)$$

где  $m_k$  – масса капли дождя, кг;

$t_H$  – время схода капли дождя с основания дефлектора, с.

Выразив массу капли дождя через плотность воды и приняв допущение, что капля дождя представляет собой шар с медианным диаметром, определяемым по зависимости (2.58), используя зависимости (2.40 и (2.21), получим искомую силу, обеспечивающую полет капли дождя:

$$F_{\text{кап}} = \frac{\frac{4}{3} \rho_v \pi \frac{D_{\text{мед}}^3}{6} \psi_c \sqrt{2gH_{\text{вс}}}}{K_{\text{пр}} t_H}. \quad (2.61)$$

Подставив в зависимость (2.59) выражения (2.55) и (2.61), получим:

$$K_{\text{вв}} = \frac{4\rho_v \pi D_{\text{мед}}^3 \psi_c \sqrt{2gH_{\text{вс}}}}{9K_{\text{св}} S_{\text{пкп}} \rho_{\text{воз}} v_{\text{воз}}^2 K_{\text{пр}} t_H}. \quad (2.62)$$

Зная характер и величину воздействия воздуха (ветра) на полет капли дождя, используя зависимости (2.54) и (2.62), определим радиус полива  $R_{\text{пк}}$  с учетом данного влияния:

$$R_{\text{пк}} = \frac{(v_H - K_{\text{вв}} v_{\text{дст}})^2 \sin 2\alpha_H}{2g} + \frac{\sqrt{\left[2(v_H - K_{\text{вв}} v_{\text{дст}})^2 \cos^2 \alpha_H\right]^2 \text{tg}^2 \alpha_H + 8gh_H (v_H - K_{\text{вв}} v_{\text{дст}})^2 \cos^2 \alpha_H}}{2g}. \quad (2.63)$$



Анализ зависимости (2.63) показывает, что на величину дальности полета капли дождя наибольшее влияние оказывает ее начальная скорость при сходе с основания дефлектора. Тогда, воспользовавшись формулами (2.21) и (2.4), определим начальную скорость капли дождя для стационарного дефлектора:

$$v_{\text{н}} = \frac{\psi_{\text{с}} \sqrt{2gH_{\text{вс}}}}{K_{\text{пр}}} . \quad (2.64)$$

Для вращающегося дефлектора на каплю дождя, сходящую с основания дефлектора, действует дополнительная составляющая скорости, оцениваемая центробежным ускорением:

$$v'_{\text{н}} = v_{\text{н}} + \Delta v_{\text{н}} , \quad (2.65)$$

где  $\Delta v_{\text{н}}$  – дополнительная скорость, вызванная вращением дефлектора, м/с:

$$\Delta v_{\text{н}} = \omega_{\text{дк}} R_{\text{дк}} . \quad (2.66)$$

Воспользовавшись зависимостями (2.48) и (2.66), получим искомую начальную скорость полета капли дождя, сходящей с основания вращающегося дефлектора:

$$v'_{\text{н}} = \frac{\psi_{\text{с}} \sqrt{2gH_{\text{вс}}}}{K_{\text{пр}}} + \frac{H_{\text{вс}} g R_{\text{дк}}}{K_{\text{реб}} \psi_{\text{с}} \sqrt{2gH_{\text{вс}}} (K_{\text{пр}} R_{\text{дк}} \cos \alpha_{\text{абс}} - R_{\text{б}} \cos \beta_{\text{окр}})} . \quad (2.67)$$

Расчет, выполненный по формулам (2.64) и (2.67) (рисунок 2.13), доказывает, что вращение дефлектора дождевальной насадки способствует увеличению начальной скорости полета капли дождя, что в свою очередь приводит к повышению радиуса полива дождя (рисунок 2.14) по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью. Увеличение угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту снижает этот показатель (рисунок 2.15). Увеличение количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора повышает начальную скорость полета капли дождя (рисунок 2.16).

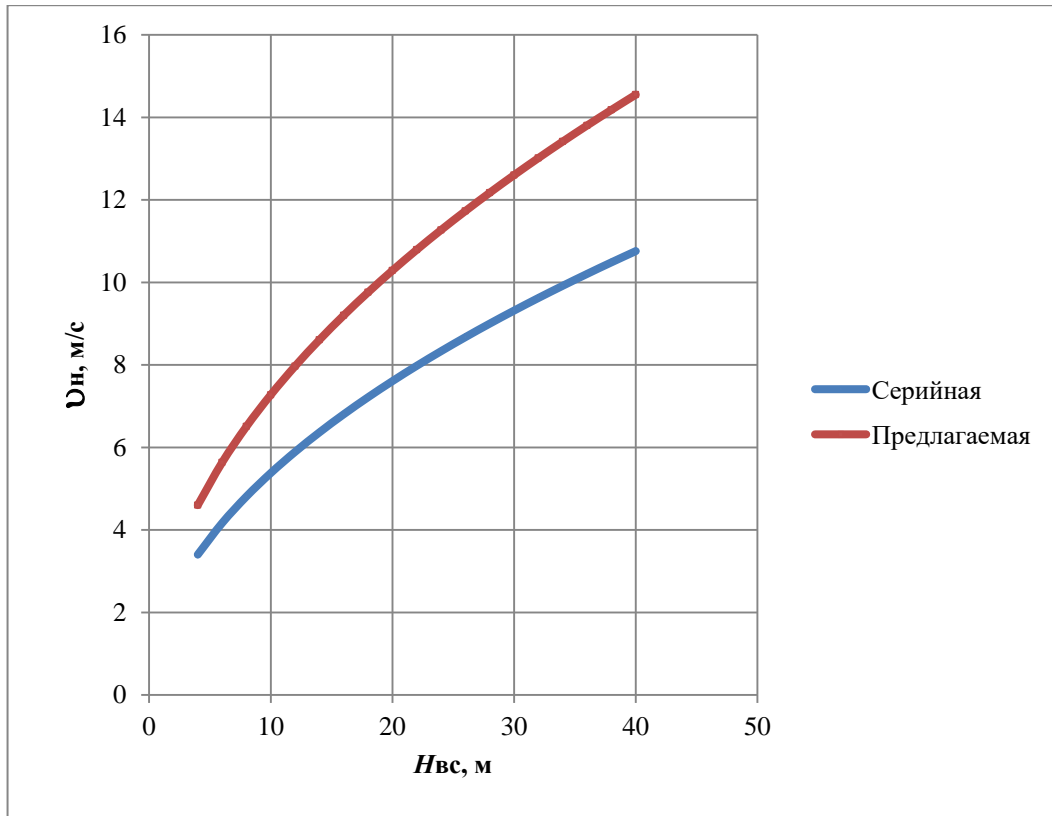


Рисунок 2.13 – Влияние напора воды на выходе из сопла дождевальной насадки на начальную скорость полета капли дождя

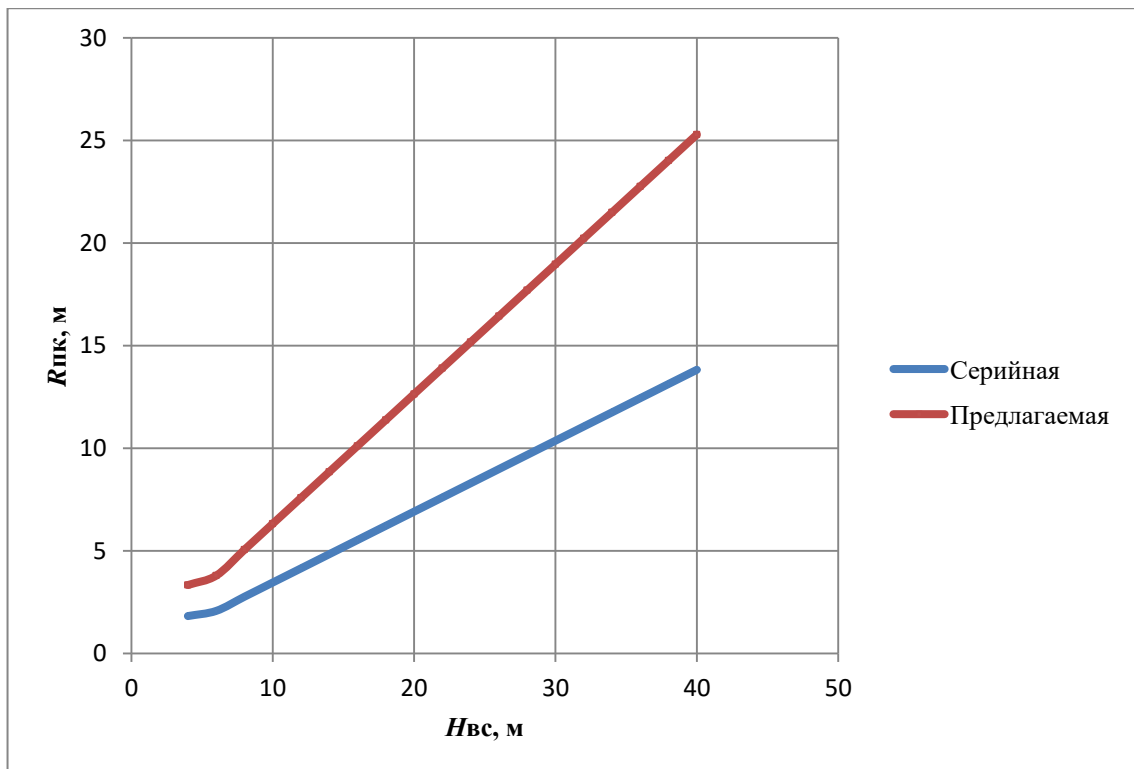


Рисунок 2.14 – Влияние напора воды на выходе из сопла дождевальной насадки на дальность полета капли дождя

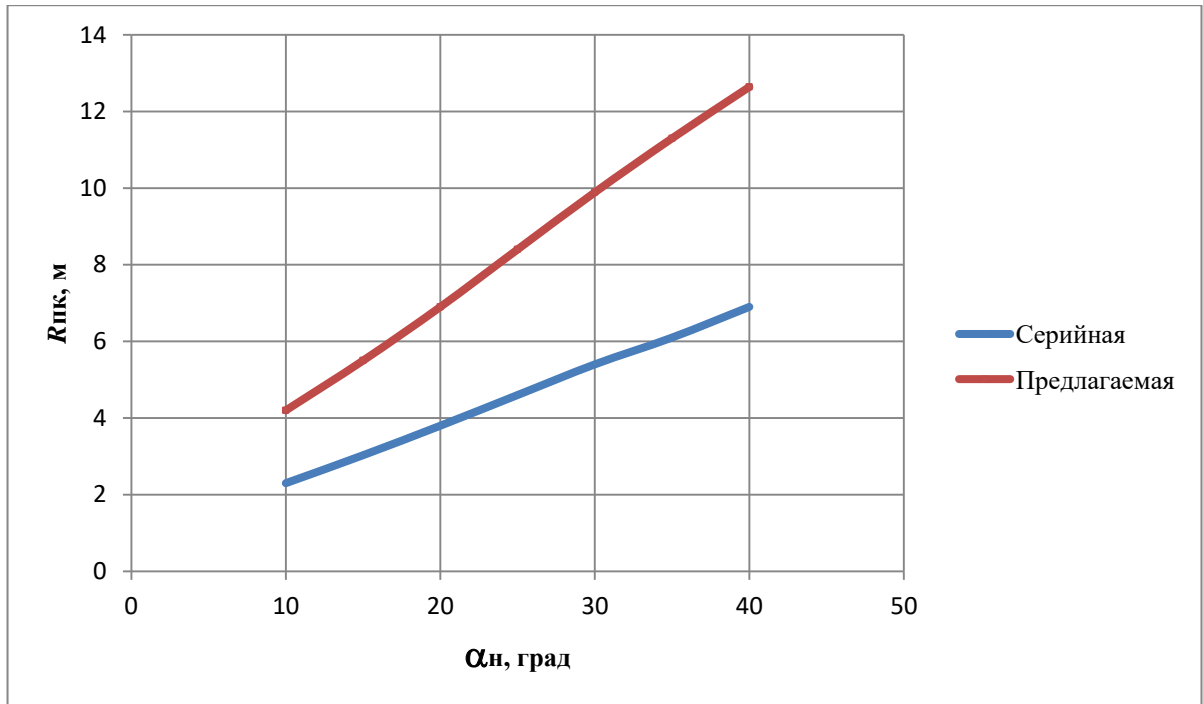


Рисунок 2.15 – Влияние угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту дождевальной насадки на ее дальность полета при напоре на выходе из сопла дождевальной насадки  $H_{вс} = 20$  м

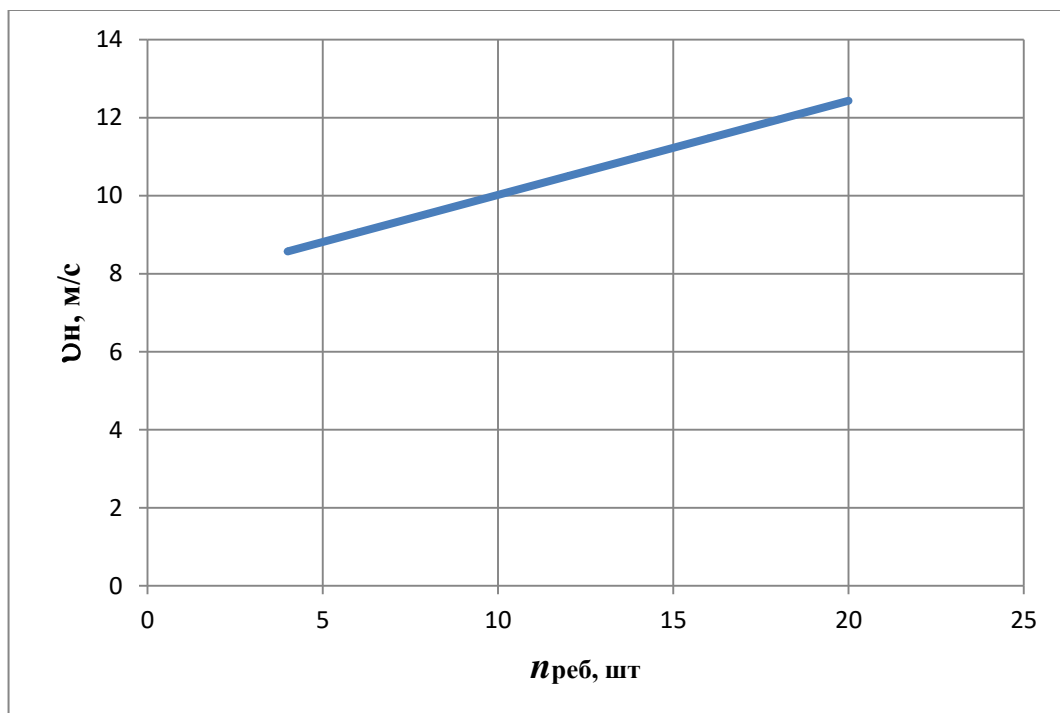


Рисунок 2.16 – Влияние количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора на начальную скорость полета капли дождя

Как показывает графическая зависимость (см. рисунок 2.15), увеличение угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту дождевальной насадки приводит к снижению дальности ее полета (радиуса полива), но при этом возрастает высота подъема капли дождя в вертикальной плоскости, что приводит к ее сносу ветром и негативно отражается на равномерности полива. Считается, что оптимальный угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту, при котором достигается наибольшая дальность полета капли дождя с учетом внешнего воздействия, –  $\alpha_n = 30^\circ \dots 32^\circ$  [37, 143, 185], однако уменьшение  $\alpha_n$  до  $20^\circ \dots 25^\circ$  обеспечивает повышение ветроустойчивости дождя, что так необходимо в условиях Саратовской области.

#### **2.4 Обоснование основных эксплуатационных параметров дождевальной машины, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором**

Интенсивность дождя является одним из главных показателей, характеризующим работу дождевальной машины, от которого зависит эффективность полива сельскохозяйственных культур. Среднюю интенсивность дождя  $\rho_{\text{ср}}$  (мм/мин), создаваемого дождевальной машиной, оснащенной дождевальными насадками можно, определить по формуле [18]:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{60Q_{\text{дм}}}{1000S_{\text{ор}}}, \quad (2.68)$$

где  $Q_{\text{дм}}$  – суммарный расход воды дождевальной машиной, м<sup>3</sup>/с;

$S_{\text{ор}}$  – площадь орошения дождевальной машиной, м<sup>2</sup>.

Суммарный расход воды дождевальной машиной  $Q_{\text{дм}}$  (м<sup>3</sup>/с) можно определить по зависимости [174]:

$$Q_{\text{дм}} = \frac{25h_{\text{сд}}}{9 \cdot 24T_{\text{дм}}} S_{\text{ор}}, \quad (2.69)$$

где  $h_{\text{сд}}$  – необходимый слой дождя, мм;

$T_{\text{дм}}$  – время работы дождевальной машины, сут.

Площадь орошения широкозахватной дождевальнoй машиной  $S_{ор}$  ( $m^2$ ), передвигающейся по кругу, определим по формуле [174]:

$$S_{ор} = \pi \left( L_{дм}^2 - \frac{L_{дн}^2}{4} \right) \cdot 10^{-4}, \quad (2.70)$$

где  $L_{дм}$  – длина дождевальнoй машины, м;

$L_{дн}$  – расстояние между устанавливаемыми дождевальными насадками, м.

Поливную норму  $m$  ( $m^3/га$ ), которую необходимо подать на 1 га орошаемого поля, можно рассчитать по формуле А. Н. Костякова [57]:

$$m = 100 h_{рсп} \rho_{поч} (\gamma_{ппв} - \gamma_{нпв}), \quad (2.71)$$

где  $h_{рсп}$  – величина расчетного слоя почвы, м;

$\rho_{поч}$  – плотность почвы,  $кг/м^3$ ;

$\gamma_{ппв}$  – предельная полевая влагоемкость, %;

$\gamma_{нпв}$  – влажность, соответствующая нижнему порогу влажности, %.

Используя данные исследований Ф. И. Колесникова [54], можно получить формулу для определения достoковой нормы полива для сои (эта сельскохозяйственная культура наиболее подвержена негативному воздействию дождя) с помощью дождевальных насадок, создающих дождь с диаметром капель  $d_k = 0,3 \dots 0,5$  мм:

$$m = C \frac{(d_{k \min}^{1,5} + 1) K_1 K_2 K_3 K_4 K_5}{\rho_{поч}^{b-1} (d_{k \max}^{1,5} + 1)}, \quad (2.72)$$

где  $C$  – постоянный коэффициент впитывания открытого участка поля [54],  $C = 44,5$ ;

$d_{k \min}$ ,  $d_{k \max}$  – соответственно минимальный и максимальный диаметры капель дождя, мм;

$K_1$  – коэффициент, учитывающий предполивную влажность почвы перед началом полива,  $K_1 = 1 + 0,0147(70 - \omega_{вп})$ ;

$\omega_{вп}$  – влажность почвы, % ее наименьшей влагоемкости;

$K_2$  – коэффициент, учитывающий величину уклона поверхности поля,  $K_2 = 1 - 15,1 i_{п}$ ;

$K_3$  – коэффициент, учитывающий плотность почвы перед поливом,  $K_3 = e^{n(\rho_k - \rho_n)}$  [1];

$n$  – степень прироста плотности почвы в процессе воздействия на нее дождя;

$\rho_n, \rho_k$  – соответственно начальная и конечная плотность почвы, кг/м<sup>3</sup>;

$K_4$  – коэффициент, учитывающий наличие почвенной корки;

$K_5$  – коэффициент, учитывающий рельеф орошаемого поля и степень покрытия растениями;

$b = a - 0,15 + 0,15(d_{k_{\max}} - 0,5)$  – показатель степени;

$a = 1,75$  – постоянный коэффициент, в зависимости от кривой впитывания воды в почву определяется при дождевом воздействии на орошаемое поле с каплями диаметром  $d_k = 1,5$  мм [1].

Запасы влаги в почве можно рассчитать по формуле [167]:

$$W_{\text{зап}} = 100H_{\text{сп}}\rho_{\text{поч}}(W_{\text{вп}} - W_{\text{оп}}), \quad (2.73)$$

где  $H_{\text{сп}}$  – рассматриваемый слой почвы, необходимый для нормального роста растений, м;

$W_{\text{вп}}, W_{\text{оп}}$  – влажность почвы в рассматриваемом слое  $H_{\text{сп}}$  соответственно в весенний и осенний периоды, %.

С целью повышения ветроустойчивости дождя, создаваемого дождевальными насадками, необходимо их устанавливать по учащенной схеме [18]. Тогда расстояние  $L_{\text{отв}}$  между отводами, на которых установлены дождевальные насадки:

$$L_{\text{отв}} = 1,42K_{\text{суж}}R_{\text{пк}}, \quad (2.74)$$

где  $K_{\text{суж}}$  – коэффициент сужения расстояния между дождевальными насадками;

$R_{\text{пк}}$  – радиус полива дождевальной насадкой, м.

Воспользовавшись рекомендациями [18, 67] и зависимостью (2.74), определили оптимальное расстояние между дождевальными насадками, имеющими стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, – 3,5 м. Для предлагаемых дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью данное расстояние составляет 4,0...4,5 м. Это позволяет на дождевальной машине «Каскад» («Кубань-ЛК1»), имеющей длину 518 м, установить на 32

меньше дождевальных насадок с вращающимся дефлектором по сравнению с дождевальными насадками, имеющими дефлектор с гладкой поверхностью.

Производительность  $\Pi_{\text{дм}}$  широкозахватной дождевальной машины кругового действия рассчитали по формуле:

$$\Pi_{\text{дм}} = 360Q_{\text{дм}}K_{\text{вс}}\frac{1}{t}, \quad (2.75)$$

где  $K_{\text{вс}}$  – коэффициент использования времени смены работы дождевальной машины.

Определив основные конструктивные параметры дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью и режимы работы дождевальной машины кругового действия, можно сделать основные выводы.

## 2.5 Выводы по главе

1. Для формирования дождя с высокими качественными показателями была разработана конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью (патент РФ на изобретение № 2615574 [123]).

2. Получено аналитическое выражение для определения радиуса полива (2.63), связывающее конструктивные параметры дождевальной насадки с физико-механическими свойствами воздушной среды.

3. Получены математические выражения, определяющие конструктивно-технологические параметры дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью:

- диаметр (2.16) и высота дефлектора (2.32);
- радиус кривизны конусообразной рифленой поверхности (2.38);
- расстояние от вершины дефлектора до выходного отверстия сопла дождевальной насадки (2.7);
- угловая скорость (2.48);
- радиус полива (2.63).

4. На основании проведенных исследований были установлены рациональные геометрические параметры дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью:

- 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  $n_{\text{реб}} = 6 \dots 12$ .



## 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1 Программа исследований

Основываясь на задачах проводимых исследований, а также выполненных теоретических исследованиях, разработана программа экспериментальных исследований, которой предусмотрено следующее:

1. Установить работоспособность дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

2. Проверить результаты теоретических исследований.

3. Получить экспериментальные зависимости в виде уравнений регрессии и графических трехмерных поверхностей, связывающих исследуемые факторы и критерии оптимизации.

4. Экспериментально обосновать влияния геометрических параметров дождевальных насадок с вращающимся и стационарным дефлекторами на качественные показатели создаваемого ими дождя (диаметр капель дождя, интенсивность дождя, равномерность полива, потери дождя на испарение и снос ветром).

5. Сравнить полученные экспериментальные результаты с теоретическими положениями.

6. Проверить эффективность применения дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью на дождевальной машине кругового действия.

Методика экспериментальных исследований включала в себя:

- разработку и изготовление опытного образца в натуральную величину дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью для дождевальной машины кругового действия;

- исследование влияния конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью на качественные показатели дождя;

- определение оптимальных конструктивных параметров дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью;
- сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими положениями.

### **3.2 Описание экспериментальной лабораторной установки**

Лабораторные исследования проводили в лаборатории современных систем полива и ландшафтного оборудования ФГБОУ ВО Вавиловский университет и УНПК «Агроцентр» в соответствии с требованиями СТО АИСТ 11.1-2010 [70].

Для проведения исследований была изготовлена экспериментальная установка (рисунок 3.1), включающая в себя емкость, которую пополняли водой из водяной системы университета посредством подающего трубопровода. К емкости с помощью трубопровода и запорной арматуры подсоединен электрический насос с прикрепленным к нему напорным трубопроводом, подающим поток воды в дождевальную насадку, установленную на стойке. Дождевальную насадку размещали на гибком трубопроводе с возможностью регулирования высоты относительно дневной поверхности. Перед стойкой с дождевальной насадкой рисовали окружности радиусом от 0 до 5 м с интервалом 0,5 м. От центра окружности, что соответствовало месту установки дождевальной насадки, исходили лучи с углом  $20^\circ$  относительно друг друга. На пересечении лучей с окружностями устанавливали мерные емкости – дождемеры ОМП-120, ГОСТ 27002-86, (рисунок 3.2).

Давление в напорном трубопроводе измеряли с помощью манометра ДМ8008-ВУф, ГОСТ 2405-88. Вода, вылитая на поверхность площадки в процессе исследований, сливалась в водосток университета. Расход израсходованной воды измеряли с помощью мерного бака вместимостью 60 л, а время его наполнения – секундомером СОСпр-26-2-010, ГОСТ 5270-79.



Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментальной установки с исследуемой дождевальными насадкой



Рисунок 3.2 – Разбивка участка для установки дождемеров

В ходе проведения лабораторных исследований определяли качественные показатели дождя, создаваемого серийными дождевальными насадками со стационарным дефлектором и гладкой поверхностью (ГК) (рисунок 3.3, *а*), Senniger i-Wob, имеющей вращающийся дефлектор (рисунок 3.3, *б*), а также предлагаемой дождевальной насадкой (рисунок 3.3, *в*), оснащенной вращающимся конусообразным дефлектором с рифленой поверхностью, имеющей 6, 12, 18 и 24 ребра (соответственно ВД-6, ВД-12, ВД-18 и ВД-24).

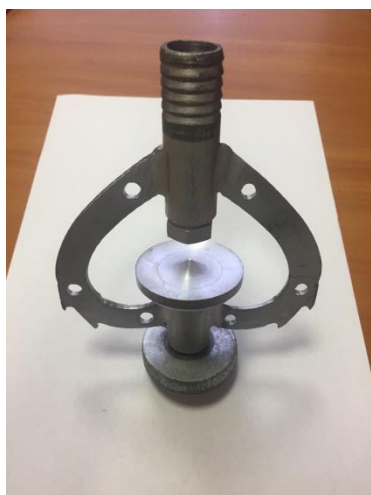
*a**б**в*

Рисунок 3.3 – Дождевальные насадки, использованные при лабораторных исследованиях:  
*a* – серийная со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью (ГК);  
*б* – серийная насадка Senniger i-Wob; *в* – экспериментальная дождевальная насадка, оснащенная вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью

В ходе исследований дождевальные насадки устанавливали на разную высоту относительно дневной поверхности. Замер высоты выполняли с помощью рулетки, ГОСТ 7502-98 (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Замер высоты установки дождевальной насадки относительно дневной поверхности

С учетом конструкции экспериментальной установки была разработана методика исследований качественных показателей дождя, создаваемого дождевальными насадками.

### 3.3 Методика лабораторных исследований качественных показателей дождя

Полив сельскохозяйственных культур необходимо выполнять дождем с требуемыми качественными показателями, которые были определены по следующей методике.

Сначала рассчитали расход воды  $q_{\text{дн}}$ , проходящей через дефлекторную насадку, по формуле

$$q_{\text{дн}} = \frac{V_{\text{мб}}}{t_{\text{зб}}}, \quad (3.1)$$

где  $V_{\text{мб}}$  – объем воды, поступающей в мерный бак, м<sup>3</sup>;

$t_{\text{зб}}$  – время, необходимое для полного заполнения водой мерного бака, с.

Радиус полива дождевальной насадкой определяли путем измерения расстояния от центра установки дождевальной насадки до точки падения крайних капель дождя. Замер осуществляли с помощью рулетки изготовленной (ГОСТ 7502-98), имеющей длину 20 м с ценой деления 1 мм.

Угловую скорость вращения дефлектора экспериментальной дождевальной насадки определяли посредством датчика бесконтактного контроля вращения БКВ-1К (ГОСТ 14254-2015), установленного на нижней опоре насадки (рисунок 3.5). На тыльной стороне основания дефлектора был прикреплен магнит для создания сигнала в датчике БКВ-1К, который, в свою очередь, регистрировали тензометрической установкой МІС-018, ГОСТ 9544-93, (рисунок 3.6, а).

Регистрацию сигнала, поступающего с датчика, осуществляли с помощью специализированного программного обеспечения Recorder, а визуализацию и обработку результатов эксперимента выполняли в программном продукте WinПОС (рисунок 3.6, б).

Частоту вращения дефлектора определяли следующим образом. На графике (см. рисунок 3.5, б) выбирали интервал времени 5 или 10 с и считали количество выполненных отсечек за данное время. Далее полученное число делили на 2, так как было установлено два магнита, обеспечивающих равномерное вращение дефлектора. Полученное число являлось частотой вращения дефлектора.

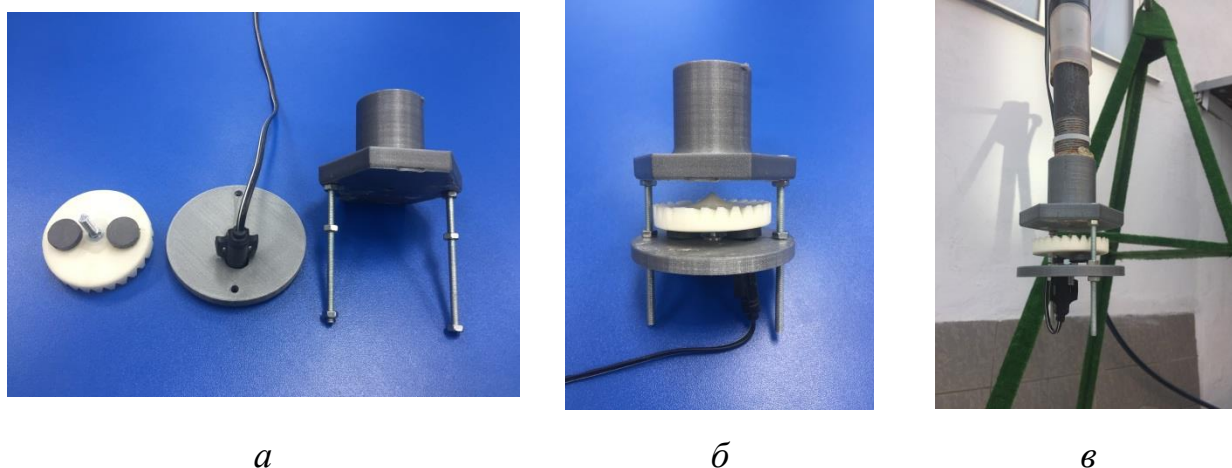


Рисунок 3.5 – Дождевальная насадка с установленным датчиком бесконтактного контроля вращения БКВ-1К: *а* – места крепления комплектующих датчика; *б* – общий вид дождевальной насадки с датчиком; *в* – дождевальная насадка на лабораторной установке

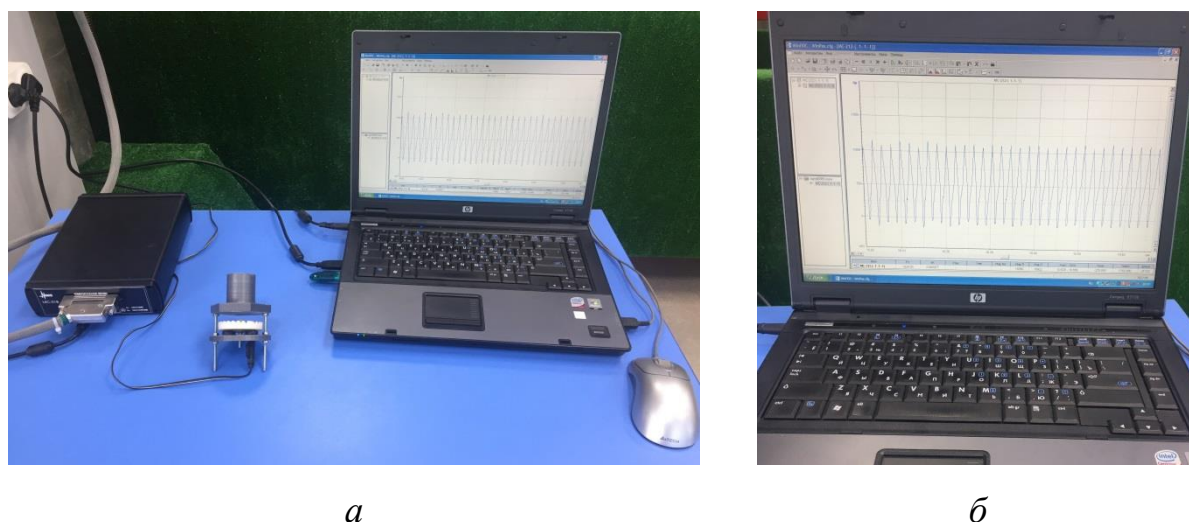


Рисунок 3.6 – Замер частоты вращения дефлектора: *а* – тензометрический комплекс МІС-018; *б* – вид записи работы датчика БКВ-1К

Зная частоту вращения дефлектора, угловую скорость  $\omega_{\text{дк}}$  рассчитывали по формуле:

$$\omega_{\text{дк}} = \frac{\pi n_{\text{вр}}}{30}, \quad (3.2)$$

где  $n_{\text{вр}}$  – частота вращения дефлектора,  $\text{с}^{-1}$ .

Диаметр капли дождя определяли в трех местах: в начале формирования дождевого облака, в середине и в конце его полета. Замер капли дождя осуществляли с помощью специализированного прибора каплеуловителя, обеспечивающего улавливание капель дождя. Для этого его помещали в дождевое облако (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Замер диаметра капель дождя

Капли дождя попадали в мерное окно каплеуловителя КР-2, в котором предварительно была установлена фильтровальная бумага. Замер капель выполняли на высоте, равной высоте основных сельскохозяйственных растений. По полученному отпечатку капли дождя на фильтровальной бумаге определяли истинный диаметр капли дождя с применением следующих формул.

Диаметр отпечатка одной капли дождя  $d_{\text{окд}}$ :

$$d_{\text{окд}} = \frac{d_{\text{ок1}} + d_{\text{ок2}}}{2}, \quad (3.3)$$

где  $d_{\text{ок1}}$ ,  $d_{\text{ок2}}$  – соответственно диаметры отпечатка капли на фильтровальной бумаге в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, мм.

Для точности определения рассчитывали средний диаметр отпечатка одной капли дождя по формуле:

$$d_{\text{окср}} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{k=1}^{n_k} d_{\text{окд}}^3}{n_k}} \quad (3.4)$$

где  $d_{\text{окд}}$  – диаметр отпечатка капли на фильтровальной бумаге, мм;

$n_k$  – количество измеренных капель.

Определив средний диаметр капли дождя на фильтровальной бумаге, производили его пересчет в действительное значение с помощью тарировочного графика.

Одним из главных качественных показателей дождя является его интенсивность. Ее определяли с помощью дождемеров, установленных по окружности радиусом от 0 м, что соответствовало месту установки дождевальной насадки, до 5 м с интервалом 0,5 м. Дождемеры устанавливали на пересечении лучей, выходящих из центра окружности и расположенных под углом  $20^\circ$  относительно друг друга (см. рисунок 3.2).

Интенсивность дождя устанавливали по объему воды, находящейся в дождемере, который в свою очередь определяли методом взвешивания с помощью весов SF-400C, имеющих точность 0,01 г (рисунок 3.8). Результаты всех замеров заносили в журнал.



Рисунок 3.8 – Замер объема воды в дождемерах

Поскольку интенсивность дождя  $\rho_i$ , мм/мин, оценивали по объему воды, вылитой на определенной площади за определенное время, то ее величину рассчитывали по формуле:

$$\rho_i = \frac{10V_i}{S_{д_i} t_{д_i}}, \quad (3.5)$$

где  $V_i$  – объем воды в  $i$ -м дождемере,  $\text{см}^3$ ;

$S_{д_i}$  – площадь полива,  $\text{см}^2$ ;

$t_{д_i}$  – время, затраченное на заполнение водой  $i$ -го дождемера, мин.



Нормативная интенсивность  $\rho_d$  дождя в  $i$ -й точке [3]:

$$\rho_d = \frac{\rho_i}{\rho_c}, \quad (3.6)$$

где  $\rho_i$  – интенсивность дождя в  $i$ -й точке радиуса полива, мм/мин;

$\rho_c$  – средняя интенсивность дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадки, мм/мин.

Интенсивность дождя в  $i$ -й точке радиуса полива:

$$\rho_i = \frac{10V_i}{S_{\text{по}} t_{\text{исп}}}, \quad (3.7)$$

где  $V_i$  – объем воды в  $i$ -м дождемере, мм<sup>3</sup>;

$S_{\text{по}}$  – площадь приемного отверстия дождемера, см<sup>2</sup>;

$t_{\text{исп}}$  – время испытания, мин.

Скорость ветра, оказывающего влияние на характер формирования капель дождя и радиус полива, в процессе проведения исследований определяли с помощью анемометра Testo 425 (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Замер скорости ветра с помощью прибора Testo 425

Согласно рассмотренной методике проведения замеров показателей, характеризующих работу дождевальной насадки, и качественных показателей дождя была сформирована таблица 3.1 включающая в себя необходимые приборы и оборудование.

**Таблица 3.1 – Перечень оборудования и приборов, обеспечивающих замер показателей работы дождевальной насадки и качественных параметров дождя**

№ п/п	Замеряемый параметр	Оборудование
1	Радиус полива Высота установки дождевальной насадки относительно поверхности поля	Рулетка, ГОСТ 7502-98
2	Давление воды в трубопроводе дождевальной машины (дождевальной насадки)	Манометр ДМ8008-ВУф, ГОСТ 2405-88
3	Расход дождевальной насадки	Дождемер ОМП-120, ГОСТ 27002-86 Секундомер СОСпр-2б-2-010, ГОСТ 5270-79
4	Угловая скорость дефлектора	Датчик бесконтактного контроля вращения БКВ-1К, ГОСТ 14254-2015 Тензометрическая установка МИС-018, ГОСТ 9544-93
5	Диаметр капель дождя	Каплеуловитель КР-2 Фильтровальная бумага, ГОСТ 12026-76
6	Интенсивность дождя	Дождемер ОМП-120, ГОСТ 27002-86 Весы SF-400С
7	Скорость ветра и температура воздуха	Анемометр Testo 425, ГОСТ Р 52931-2008 (внесен в Госреестр средств измерения РФ № 17273-11)

На основе методики определения качественных показателей дождя при проведении лабораторных исследований была разработана методика проведения полевых исследований.

### **3.4 Методика полевых исследований качественных показателей дождя, создаваемого дождевальной машиной кругового действия**

Полевые исследования качественных показателей дождя, создаваемого дождевальной машиной кругового действия «Каскад» («Кубань-ЛК1»), проводили согласно требований СТО АИСТ 11.1-2010 «Машины и установки дождевальные».

Методы оценки функциональных показателей» [70] и РД 70.11.1-89 «Машины и установки дождевальные. Программа и методика испытаний» [132].

Дождевальные машины длиной 518 м с длиной пролета 48,7 м были установлены в Саратовской области на полях УНПО «Поволжье» (п. Степное, Энгельсский район) и ООО «Наше дело» (с. Ленинское, Энгельсский район).

Дождевальные машины были оснащены серийными дождевальными насадками Senniger i-Wob и Саратовского ГАУ, а также экспериментальными дождевальными насадками, имеющими вращающийся дефлектор конусообразной формы с рифленой поверхностью. Подачу воды в дождевальные машины осуществляли от насосных станций, создающих рабочее давление на входе в ДМ 0,4 МПа, которое определяли с помощью манометра (ГОСТ 2405-88), расположенном на трубопроводе машины.

По всей длине трубопровода дождевальной машины были установлены дождемеры в три луча. Угол между лучами составлял  $3^\circ$  (рисунок 3.10), а расстояние между дождемерами – 1,5 м [23].

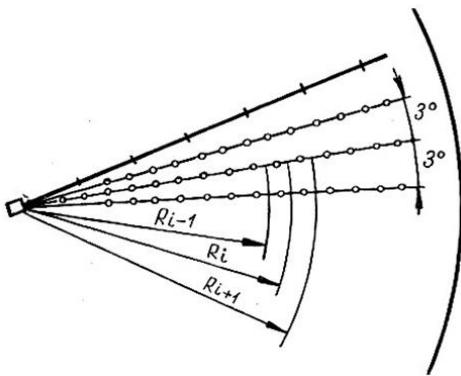


Рисунок 3.10 – Схема расстановки дождемеров для оценки равномерности полива ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1») и радиусов для определения площади полива под  $i$ -м дождемером

Основные показатели климатических условий места проведения полевого эксперимента фиксировали на расстоянии 8 м от дождевальной машины. Осуществляли замеры следующих показателей:

- температура воздуха и воды поступающей в дождевальную машину с помощью термометра ГОСТ 112-78;
- влажность воздуха с помощью гигрометра ГОСТ 8.758-2011;
- скорость ветра с помощью прибора Testo 425.

Замер всех параметров выполняли в трехкратной повторности.

Рабочую скорость движения дождевальной машины  $v_{\text{дм}}$  определяли по формуле:

$$v_{\text{дм}} = \frac{L_{\text{дм}}}{t_{\text{дм}}}, \quad (3.8)$$

где  $L_{\text{дм}}$  – длина пути, пройденного дождевальной машиной за время  $t_{\text{дм}}$ , м.

Для повышения равномерности полива, согласно требованиям производителя дождевальной машины и рекомендациям [34, 162], на ней были установлены дождевальные насадки, имеющие диаметр выходного отверстия сопла 3–15 мм.

Расход воды дождевальной насадкой определяли объемным методом. Для этого в мерный бак объемом 50 л помещали шланг диаметром 80 мм, который был надет на дождевальную насадку. Бак заполняли водой, выливаемой из дождевальной насадки за время, которое фиксировали с помощью секундомера СОСпр-26-2-010, ГОСТ 5270-79.

Расход воды дождевальной насадки по  $i$ -му дождемеру ( $q_i$ ,  $\text{дм}^3/\text{с}$ ) определяли по формуле:

$$q_i = \frac{V_i}{t_i}, \quad (3.9)$$

где  $V_i$  – объем воды в  $i$ -м дождемере,  $\text{дм}^3$ ;

$t_i$  – продолжительность повторности опыта при  $i$ -й дождевальной насадке, с.

Общий расход воды  $Q_{\text{ДМ}}$  дождевальной машины «Каскад»:

$$Q_{\text{М}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{н}}} q_i, \quad (3.10)$$

где  $n_{\text{н}}$  – количество дождевальных насадок, установленных ДМ.

После окончания работы дождевальной машины по всей длине замеряли объемы воды, находящейся в дождемерах, с помощью мерных цилиндров ГОСТ 1770-74. Точность измерений  $\pm 5$  мл. Результаты заносили в заранее подготовленный масштабный план расстановки дождемеров вдоль трубопровода дождевальной машины.

Радиус полива  $R$  определяли с погрешностью  $\pm 1$  см по выпавшим крайним каплям дождя, используя зависимость:

$$R = \sqrt{\frac{S_{\text{пол}}}{\pi}}. \quad (3.11)$$

где  $S_{\text{пол}}$  – площадь полива позиции без перекрытия,  $\text{м}^2$ .

Интенсивность дождя, созданного дождевальными насадками с вращающимся дефлектором, по  $i$ -му дождемеру ( $\rho_i$  мм/мин) вычисляли по формуле (3.5).

Выпавший слой осадков  $h_i$  для  $i$ -го дождемера:

$$h_i = \frac{10V_i}{S_{\text{д}_i} n_{\text{п}}}, \quad (3.12)$$

где  $n_{\text{п}}$  – число проходов дождевальной машины.

Интенсивность дождя, создаваемого дождевальной насадкой в процессе работы, определяли по всей площади орошения, которую можно представить в виде схемы (рисунок 3.11). Среднюю интенсивность дождя рассчитывали как среднеарифметическую величину из всех точек замера.

При поливе дождевальной машиной «Каскад» («Кубань-ЛК1») коэффициент эффективного полива  $K_{\text{эф}}$  определяли по формуле [18, 58, 132]:

$$K_{\text{эф}} = \frac{S_{\text{эф}}}{S_{\text{об}}}, \quad (3.13)$$

где  $S_{\text{эф}}$  – площадь эффективного полива,  $\text{м}^2$ ;

$S_{\text{об}}$  – общая поливная площадь,  $\text{м}^2$ .

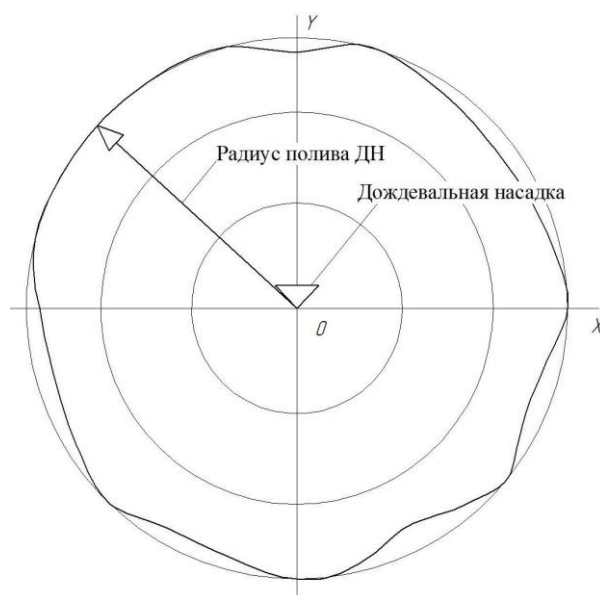


Рисунок 3.11 – Схема для определения площади полива дождевальной насадкой

Коэффициент недостаточного полива  $K_{\text{нед}}$  вычисляли по формуле [8, 18]:

$$K_{\text{нед}} = \frac{S_{\text{нед}}}{S_{\text{об}}}, \quad (3.14)$$

где  $S_{\text{нед}}$  – площадь недостаточного полива,  $\text{м}^2$ .

Коэффициент избыточного полива  $K_{\text{изб}}$  [18]:

$$K_{\text{изб}} = \frac{S_{\text{изб}}}{S_{\text{об}}}, \quad (3.15)$$

где  $S_{\text{изб}}$  – площадь избыточного полива,  $\text{м}^2$ .

Расход воды по дождемерам  $Q_{\text{д}}$ ,  $\text{дм}^3/\text{с}$ :

$$Q_{\text{д}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}_i}, \quad (3.16)$$

где  $Q_{\text{к}_i}$  – расход воды дождемера  $i$ -го класса,  $\text{дм}^3/\text{с}$ :

$$Q_{\text{к}_i} = \frac{F_i P_i n_i'}{60}, \quad (3.17)$$

где  $F_i$  – площадь, приходящаяся на  $i$ -й дождемер,  $\text{м}^2$ ;

$P_i$  – среднее арифметическое значение  $i$ -го класса,  $\text{мм}/\text{мин}$ ;

$n_i'$  – число дождемеров в классе.

Суммарный расход воды дождевальной машины  $Q_{\text{дм}}$ :

$$Q_{\text{дм}} = \sum_{i=1}^{n_z} Q_{\text{к}_i}, \quad (3.18)$$

где  $n_d$  – принятое число классов.

Потери дождя на испарение и снос ветром  $Q_{\text{в}}$  определяли по разнице между объемом воды, поданным в дождевальную машину, и объемом воды, собранным на поверхности поля [125, 148, 150]:

$$Q_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{к}_i} - Q_{\text{дм}}}{Q_{\text{дм}}}. \quad (3.19)$$

Скорость падения капель дождя и их воздействие на почву оценивали по методике, предложенной А. П. Исаевым [41], которая предусматривает использование результатов исследований диаметра капель дождя, создаваемого дождевальной насадкой, и высоты их падения.

Коэффициент земельного использования площади орошаемого участка  $K_{\text{зи}}$  вычисляли по формуле:

$$K_{\text{зи}} = \frac{S_{\text{орсх}}}{S_{\text{орвс}}}, \quad (3.20)$$

где  $S_{\text{орсх}}$  – площадь орошаемого участка, занятого сельскохозяйственными культурами, га;

$S_{\text{орвс}}$  – общая площадь орошаемого участка, включая всю внутривосхозяйственную сеть, га.

### 3.5 Программа и методика экспериментальных исследований

Для решения задач, поставленных в соответствии с проведенными теоретическими исследованиями, программа экспериментальных исследований включала в себя серию двухфакторных экспериментов, которые обеспечивали оценку влияния конструктивных параметров дождевальной насадки на критерии оптимизации:

- напор и расход воды, выходящей из сопла дождевальной насадки;
- диаметр выходного отверстия сопла насадки;
- угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту.

При проведении экспериментальных исследований дождевальная насадка работала при разном давлении (фактор **A**) воды, выходящей из сопла насадки, который изменяли по четырем значениям с помощью насоса. Диаметр выходного отверстия сопла дождевальной насадки (фактор **B**) изменяли по 15 значениям. Критериями оптимизации в двухфакторном эксперименте являлись расход воды  $Q_n$  (л/с) и радиус полива  $R_n$  (м).

План двухфакторного эксперимента приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – План двухфакторного эксперимента

№	Уровень факторов				Критерии оптимизации	
	<b>A</b> (давление воды на выходе из сопла насадки)		<b>B</b> (диаметр выходного отверстия сопла насадки)		расход воды насадки $Q_n$ , л/с	радиус полива $R_n$ , м
	№	МПа	№	мм		
<b>I</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
1	1	0,1	1	3	$Q_{n1}$	$R_{n1}$
2	1	0,1	2	4	$Q_{n2}$	$R_{n2}$
3	1	0,1	3	5	$Q_{n3}$	$R_{n3}$
4	1	0,1	4	6	$Q_{n4}$	$R_{n4}$
5	1	0,1	5	7	$Q_{n5}$	$R_{n5}$
6	1	0,1	6	8	$Q_{n6}$	$R_{n6}$
7	1	0,1	7	9	$Q_{n7}$	$R_{n7}$
8	1	0,1	8	10	$Q_{n8}$	$R_{n8}$
9	1	0,1	9	11	$Q_{n9}$	$R_{n9}$
10	1	0,1	10	12	$Q_{n10}$	$R_{n10}$
11	1	0,1	11	13	$Q_{n11}$	$R_{n11}$
12	1	0,1	12	14	$Q_{n12}$	$R_{n12}$
13	1	0,1	13	15	$Q_{n13}$	$R_{n13}$
14	2	0,2	1	3	$Q_{n14}$	$R_{n14}$
15	2	0,2	2	4	$Q_{n15}$	$R_{n15}$
16	2	0,2	3	5	$Q_{n16}$	$R_{n16}$
17	2	0,2	4	6	$Q_{n17}$	$R_{n17}$
18	2	0,2	5	7	$Q_{n18}$	$R_{n18}$
19	2	0,2	6	8	$Q_{n19}$	$R_{n19}$
20	2	0,2	7	9	$Q_{n20}$	$R_{n20}$
21	2	0,2	8	10	$Q_{n21}$	$R_{n21}$
22	2	0,2	9	11	$Q_{n22}$	$R_{n22}$
23	2	0,2	10	12	$Q_{n23}$	$R_{n23}$



1	2	3	4	5	6	7
24	2	0,2	11	13	$Q_{н24}$	$R_{п24}$
25	2	0,2	12	14	$Q_{н25}$	$R_{п25}$
26	2	0,2	13	15	$Q_{н26}$	$R_{п26}$
27	3	0,3	1	3	$Q_{н27}$	$R_{п27}$
28	3	0,3	2	4	$Q_{н28}$	$R_{п28}$
29	3	0,3	3	5	$Q_{н29}$	$R_{п29}$
30	3	0,3	4	6	$Q_{н30}$	$R_{п30}$
31	3	0,3	5	7	$Q_{н31}$	$R_{п31}$
32	3	0,3	6	8	$Q_{н32}$	$R_{п32}$
33	3	0,3	7	9	$Q_{н33}$	$R_{п33}$
34	3	0,3	8	10	$Q_{н34}$	$R_{п34}$
35	3	0,3	9	11	$Q_{н35}$	$R_{п35}$
36	3	0,3	10	12	$Q_{н36}$	$R_{п36}$
37	3	0,3	11	13	$Q_{н37}$	$R_{п37}$
38	3	0,3	12	14	$Q_{н38}$	$R_{п38}$
39	3	0,3	13	15	$Q_{н39}$	$R_{п39}$
40	4	0,4	1	3	$Q_{н40}$	$R_{п40}$
41	4	0,4	2	4	$Q_{н41}$	$R_{п41}$
42	4	0,4	3	5	$Q_{н42}$	$R_{п42}$
43	4	0,4	4	6	$Q_{н43}$	$R_{п43}$
44	4	0,4	5	7	$Q_{н44}$	$R_{п44}$
45	4	0,4	6	8	$Q_{н45}$	$R_{п45}$
46	4	0,4	7	9	$Q_{н46}$	$R_{п46}$
47	4	0,4	8	10	$Q_{н47}$	$R_{п47}$
48	4	0,4	9	11	$Q_{н48}$	$R_{п48}$
49	4	0,4	10	12	$Q_{н49}$	$R_{п49}$
50	4	0,4	11	13	$Q_{н50}$	$R_{п50}$
51	4	0,4	12	14	$Q_{н51}$	$R_{п51}$
52	4	0,4	13	15	$Q_{н52}$	$R_{п52}$

В ходе второго двухфакторного эксперимента изучали влияние давления воды, выходящей из сопла дождевальной насадки, и угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту. Угол наклона задавали по четырём значениям 20°; 24°; 28°; 32°.

Полученные результаты проведенного эксперимента обрабатывали с помощью специализированных программных продуктов Microsoft Excel и Statistica. Было получено уравнение регрессии вида:

$$Y = -x_1 A^2 + x_2 AB - x_3 B^2 + x_4 B + x_5 A + x_6, \quad (3.21)$$

где  $Y$  – критерии оптимизации – расход воды дождевальной насадки  $Q_n$  (л/с) и радиус полива дождевальной насадкой  $R_n$  (м).;

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  – коэффициенты регрессии;

$A$  (фактор) – давление воды на выходе из сопла насадки, МПа;

$B$  (фактор) – диаметр выходного отверстия сопла насадки, мм.

Переменная  $Y$  описывает рассматриваемый процесс при использовании коэффициентов  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ .

Проверка значимости уравнения регрессии состояла из следующих этапов [2, 66, 73].

Сначала вычислили остаточную дисперсию по формуле:

$$\bar{S}_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - p - 1}. \quad (3.22)$$

Далее полученный результат сравнили с дисперсией среднего  $S_{\text{ост}}$  при помощи  $F_k$ -критерия Фишера:

$$F_k = \frac{\bar{S}_y^2}{\bar{S}_{\text{ост}}^2}. \quad (3.23)$$

Значимость коэффициентов регрессии  $a_i$  проверили по критерию Стьюдента  $\tau$ :

$$\tau = \frac{A_1 - A_2}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}}, \quad (3.24)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – среднее арифметическое данных сравниваемых множеств значений;

$a_1$  и  $a_2$  – средние ошибки средних арифметических величин.

Погрешность коэффициента регрессии:

$$\bar{S}_{A_i} = \sqrt{\bar{S}_{\text{ост}}^2 C_{ii}}. \quad (3.25)$$

Для доверительного интервала коэффициента регрессии был использован закрытый интервал, определяющий наибольшее и наименьшее значения коэффициента  $a_i$ :

$$a_i \in [A_i - \tau^T \bar{O}_D; A_i + \tau^T \bar{O}_D]. \quad (3.26)$$

где  $a_i$  – значение коэффициента регрессии в генеральной совокупности.

Для проводимых однофакторных экспериментов при доказательстве правильности их выполнения и представленных результатов были использованы основные методы математической статистики и теории случайных ошибок [11, 19, 20, 23, 24, 38, 69, 74, 91, 128, 179]. Данные, полученные в результате лабораторных и полевых исследований, обрабатывали методами математической статистики в следующей последовательности.

1. Рассчитывали среднюю величину распределения  $\bar{X}$ :

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n_{\text{изм}}}, \quad (3.27)$$

где  $X_i$  – результат отдельного измерения;

$n_{\text{изм}}$  – количество измерений.

2. Определяли дисперсию распределения  $D$ :

$$D = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n_{\text{изм}} - 1}. \quad (3.28)$$

3. Рассчитывали среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\text{от}}$ :

$$\sigma_{\text{от}} = D^{0,5}. \quad (3.29)$$

4. Определяли коэффициент вариации КВ:

$$\text{КВ} = \frac{100\sigma_{\text{от}}}{\bar{X}}. \quad (3.30)$$

5. Оценивали точность опыта  $P_{\text{оп}}$ :

$$P_{\text{оп}} = \frac{100\sigma_{\text{от}}}{\bar{X}n_{\text{изм}}^{0,5}}. \quad (3.31)$$

Для определения корреляционной и статистической зависимости между переменными  $X$  и  $Y$  проводили  $n_{\text{изм}}$  парных наблюдений и вычисляли коэффициент парной корреляции. Коэффициенты регрессии рассчитывали методом наименьших квадратов:

$$(Y_i - Y_p)^2 = \min, \quad (3.32)$$

где  $Y_i$  – фактическое значение зависимого показателя;

$Y_p$  – расчетное значение, найденное из уравнения регрессии.

Относительную величину радиуса полива, которому соответствует максимальная величина эпюры распределения дождя, определяли по формуле:

$$\left(\frac{X_i}{R}\right)_{\max} = \frac{\gamma - 1}{(\gamma + \eta + 2)}. \quad (3.33)$$

Параметры  $\gamma$  и  $\eta$  связаны со средней величиной  $X$  и среднеквадратичной величиной распределения  $\sigma_c$  зависимостями:

$$\eta = \left(\frac{1 - X}{\sigma_c^2}\right) [X(1 - X) - \sigma_c^2], \quad (3.34)$$

$$\gamma = \frac{X\eta}{1 - X}. \quad (3.35)$$

Остаточная дисперсия:

$$D_{\text{ост}}^2 = \sum \frac{(Y_{\phi} - Y_p)^2}{N - V_{\phi} - 1}, \quad (3.36)$$

где  $V_{\phi}$  – количество факторов.

Оценку адекватности уравнения регрессии проводили по критерию Фишера:

$$F = \frac{D^2}{D_{\text{ост}}^2}. \quad (3.37)$$

Коэффициент множественной корреляции  $R_T$ :

$$R_T = \sqrt{1 - \frac{D_{\text{ост}}^2}{D^2}}. \quad (3.38)$$

Полученные данные полевых и лабораторных исследований были представлены в виде графических зависимостей с применением программных продуктов Microsoft Excel и Statistica и обработаны с помощью встроенного математического аппарата [9, 68, 191].

### 3.6 Последовательность проведения опытов

Опыты выполняли в следующей последовательности:

1. Подготовка к проведению эксперимента. Установка дождевальной насадки с заданными геометрическими параметрами на трубопровод дождевальной машины. Замер температуры и скорости ветра. Установка дождемеров (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Подготовка дождевальной машины к работе

2. Включение дождевальной машины.
3. Выполнение рабочего процесса дождевальной машины (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Дождевальная машина в работе с установленными мерными емкостями

4. Замер диаметра капель дождя, радиуса полива, интенсивности дождя.
5. Остановка дождевальной машины.
6. Определение качественных показателей дождя и критериев оптимизации.
7. Заполнение журнала эксперимента.
8. Обработка результатов эксперимента.

По полученным данным проведенных исследований определяли технико-экономические показатели применения на дождевальной машине кругового действия дождевальных насадок в вращающемся дефлекторе в сравнении с серийными дождевальными насадками.

### **3.7 Выводы по главе**

1. На основании проведенных теоретических исследований был разработан и изготовлен опытный образец дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

2. Разработаны программа и методика экспериментальных исследований дождевальной машины кругового действия, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Результаты лабораторных исследований

#### 4.1.1 Определение расходно-напорной характеристики дождевальной насадки

В ходе проведения лабораторных исследований было определено влияние диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки, который изменяли от 3 до 15 мм с шагом 1 мм, и давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки, которое изменяли от 0,1 до 0,4 МПа с интервалом 0,05 МПа, на величину расхода воды. Результаты исследований представлены на графических зависимостях (рисунки 4.1 и 4.2).

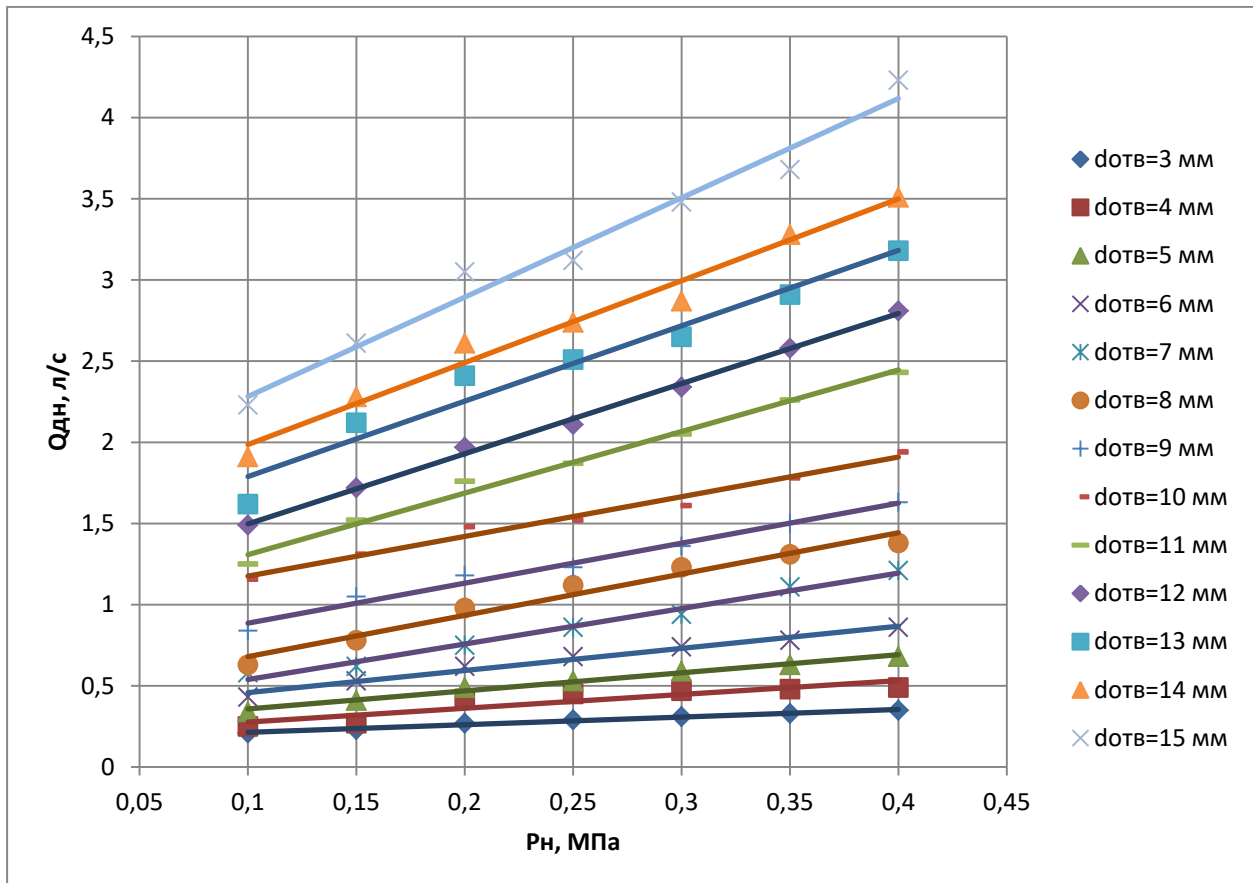


Рисунок 4.1 – Влияние давления воды  $P_n$ , МПа, и диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки  $d_{отв}$ , мм, на расход дождевальной насадки  $Q_{дн}$ , л/с



Были получены аппроксимационные зависимости, отражающие влияние давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки и величины диаметра сопла на расход воды:

$d_{\text{отв}} = 3 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 0,4714P_{\text{н}} + 0,1664$	$R^2 = 0,9864$
$d_{\text{отв}} = 4 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 0,85P_{\text{н}} + 0,1918$	$R^2 = 0,8214$
$d_{\text{отв}} = 5 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 1,1143P_{\text{н}} + 0,2457$	$R^2 = 0,988$
$d_{\text{отв}} = 6 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 1,3643P_{\text{н}} + 0,3218$	$R^2 = 0,983$
$d_{\text{отв}} = 7 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 2,1857P_{\text{н}} + 0,3207$	$R^2 = 0,9861$
$d_{\text{отв}} = 8 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 2,5429P_{\text{н}} + 0,4257$	$R^2 = 0,969$
$d_{\text{отв}} = 9 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 2,4643P_{\text{н}} + 0,6396$	$R^2 = 0,9836$
$d_{\text{отв}} = 10 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 2,4443P_{\text{н}} + 0,9312$	$R^2 = 0,9798$
$d_{\text{отв}} = 11 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 3,7929P_{\text{н}} + 0,9289$	$R^2 = 0,9904$
$d_{\text{отв}} = 12 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 4,3214P_{\text{н}} + 1,0654$	$R^2 = 0,9971$
$d_{\text{отв}} = 13 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 4,6429P_{\text{н}} + 1,325$	$R^2 = 0,9559$
$d_{\text{отв}} = 14 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 5,0429P_{\text{н}} + 1,4821$	$R^2 = 0,9788$
$d_{\text{отв}} = 15 \text{ мм}$	$Q_{\text{дн}} = 6,1214P_{\text{н}} + 1,6696$	$R^2 = 0,976$

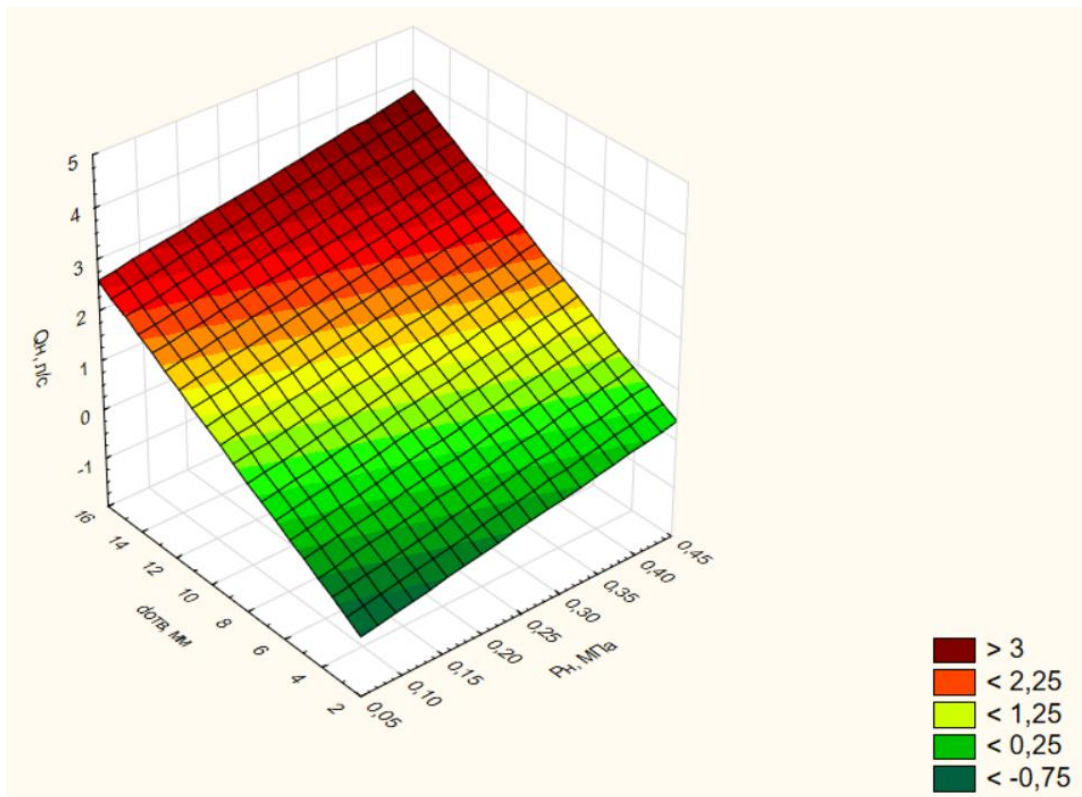


Рисунок 4.2 – Зависимость расхода дождевальной насадки и диаметра выходного отверстия сопла от давления воды

Получена аппроксимационная зависимость, описывающая взаимосвязь расхода воды дождевальной насадки, ее давления воды и диаметра сопла выходного отверстия, которая следующий вид:

$$Q_{\text{дн}} = -1,4277 + 2,8737d_{\text{отв}} + 0,2417P_{\text{н}}. \quad (4.1)$$

В ходе исследований было установлено, что увеличение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа приводит к увеличению ее расхода: при диаметре выходного отверстия сопла дождевальной насадки 3 мм – в 1,66 раза, 4 мм – в 1,96 раза, 5 и 6 мм – в 2,0 раза, 7 мм – в 2,08 раза, 8 мм – в 2,19 раза, 9 мм – 1,94 раза, 10 мм – в 1,67 раза, 11 мм – в 1,94 раза, 12 мм – в 1,88 раза, 13 мм – в 1,96 раза, 14 мм – в 1,83 раза и 15 мм – в 1,89 раза. Как видно, увеличение давления на выходе из сопла дождевальной насадки приводит к повышению расхода воды на 16,5 % с увеличением диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки.

Увеличение диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки резко повышает расход воды. Установлено, что при увеличении диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки с 3 до 15 мм при давлении воды 0,1 МПа расход воды повышается в 10,62 раза; при 0,15 МПа – в 11,34 раза; при 0,2 МПа – в 11,29 раза; при 0,25 МПа – в 10,75 раза; при 0,3 МПа – в 11,22 раза; при 0,35 МПа – в 11,15 раза и при 0,4 МПа – в 12,08 раза.

Предлагаемая дождевальная насадка, устанавливаемая на трубопровод дождевальной машины, будет работать в условиях низкого давления воды – 0,15...0,2 МПа. Были определены изменения ее расходных характеристик, которые свидетельствуют об увеличении расхода воды при давлении 0,15 МПа с повышением диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки с 3 до 4 мм на 14,8 %; с 4 до 5 мм – на 34,1 %; с 5 до 6 мм – на 22,6 %; с 6 до 7 мм – на 14,5 %; с 7 до 8 мм – на 20,5 %; с 8 до 9 мм – на 25,7 %; с 9 до 10 мм – на 19,8 %; с 10 до 11 мм – на 13,8 %; с 11 до 12 мм – на 11,6 %; с 12 до 13 мм – на 18,8 %; с 13 до 14 мм – на 7 % и с 14 до 15 мм – на 12,6 %.

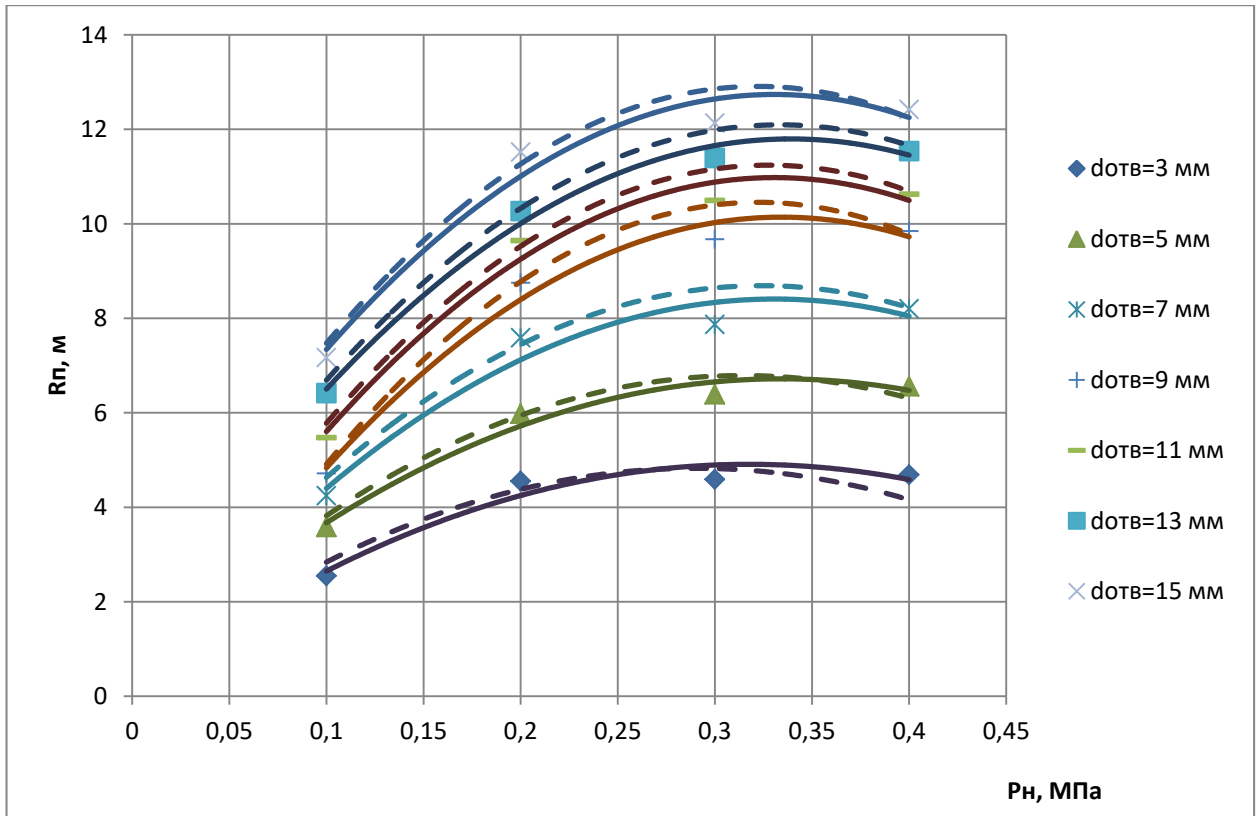
Аналогичная тенденция прослеживается и при давлении воды на выходе из сопла дождевальной насадки 0,2 МПа, где средний прирост расхода составляет 16,6 % при увеличении диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки на 1 мм.

#### **4.1.2 Определение радиуса полива дождевальной насадкой**

Одним из основных показателей дождевальной насадки является радиус полива (выражение (2.63)). Согласно теоретическим предпосылкам, на величину этого параметра оказывают влияние давление воды на выходе из сопла дождевальной насадки, диаметр выходного отверстия сопла, высота установки относительно поверхности поля, скорость и направление ветра, угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту.

В ходе лабораторных исследований было определено влияние давления воды и диаметра выходного отверстия дождевальной насадки на радиус полива с учетом высоты ее установки. Результаты исследований дождевальной насадки, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью и угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту, равным  $30^\circ$ , установленной на высоте 2,5 м относительно поверхности поля, представлены на рисунке 4.3.

Полученные данные свидетельствуют о том, что повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки приводит к увеличению радиуса полива. Так, повышение давления воды с 0,1 до 0,2 МПа вызывает увеличение радиуса полива в среднем в 1,72 раза. Дальнейшее повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,2 до 0,3 МПа повышает прирост радиуса полива в среднем в 1,07 раза и с 0,3 до 0,4 МПа – в 1,01 раза. Как видно, с повышением давления воды прирост радиуса полива снижается. Это можно объяснить увеличением скорости потока воды, сходящего с образующей дефлектора, который при встрече с воздухом подвержен разрушению на более мелкие капли дождя. Уменьшение диаметра капли дождя вызывает снижение дальности ее полета, т. е. радиуса полива.



$d_{отв} = 3 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -47,727P_{\Pi}^2 + 30,321P_{\Pi} + 0,0939$	$R^2 = 0,9356$
$d_{отв} = 5 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -55,704P_{\Pi}^2 + 37,196P_{\Pi} + 0,5095$	$R^2 = 0,9736$
$d_{отв} = 7 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -75,243P_{\Pi}^2 + 49,775P_{\Pi} + 0,1762$	$R^2 = 0,952$
$d_{отв} = 9 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -96,535P_{\Pi}^2 + 64,57P_{\Pi} - 0,6566$	$R^2 = 0,9839$
$d_{отв} = 11 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -100,95P_{\Pi}^2 + 66,783P_{\Pi} - 0,0668$	$R^2 = 0,9808$
$d_{отв} = 13 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -101,86P_{\Pi}^2 + 66,325P_{\Pi} + 0,8702$	$R^2 = 0,9941$
$d_{отв} = 15 \text{ мм}$	$R_{\Pi} = -111,2P_{\Pi}^2 + 70,797P_{\Pi} + 1,3532$	$R^2 = 0,9731$

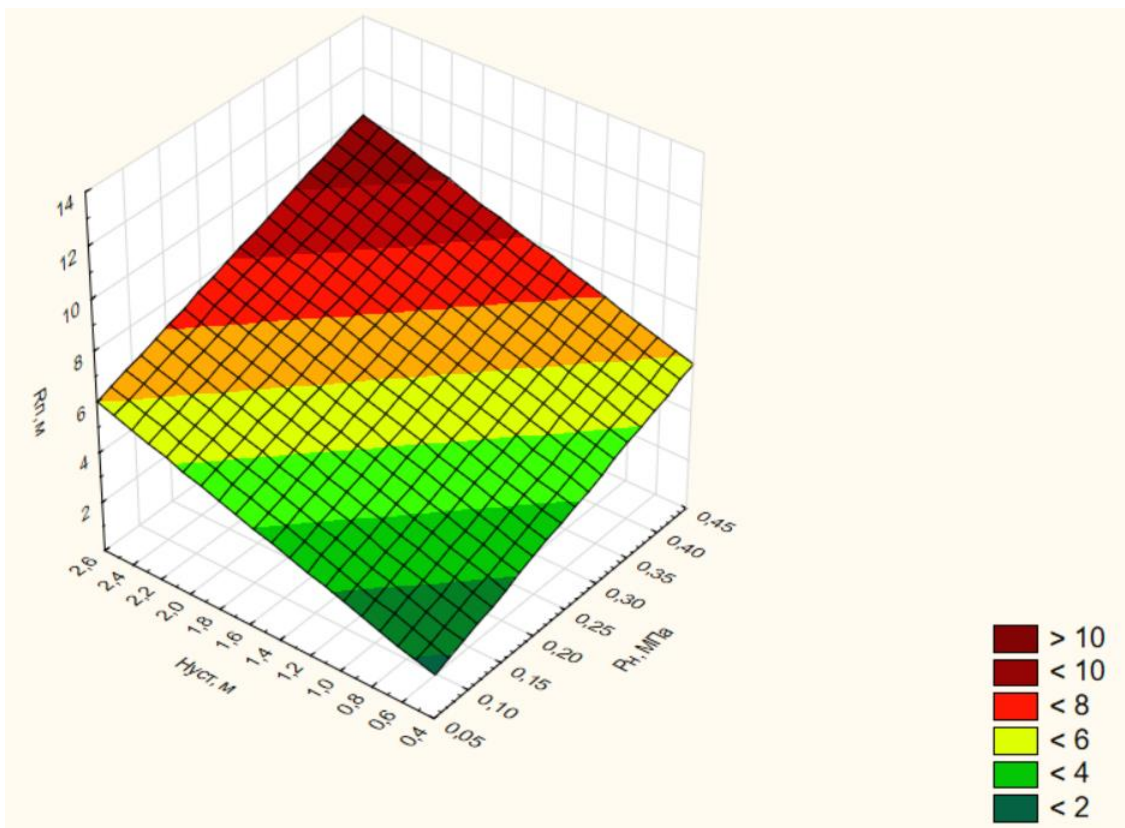
Рисунок 4.3 – Влияние давления воды  $P_{\Pi}$  (МПа) и диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки, оснащенной стационарным дефлектором с гладкой поверхностью,  $d_{отв}$  (мм) на радиус полива дождевальной насадки  $R_{\Pi}$  (м), при высоте установки насадки относительно поверхности поля 2,5 м (— экспериментальная; - - - - - теоретическая)

Было установлено, что увеличение диаметра выходного отверстия с 3 до 15 мм приводит к повышению радиуса полива в 2,82 раза при давлении воды на выходе из дождевальной насадки 0,1 МПа, тогда как при давлении воды 0,2 МПа радиус полива увеличивается в 2,52 раза; при 0,3 МПа – в 2,57 раза и 0,4 МПа – в 2,64 раза. Средний прирост радиуса полива с учетом повышения диаметра выходного отверстия сопла насадки на 1 мм составляет 0,99–1,01 раза.

Как показали результаты проведенных исследований, радиус полива дождевальной насадки, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью,

установленной на высоте относительно поверхности поля 2,5 м при давлении воды на выходе из сопла дождевальной насадки 0,4 МПа изменяется в диапазоне от 4,6 до 12,4 м в зависимости от диаметра выходного отверстия. Снижение давления воды до 0,2 МПа, при прочих равных условиях, приводит к снижению радиуса полива до 4,5...11,5 м.

Необходимо учесть, что дождевальная насадка была установлена на максимальной высоте относительно поверхности поля равной 2,5 м. В настоящее время большинство дождевальных машин работают с системой приповерхностного полива, где минимальная высота дождевальной насадки от поверхности поля составляет 0,8 м. Снижение высоты установки дождевальной насадки приводит к уменьшению радиуса полива (рисунок 4.4).



$$R_{п} = 0,439 + 10,3372P_{н} + 1,9425H_{уст}$$

Рисунок 4.4 – Влияние высоты установки дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью на радиус полива

Анализ показал, что при уменьшении высоты установки дождевальной насадки относительно поверхности поля с 2,5 до 0,5 м при диаметре выходного отверстия сопла дождевальной насадки  $d_{\text{отв}} = 3$  мм радиус полива сократился с 2,54 до 1,34 м при давлении воды, выходящей из сопла дождевальной насадки, равным  $P_{\text{н}} = 0,1$  МПа; при  $P_{\text{н}} = 0,2$  МПа – с 4,55 до 2,39 м; при  $P_{\text{н}} = 0,3$  МПа – с 4,59 до 2,42 м и при  $P_{\text{н}} = 0,4$  МПа – с 4,68 до 2,46 м. Как видно, снижение высоты установки дождевальной насадки с 2,5 м до 0,5 м приводит к снижению радиуса полива в 1,9 раза. Аналогичная тенденция прослеживается и для других диаметров выходного отверстия сопла.

Установлено, что среднее снижение радиуса полива при увеличении диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки с 3 до 15 мм и уменьшении высоты установки дождевальной насадки относительно поверхности поля для давления воды  $P_{\text{н}} = 0,1$  МПа составило 38,2 %; при  $P_{\text{н}} = 0,2$  МПа – 33,4 %; при  $P_{\text{н}} = 0,3$  МПа – 27,8 % и при  $P_{\text{н}} = 0,4$  МПа – 22,3 %.

Также было определено влияние на радиус полива дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью давления воды и диаметра выходного отверстия сопла. Математическая обработка результатов исследований позволила получить аппроксимационную зависимость следующего вида:

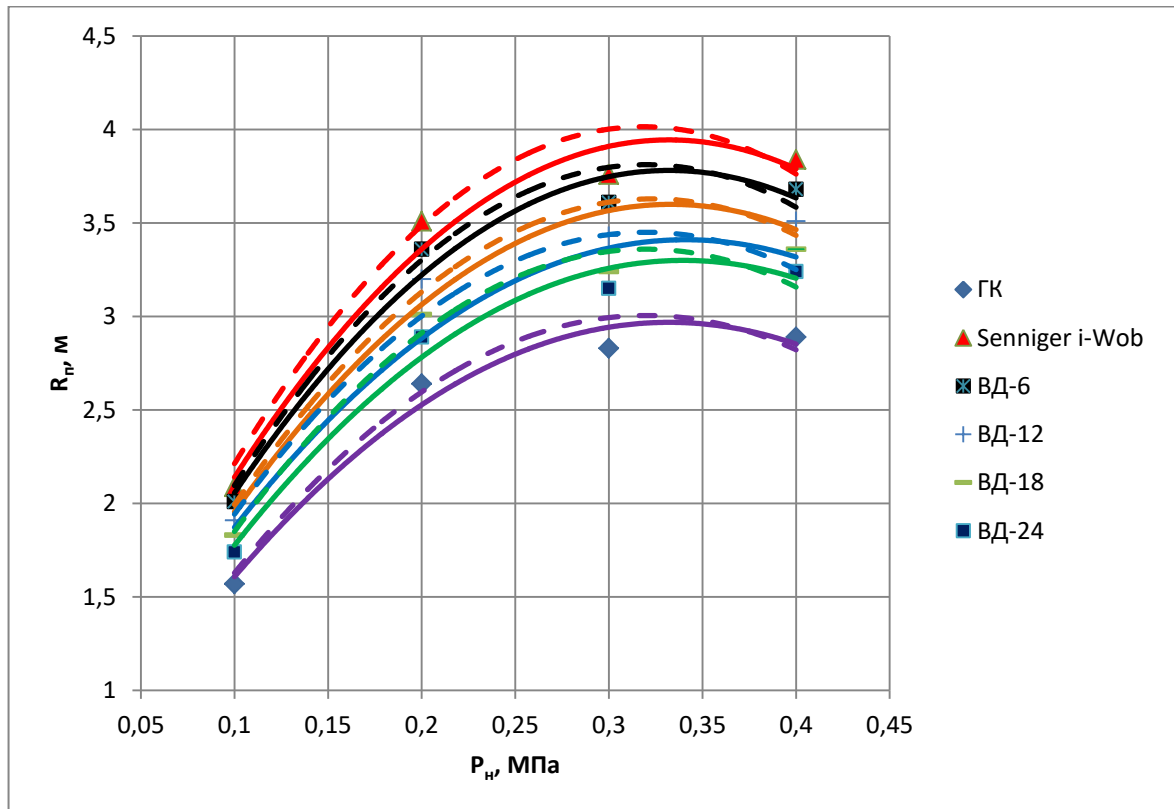
$$R_{\text{п}} = -3,0202 + 0,5291d_{\text{отв}} + 35,1845P_{\text{н}} - 0,0154d_{\text{отв}}^2 + 0,6593P_{\text{н}}d_{\text{отв}} - 61,5615P_{\text{н}}^2 \quad (4.2)$$

Адекватность уравнения (4.2) экспериментальным данным проверяли по критерию Фишера (приложение А).

Анализ полученных данных показал, что увеличение диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки с 3 до 15 мм и давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа приводит к возрастанию радиуса полива в среднем в 2,5 раза. Полученное уравнение (4.2) позволяет более точно выполнять расчеты, обеспечивающие взаимосвязь трех параметров –  $R_{\text{п}}$ ,  $d_{\text{отв}}$  и  $P_{\text{н}}$ .

С целью подтверждения теоретических положений, доказывающих, что наличие у предлагаемой дождевальной насадки вращающегося дефлектора кону-

сообразной формы с рифленой поверхностью обеспечивает увеличение радиуса полива, были проведены экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рисунке 4.5.



Senniger i-Wob	$R_{п} = -33,5P_{н}^2 + 22,25P_{н}^2 + 0,25$	$R^2 = 0,9751$
ВД-6	$R_{п} = -32P_{н}^2 + 21,26P_{н}^2 + 0,25$	$R^2 = 0,9769$
ВД-12	$R_{п} = -30,25P_{н}^2 + 20,65P_{н}^2 + 0,2425$	$R^2 = 0,9752$
ВД-18	$R_{п} = -26,5P_{н}^2 + 18,07P_{н}^2 + 0,33$	$R^2 = 0,9761$
ВД-24	$R_{п} = -26,5P_{н}^2 + 18,01P_{н}^2 + 0,24$	$R^2 = 0,982$
ГК	$R_{п} = -25,25P_{н}^2 + 16,775P_{н}^2 + 0,1825$	$R^2 = 0,9754$

Рисунок 4.5 – Изменение радиуса полива серийной и экспериментальной дождевальными насадками в зависимости от давления воды на выходе из сопла диаметром 3 мм, установленной на высоте 1,0 м относительно поверхности поля (— экспериментальная; - - - - - теоретическая)

При анализе полученных данных было установлено, что повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа приводит к увеличению радиуса полива всеми дождевальными насадками в среднем в 1,83 раза. Наибольший радиус полива был зафиксирован у серийной дождевальной насадки Senniger i-Wob, который изменялся в диапазоне от 2,09 до 3,84 м, что в

среднем в 1,33 раза больше по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что в процессе вращения капли дождя, сходящие с основания вращающегося дефлектора, получают дополнительное ускорение, которое повышает начальную скорость их полета. Так как на серийной дождевальной насадке Senniger i-Wob установлен вращающийся дефлектор с 8 канавками полукруглой формы, то он, обладая небольшой скоростью вращения, создает дождь с большим диаметром капель (более 3 мм), которые далеко летят.

Рассматривая работу предлагаемых дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, можно отметить то, что повышение давления воды с 0,1 до 0,4 МПа приводит к увеличению радиуса полива по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, в среднем на 27,5 % для дефлектора, имеющего 6 ребер; на 21,3 % для дефлектора с 12 ребрами; на 15,3 % для дефлектора с 18 ребрами и на 10,9 % для дефлектора, имеющего 24 ребра.

Как видно, с увеличением количества ребер, выполненных на конусообразной рифленой поверхности дефлектора, происходит снижение радиуса полива по сравнению с радиусом полива, создаваемым серийной дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что, несмотря на повышение начальной скорости полета капли дождя, сходящей с основания вращающегося дефлектора, за счет увеличения количества ребер увеличивается частота вращения дефлектора, формируется дождь с малым диаметром капель, который имеет небольшую дальность полета.

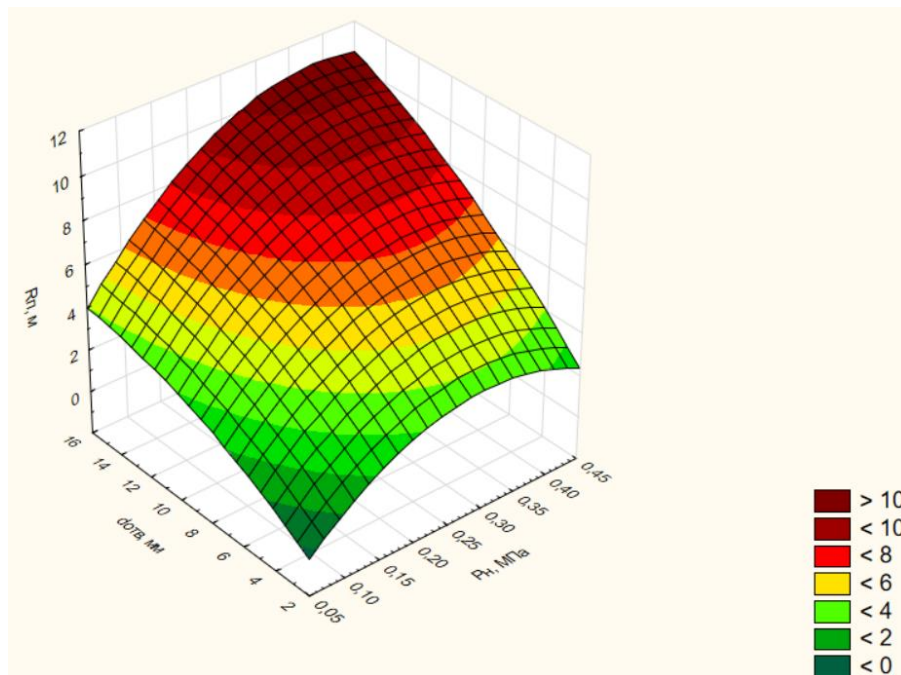
При сравнении результатов радиуса полива дождевальными насадками, имеющими вращающийся дефлектор, было установлено следующее.

Радиус полива серийной дождевальной насадкой Senniger i-Wob при давлении воды на выходе 0,1 МПа больше на 3,8 % по сравнению с предлагаемой дождевальной насадкой, имеющей вращающийся дефлектор с 6 ребрами; на 8,6 % – с 12 ребрами; на 12,4 % – с 18 ребрами; на 16,7 % – с 24 ребрами.



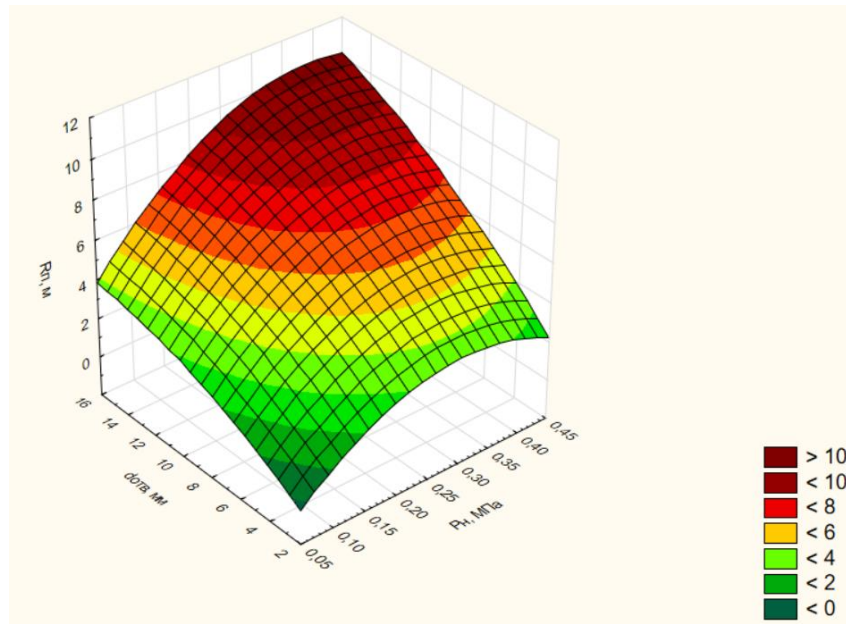
Дальнейшее повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки Senniger i-Wob до 0,2 МПа приводит к увеличению радиуса полива по сравнению с предлагаемыми дождевальными насадками на 4,3 % для дефлектора, имеющего 6 ребер; на 8,8 % для дефлектора с 12 ребрами; на 14,2 % для дефлектора с 18 ребрами и на 17,7 % для дефлектора, имеющего 24 ребра. Повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки Senniger i-Wob до 0,4 МПа увеличивает радиус полива соответственно на 4,2 %; 8,6; 12,5 и 15,6 %.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что на величину радиуса полива дождевальной насадки с вращающимся дефлектором оказывают влияние давление воды на выходе из сопла, диаметр выходного отверстия сопла дождевальной насадки и высота ее установки относительно поверхности поля. Оценить данное влияние можно при рассмотрении графических зависимостей (рисунки 4.6 и 4.7, приложение Б).



$$R_{\text{п}} = -3,0312 + 34,2476P_{\text{H}} + 0,5773d_{\text{отв}} - 58,4808P_{\text{H}}^2 + 0,7241P_{\text{H}}d_{\text{отв}} - 0,0172d_{\text{отв}}^2$$

Рисунок 4.6 – Влияние диаметра выходного отверстия и давления воды на выходе из сопла серийной дождевальной насадки Senniger i-Wob, установленной на высоте 1,0 м над поверхностью поля, на радиус полива



$$R_{\text{п}} = -2,8992 + 32,9453P_{\text{н}} + 0,55554d_{\text{отв}} - 56,2308P_{\text{н}}^2 + 0,696P_{\text{н}}d_{\text{отв}} - 0,0166d_{\text{отв}}^2$$

Рисунок 4.7 – Влияние диаметра выходного отверстия и давления воды на выходе из сопла предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 6 ребер, установленной на высоте 1,0 м над поверхностью поля, на радиус полива

Результаты исследований показывают, что у дождевальной насадки Senniger i-Wob, установленной на высоте относительно дневной поверхности 1 м, увеличение диаметра выходного отверстия сопла с 3 до 15 мм при давлении воды 0,1 МПа приводит к увеличению радиуса полива с 2,09 до 5,89 м, т. е. в 2,82 раза. Дальнейшее повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки также способствует повышению радиуса полива: при 0,2 МПа – в 2,56 раза; при 0,3 МПа – 2,64 раза и при 0,4 МПа – 2,65 раза.

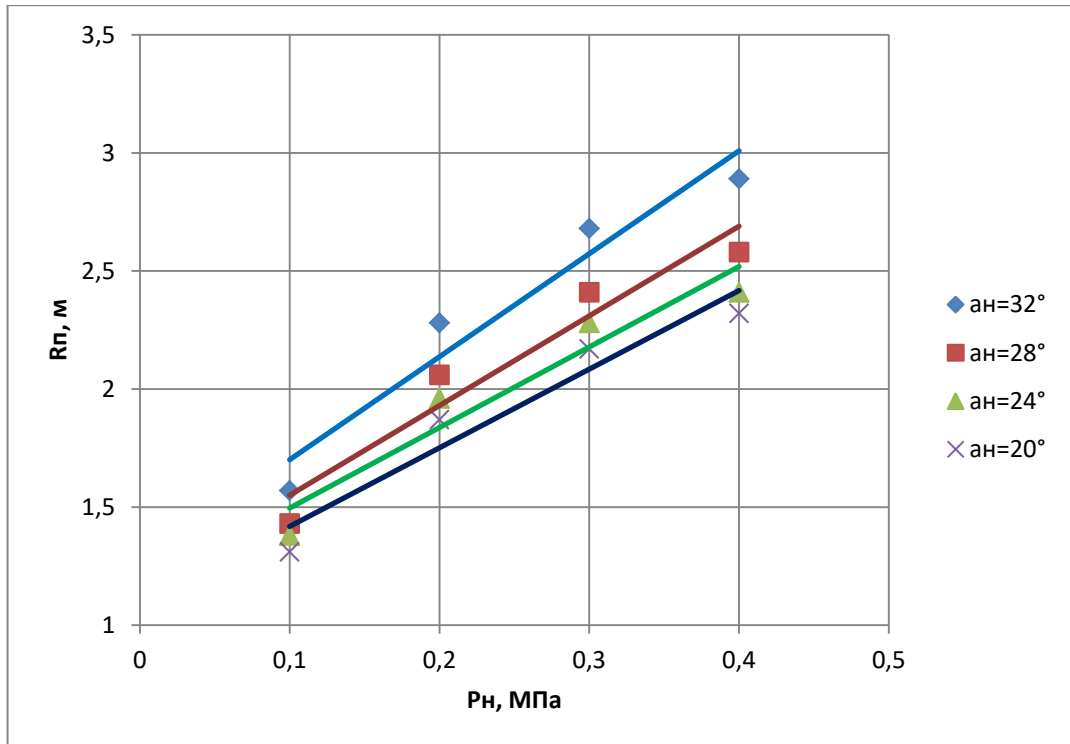
Аналогичная ситуация прослеживается и для предлагаемой насадки, имеющей вращающийся дефлектор конусообразной формы с рифленной поверхностью и разным количеством ребер. Так, для вращающегося дефлектора с 6 ребрами увеличение диаметра выходного отверстия сопла с 3 до 15 мм приводит к увеличению радиуса полива при давлении воды 0,1 МПа в 2,8 раза; при 0,2 МПа – в 2,59 раза; при 0,3 МПа – в 2,62 раза и при 0,4 МПа – в 2,63 раза. Для дефлектора с 12 ребрами – соответственно в 2,79; 2,58; 2,62 и 2,62 раза; для дефлектора, имеющего

18 ребер, – в 2,79; 2,57; 2,60 и 2,61 раза; для дефлектора с 24 ребрами – в 2,78; 2,56; 2,58 и 2,59 раза.

Результаты исследований показали, что радиус полива дождевальными насадками с вращающимся дефлектором выше по сравнению с радиусом полива дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор. При сравнении было установлено, что серийная дождевальная насадка Senniger i-Wob обеспечивает больший радиус полива по сравнению с предлагаемой, а увеличение количества ребер, выполненных на вращающемся дефлекторе, способствует снижению этого показателя. Объяснить данное обстоятельство можно тем, что серийная дождевальная насадка Senniger i-Wob создает дождь с каплями большого диаметра (более 3 мм), способными лететь на большое расстояние, тогда как у предлагаемой дождевальной насадки формируется дождь с меньшим диаметром капель, имеющих малую дальность полета, но при этом оказывается более щадящее воздействие на почву и сельскохозяйственные растения. Увеличение количества ребер на рифленой поверхности вращающегося дефлектора обеспечивает повышение угловой скорости дефлектора и создание дождя с малым диаметром капель.

Другим наиболее значимым геометрическим параметром, оказывающим влияние на радиус полива дождевальной насадки и ее ветроустойчивость, является угол наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту (поверхности поля). Оптимальной величиной этого угла является  $30^{\circ} \dots 32^{\circ}$ . При данных значениях достигается наибольший радиус полива, однако струя воды, сходящая с основания дефлектора, имеет дополнительную высоту подъема капли дождя (1,5...3,5 м в зависимости от давления воды и диаметра выходного отверстия сопла). Несомненно, данное обстоятельство негативно отражается на ветроустойчивости дождевого облака.

Были проведены исследования с целью определения влияния угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к поверхности поля на величину радиуса полива. В качестве примера приведем результаты влияния этого параметра для дождевальной насадки, установленной на высоте 1 м относительно поверхности поля и имеющей диаметр выходного отверстия сопла 3 мм (рисунок 4.8).



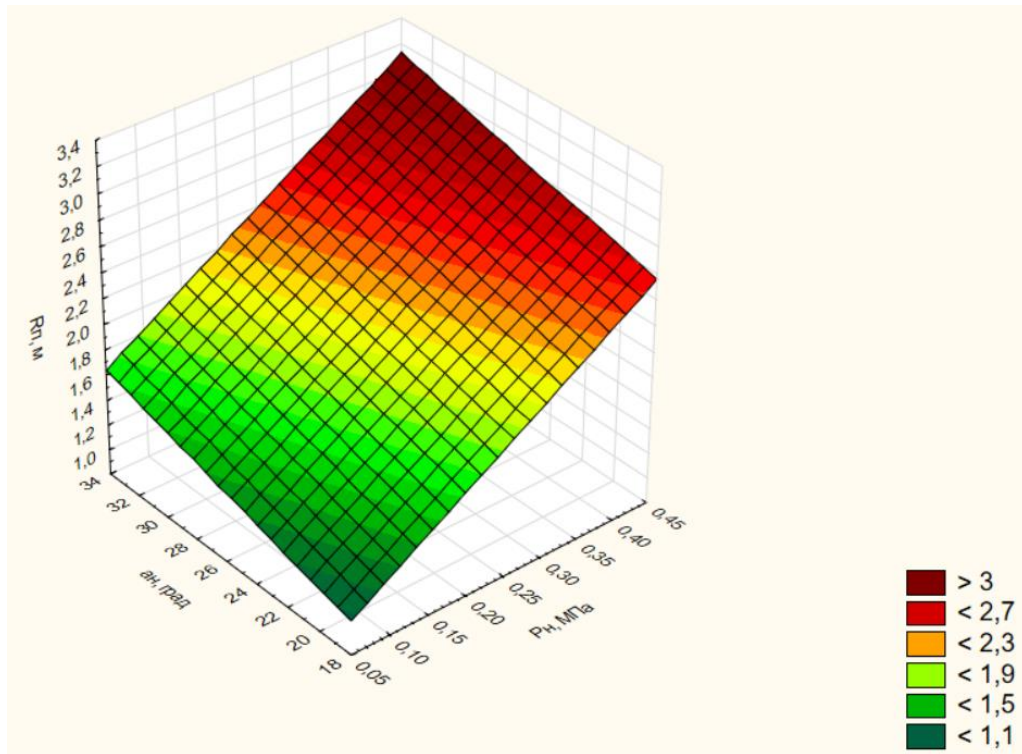
$\alpha_n = 20^\circ$	$R_n = 3,33P_n + 1,085$	$R^2 = 0,98$
$\alpha_n = 24^\circ$	$R_n = 3,41P_n + 1,155$	$R^2 = 0,96$
$\alpha_n = 28^\circ$	$R_n = 3,8P_n + 1,17$	$R^2 = 0,95$
$\alpha_n = 32^\circ$	$R_n = 4,36P_n + 1,265$	$R^2 = 0,98$

Рисунок 4.8 – Влияние на радиус полива дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)

Анализ данных показывает, что для дождевальной насадки, имеющей гладкий стационарный дефлектор, снижение угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к поверхности поля с  $32^\circ$  до  $28^\circ$  приводит к уменьшению радиуса полива на 9,7 % при давлении воды на выходе из сопла 0,1 МПа. При дальнейшем уменьшении угла с  $28^\circ$  до  $24^\circ$  радиус полива сокращается на 13,7 %, с  $24^\circ$  до  $20^\circ$  – на 19,8 %.

Аналогичная ситуация прослеживается и при других значениях давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки. Так, при давлении воды 0,2 МПа снижение радиуса полива составило соответственно 10,6 %; 16,3 и 21,9 %; при 0,3 МПа – 11,2 %; 17,5 и 23,5 %, а при 0,4 МПа – 12,0 %; 19,9 и 24,5 %.

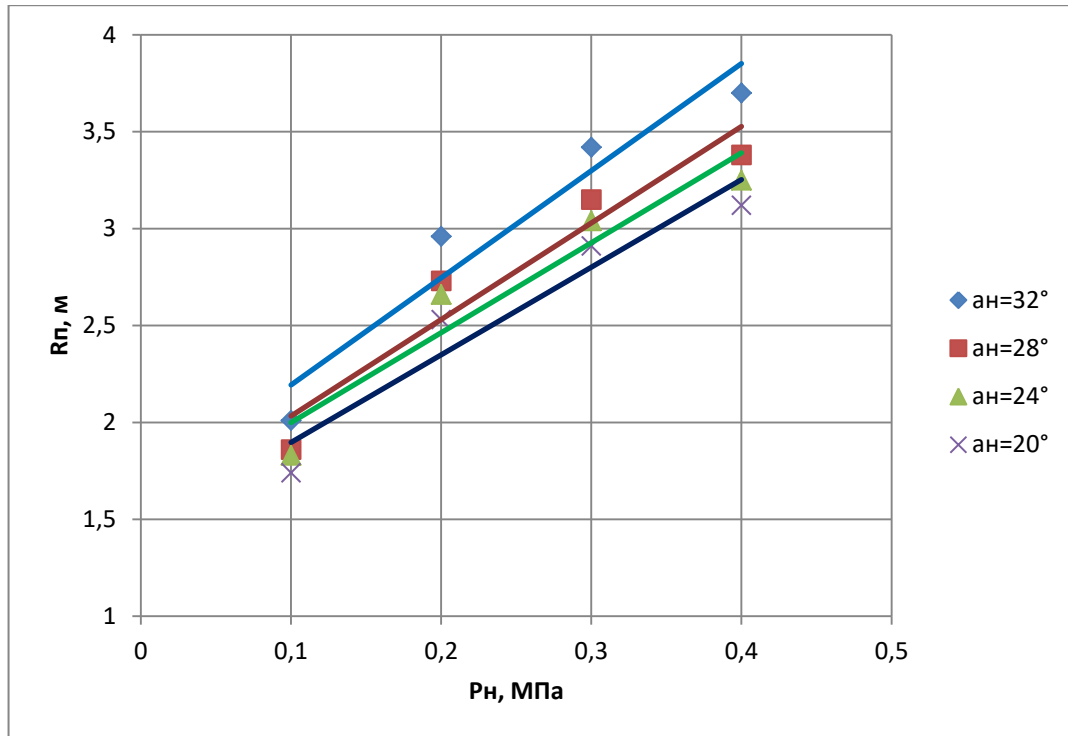
Как показали результаты исследований, с уменьшением угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту и повышением давления воды на выходе из сопла происходит снижение радиуса полива, что наглядно демонстрируют графическая зависимость (рисунок 4.9) и полученная аппроксимационная зависимость.



$$R_{п} = 0,2425 + 3,725P_{н} + 0,0356\alpha_{н}$$

Рисунок 4.9 – Влияние на радиус полива дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, относительно поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)

Рассматривая влияние угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к поверхности поля на радиус полива (рисунок 4.10), было установлено, что для предлагаемой дождевальной насадки, имеющей вращающийся дефлектор с 6 ребрами, уменьшение этого показателя с 32° до 28° приводит к снижению радиуса полива на 8,06 %; с 28° до 24° – на 9,84 % и с 24° до 20° – на 15,5 % при давлении воды на выходе из сопла дождевальной насадки 0,1 МПа.

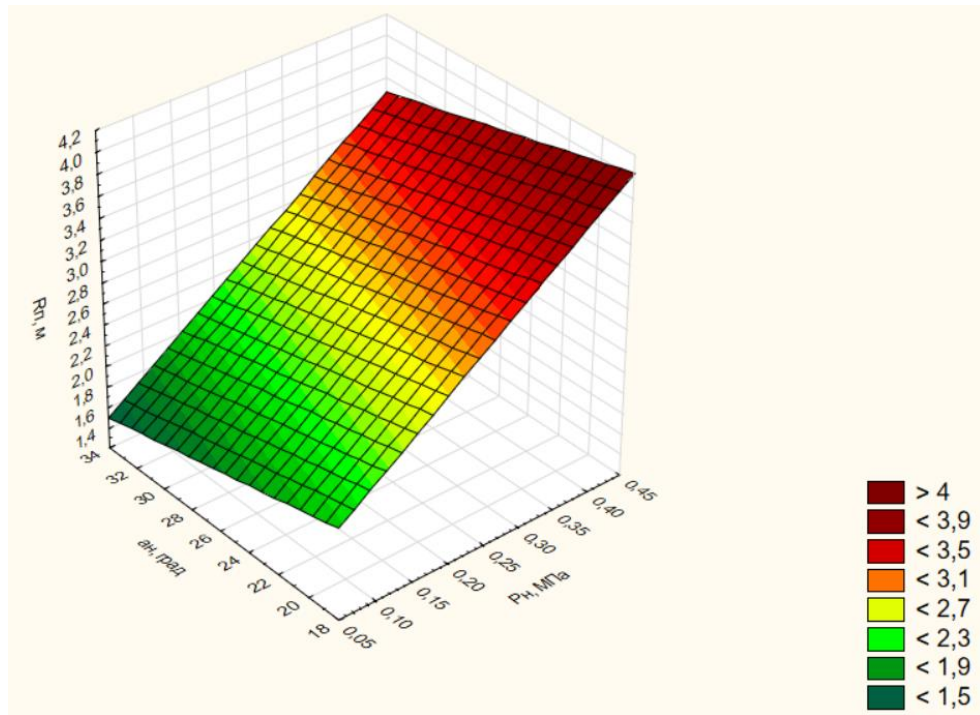


$\alpha_n = 20^\circ$	$R_n = 4,52P_n + 1,445$	$R^2 = 0,97$
$\alpha_n = 24^\circ$	$R_n = 4,64P_n + 1,535$	$R^2 = 0,96$
$\alpha_n = 28^\circ$	$R_n = 34,98P_n + 1,533$	$R^2 = 0,96$
$\alpha_n = 32^\circ$	$R_n = 45,53P_n + 1,64$	$R^2 = 0,978$

Рисунок 4.10 – Влияние на радиус полива предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 6 ребер, величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, относительно поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)

Дальнейшее увеличение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки вызывает большее сокращение радиуса полива с уменьшением угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к поверхности поля. Установлено, что при давлении воды 0,2 МПа уменьшение угла с  $32^\circ$  до  $28^\circ$  приводит к снижению радиуса полива на 8,42 %; с  $28^\circ$  до  $24^\circ$  – на 11,3 % и с  $24^\circ$  до  $20^\circ$  – на 17,1 %. Для давления воды 0,3 МПа снижение радиуса полива – соответственно на 8,6 %; 12,5 и 17,5 %, а для давления воды 0,4 МПа – 9,5 %; 13,9 и 18,6 %.

Как видно, с увеличением давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки и уменьшением угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к поверхности поля происходит снижение радиуса полива, что отражено на графической зависимости (рисунок 4.11) и получившейся аппроксимационной зависимости.



$$R_{п} = 0,24666 + 4,9175P_{н} - 0,0357\alpha_{н}$$

Рисунок 4.11 – Влияние на радиус полива предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором с 6 ребрами величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, относительно поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)

Аналогичная тенденция снижения радиуса полива с уменьшением угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту (поверхности поля) прослеживается и для дождевальных насадок, имеющих дефлектор с 12, 18 и 24 ребрами (приложение В).

При сравнительном анализе радиуса полива, создаваемого серийной дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью и предлагаемой дождевальной насадкой, имеющей вращающийся дефлектор конусообразной формы с рифленой поверхностью, было установлено, что радиус полива у дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 6 ребер, выше в среднем на 22,1 % при угле наклона струи воды 32°; на 23,7 % при 28°; на 25,2 % при 24° и на 25,5 % при 20°.

Аналогичная тенденция прослеживается и для насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 12 ребер. Радиус полива выше по сравнению с серийной насадкой, имеющей стационарный дефлектор, соответственно на 19,5 %; 20,5;

22,1 и 22,4 %. Для дефлектора с 18 ребрами – соответственно на 13,9 %; 14,2; 16,2 и 15,9 %, а для дефлектора с 24 ребрами – на 11,4 %; 11,1; 13,2 и 12,8 %.

Снижение радиуса полива дождевальными насадками с уменьшением угла наклона струи воды объясняется тем, что сходящая струя воды не имеет высоту подъема относительно поверхности поля, обеспечивающую запас дальности полета капли дождя. Увеличение радиуса полива дождевальной насадкой, имеющей вращающийся дефлектор, по сравнению с дождевальной насадкой, оснащенной стационарным дефлектором, обусловлено тем, что при сходе с основания вращающегося дефлектора струя воды обладает более высокой скоростью за счет вращения дефлектора. Увеличение количества ребер, выполненных на рифленой поверхности вращающегося дефлектора, способствует повышению частоты вращения дефлектора и незначительному снижению радиуса полива по сравнению с другими насадками, имеющими вращающийся дефлектор. В связи с этим необходимо рассмотреть влияние количества ребер, выполненных на рифленой поверхности вращающегося дефлектора, на его угловую скорость.

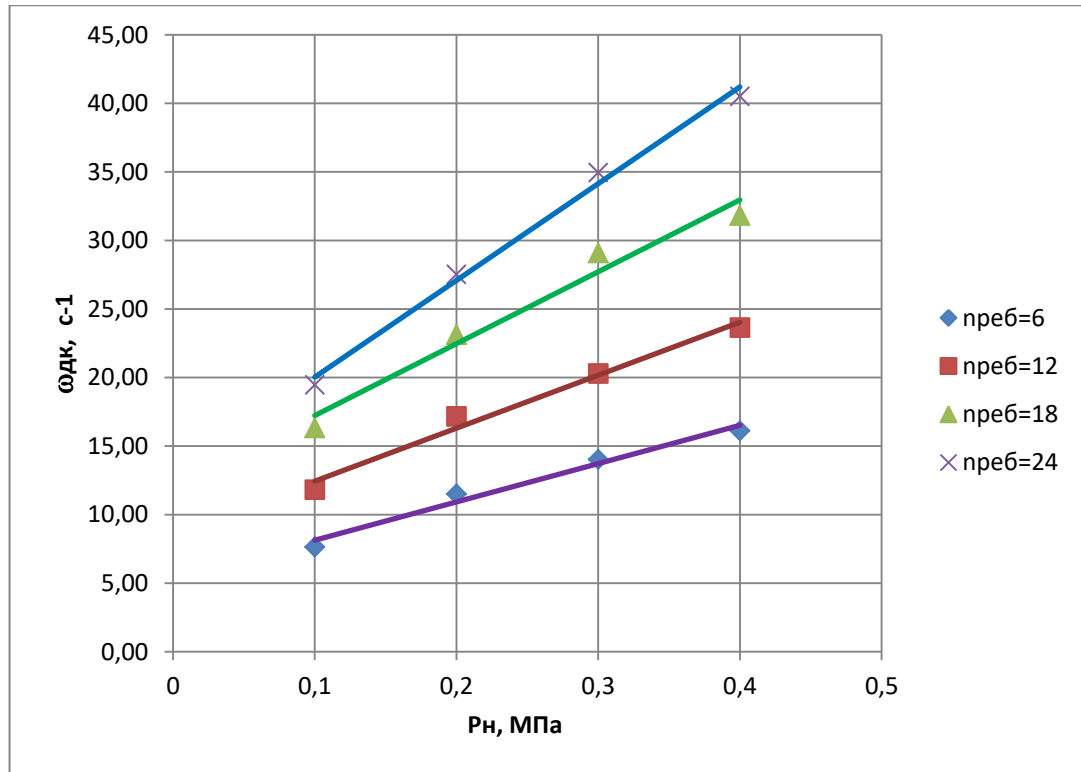
#### **4.1.3 Определение угловой скорости вращающегося дефлектора дождевальной насадки**

Как было отмечено ранее, увеличение угловой скорости дефлектора способствует повышению начальной скорости полета капли дождя и уменьшению ее диаметра. В ходе теоретических исследований установлено, что на угловую скорость дефлектора оказывают влияние давление воды, выходящей из сопла дождевальной насадки, и количество ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора. Для этого мы исследовали влияние перечисленных величин на угловую скорость дефлектора, результаты представлены на рисунке 4.12.

Анализ полученных данных показал, что с повышением давления воды на выходе из сопла предлагаемой дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа происходит линейное увеличение угловой скорости дефлектора в 2 раза. Наибольший



прирост угловой скорости (на 35,3 %) был зафиксирован при увеличении давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,2 МПа; дальнейшее повышение давления воды до 0,4 МПа приводило к росту угловой скорости в среднем на 31,2 %.



$n_{реб} = 6$	$\omega_{дк} = 27,946P_n + 5,338$	$R^2 = 0,979$
$n_{реб} = 12$	$\omega_{дк} = 38,622P_n + 8,5827$	$R^2 = 0,9831$
$n_{реб} = 18$	$\omega_{дк} = 52,438P_n + 11,984$	$R^2 = 0,9686$
$n_{реб} = 24$	$\omega_{дк} = 70,545P_n + 12,979$	$R^2 = 0,9934$

Рисунок 4.12 – Влияние давления воды на выходе из сопла предлагаемой дождевальной насадки и количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора на угловую скорость

Следует также отметить, что увеличение количества ребер с 6 до 24 приводит к росту угловой скорости дефлектора в 2,54 раза при давлении воды 0,1 МПа; в 2,39 раза при 0,2 МПа; в 2,49 раза при 0,3 МПа и в 2,52 раза при 0,4 МПа.

Увеличение количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора вызывает неравнозначный прирост угловой скорости. Так, при давлении воды на выходе из сопла дождевальной насадки 0,1 МПа и увеличении количества ребер с 6 до 12 угловая скорость вращения дефлектора воз-

растает на 35,3 %; с 12 до 18 – на 27,5 %; с 18 до 24 – на 16,1 %. Аналогичная ситуация прослеживается и при других давлениях воды, выходящей из сопла дождевальной насадки.

Математическая обработка полученных данных позволила получить аппроксимационную зависимость следующего вида:

$$\omega_{\text{дк}} = -54,5625 + 452,75P_{\text{н}} + 9,8292n_{\text{реб}}, \quad (4.3)$$

где  $\omega_{\text{дк}}$  – угловая скорость дефлектора предлагаемой дождевальной насадки,  $\text{с}^{-1}$ ;

$P_{\text{н}}$  – давление воды на выходе из сопла, МПа;

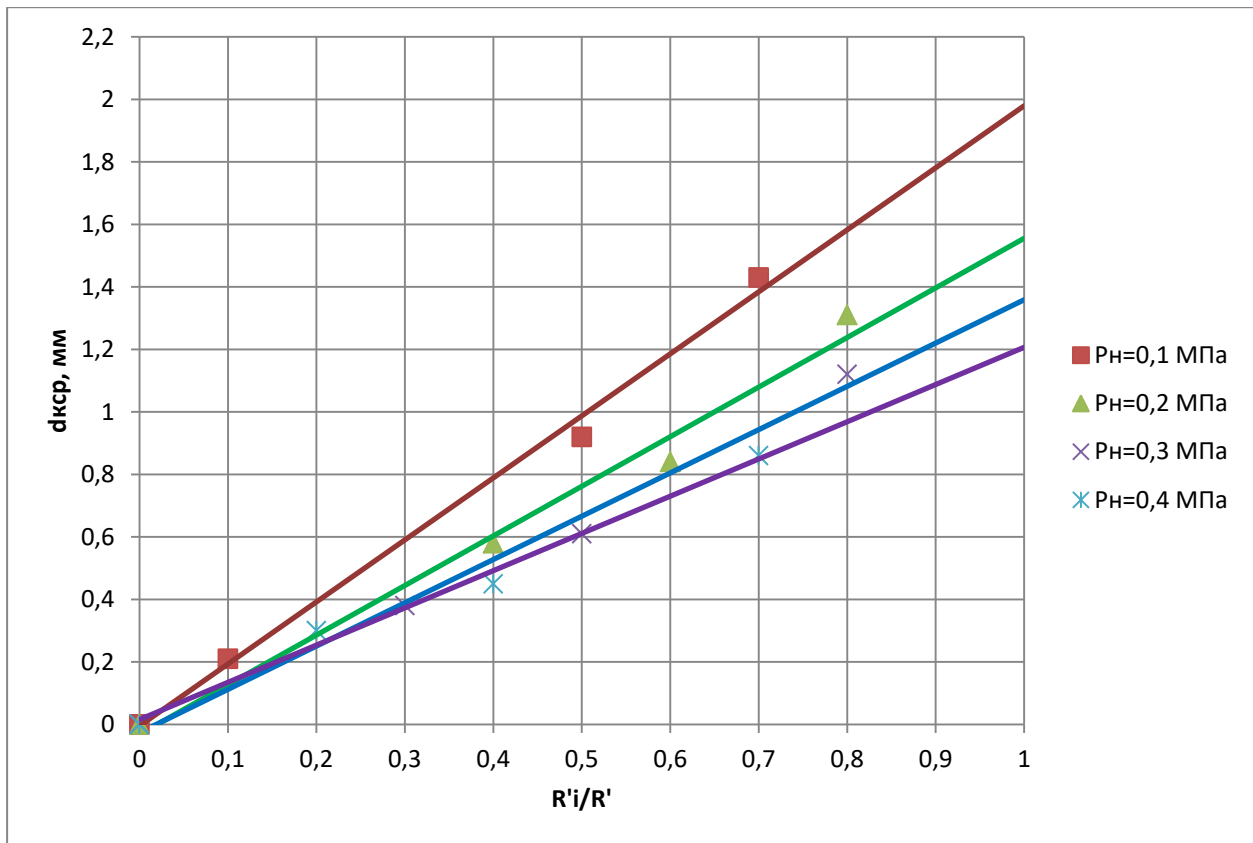
$n_{\text{реб}}$  – количество ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора

Уравнение (4.3) обеспечивает взаимосвязь вышеперечисленных параметров.

Ранее были высказаны предположения, что повышение угловой скорости дефлектора способствует созданию дождя с малым диаметром капель. Рассмотрим данный вопрос более подробно.

#### **4.1.4 Исследование диаметра капель дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимися дефлекторами**

Диаметр капель является одним из основных качественных показателей дождя, оказывающий негативное влияние на почву и растение. Считается, что наиболее качественный дождь, имеющий минимальное воздействие на почву и растение, состоит из большего количества капель, имеющих диаметр 0,6...1,2 мм [34, 45, 85, 148]. Установлено, что этот показатель зависит от давления воды, выходящей из сопла дождевальной насадки. В связи с этим нами были проведены исследования, в ходе которых определяли средний диаметр капли дождя в зависимости от радиуса полива и давления воды, выходящей из сопла серийной дождевальной насадки (рисунок 4.13).



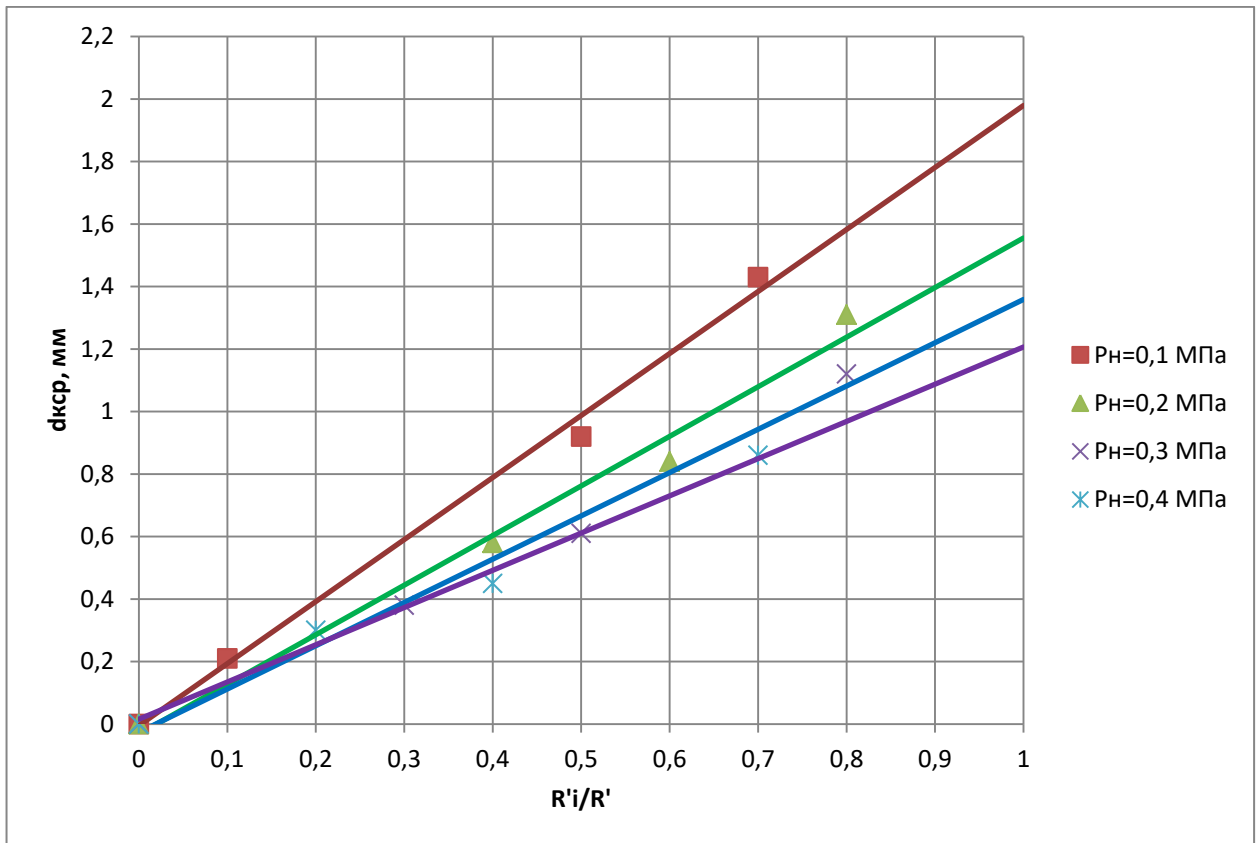
$P_H = 0,1$ МПа	$d_{крп} = 1,9847R'_i / R' - 0,005$	$R^2 = 0,9847$
$P_H = 0,2$ МПа	$d_{крп} = 1,5871R'_i / R' - 0,0317$	$R^2 = 0,9852$
$P_H = 0,3$ МПа	$d_{крп} = 1,3853R'_i / R' - 0,0266$	$R^2 = 0,9818$
$P_H = 0,4$ МПа	$d_{крп} = 1,1916R'_i / R' - 0,0152$	$R^2 = 0,9889$

Рисунок 4.13 – Изменение среднего диаметра капель дождя, создаваемого серийной дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью, с увеличением относительного радиуса полива  $R'_i / R'$  и давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки диаметром 3 мм

В результате обработки полученных данных было установлено, что для дождевальной насадки, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью средний диаметр капель дождя возрастает с увеличением относительного радиуса полива  $R'_i / R'$  и уменьшением давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки. При давлении воды на выходе из сопла дождевальной насадки  $P_H = 0,1$  МПа средний диаметр капель дождя менее 0,3 мм формируется при  $R'_i / R' \leq 0,2$ ; от 0,6 до 1,2 мм – при  $0,4 \leq R'_i / R' \leq 0,65$ ; более 1,5 мм – при  $R'_i / R' \geq 0,65$ .

Повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа способствует снижению среднего диаметра капли дождя и его формированию в следующем диапазоне: менее 0,3 мм при  $R'_i / R' \leq 0,25$ ; от 0,6 мм до 1,2 мм – при  $0,65 \leq R'_i / R' \leq 0,95$ ; более 1,5 мм – при  $R'_i / R' \geq 0,95$ .

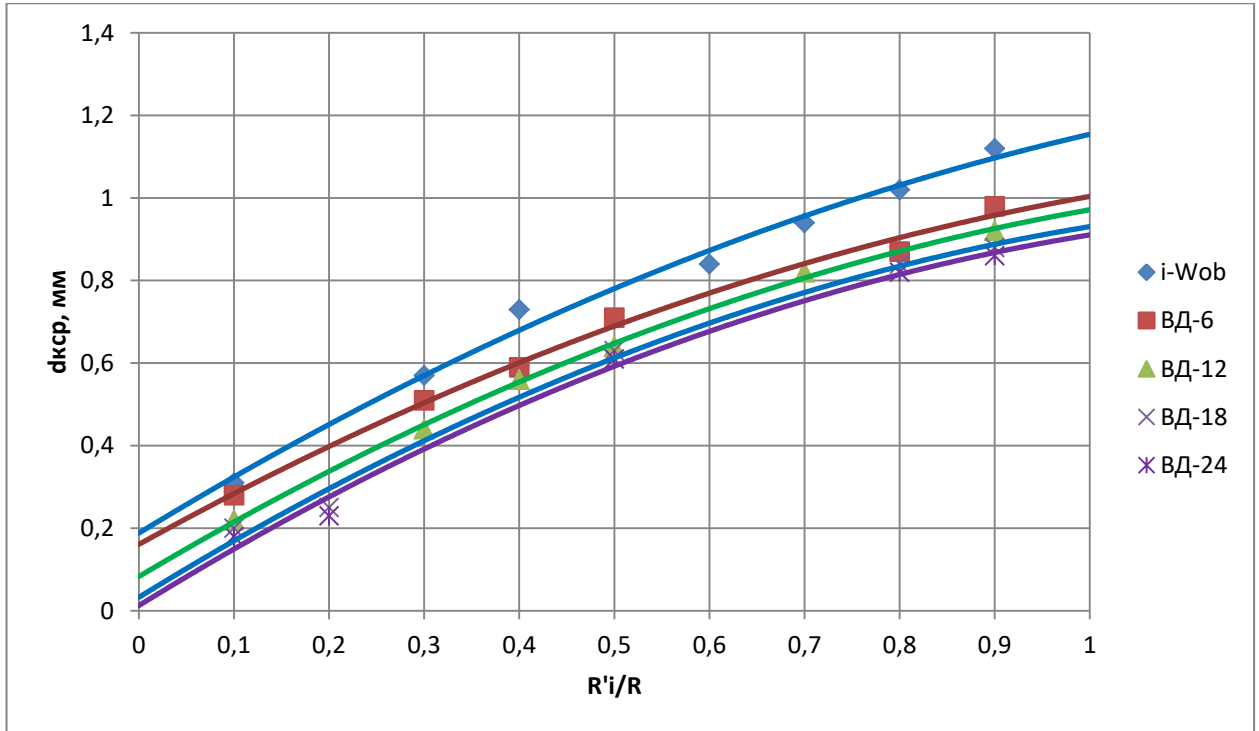
Аналогичная тенденция сохраняется и при изменении диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки (рисунок 4.14).



$P_n = 0,1$ МПа	$d_{\text{ксп}} = 2,4466R'_i / R' - 0,1038$	$R^2 = 0,981$
$P_n = 0,2$ МПа	$d_{\text{ксп}} = 1,91R'_i / R' - 0,042$	$R^2 = 0,9819$
$P_n = 0,3$ МПа	$d_{\text{ксп}} = 1,6294R'_i / R' - 0,0433$	$R^2 = 0,9897$
$P_n = 0,4$ МПа	$d_{\text{ксп}} = 1,3112R'_i / R' - 0,0164$	$R^2 = 0,9863$

Рисунок 4.14 – Изменение среднего диаметра капель дождя, создаваемого серийной дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью, с увеличением относительного радиуса полива  $R'_i / R'$  и давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки диаметром 8 мм

Рассматривая изменение среднего диаметра капель дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимся дефлектором, можно отметить, что с возрастанием дальности полета капли дождя ее средний диаметр увеличивается, но характер увеличения носит затухающий характер (рисунок 4.15).



Senniger i-Wob	$d_{\text{ксп}} = -0,4372(R'_i / R')^2 + 1,4032R'_i / R' + 0,1881$	$R^2 = 0,989$
ВД-6	$d_{\text{ксп}} = -0,429(R'_i / R')^2 + 1,2718R'_i / R' + 0,1609$	$R^2 = 0,983$
ВД-12	$d_{\text{ксп}} = -0,4827(R'_i / R')^2 + 1,3712R'_i / R' + 0,0829$	$R^2 = 0,989$
ВД-18	$d_{\text{ксп}} = -0,523(R'_i / R')^2 + 1,421R'_i / R' + 0,0326$	$R^2 = 0,991$
ВД-24	$d_{\text{ксп}} = -0,523(R'_i / R')^2 + 1,421R'_i / R' + 0,0126$	$R^2 = 0,981$

Рисунок 4.15 – Зависимость среднего диаметра капель дождя, создаваемого дождевальной насадкой с вращающимся дефлектором, от увеличения относительного радиуса полива  $R'_i / R'$  при давлении воды на выходе из сопла 0,4 МПа и диаметре сопла 8 мм

Полученные данные свидетельствуют о том, что средний диаметр капель дождя для дождевальных насадок с вращающимся дефлектором ниже в среднем на 12–18 % по сравнению со средним диаметром капель дождя, создаваемого дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью.

При сравнении среднего диаметра капель дождя было установлено, что наибольшая их величина формируется при поливе серийной дождевальной насадкой Senniger i-Wob.

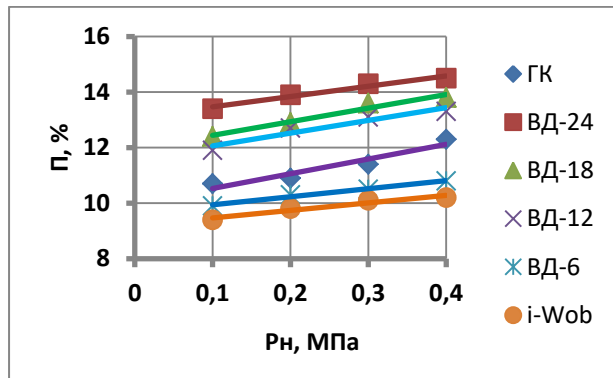
Предлагаемая дождевальная насадка обеспечивает меньшие значения среднего диаметра капель дождя по сравнению с насадкой Senniger i-Wob, и чем больше ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора, тем заметнее снижение среднего диаметра капель дождя.

Объяснить данное обстоятельство можно тем, что серийная дождевальная насадка Senniger i-Wob имеет 9 канавок на поверхности дефлектора, выполненных в виде окружности диаметром 5 мм. В процессе работы поток воды, выходящий из сопла дождевальной насадки, равномерно распределяется по данным канавкам и создается 9 струй, обеспечивающих невысокую начальную скорость полета капли за счет более медленного вращения дефлектора насадки. Струя воды, сходящая с основания дефлектора, за счет малого давления воды, низкой начальной скорости и большого диаметра при встрече с воздухом распадается на капли большого диаметра.

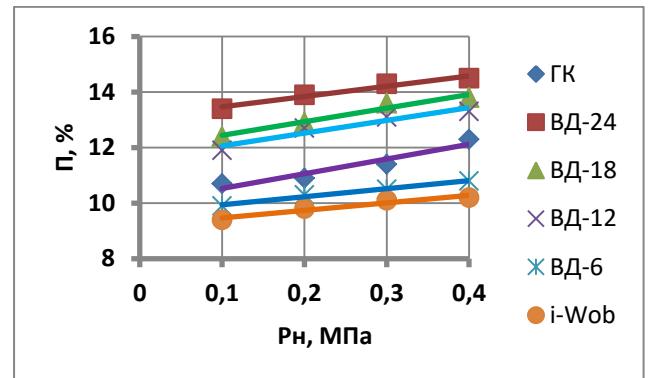
Исследования Г. Д. Пажи [112] доказывают, что разрыв пленки или струи воды на капли и формирование дождя обусловлены силами поверхностного натяжения воды, соотношением плотностей воды и воздуха, а также скоростью вылета струи воды с основания дефлектора. Поэтому при сходе с основания дефлектора струи воды большого диаметра при малой угловой скорости вращения формируются капли дождя с большим средним диаметром.

Снижение среднего диаметра капель дождя у предлагаемой дождевальной насадки по сравнению с серийной Senniger i-Wob можно объяснить тем, что увеличение количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора способствует повышению угловой скорости. Струя воды, выходящая из сопла дождевальной насадки, равномерно обтекает конусообразную рифленую поверхность дефлектора, что позволяет на сходе с основания дефлектора иметь тонкую пленку воды, которая разрушается на более мелкие капли дождя.

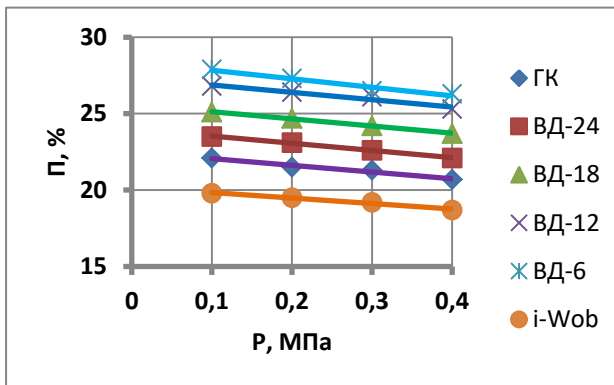
Процентное распределение диаметров капель дождя, создаваемого разными дождевальными насадками, представлено на рисунке 4.16.



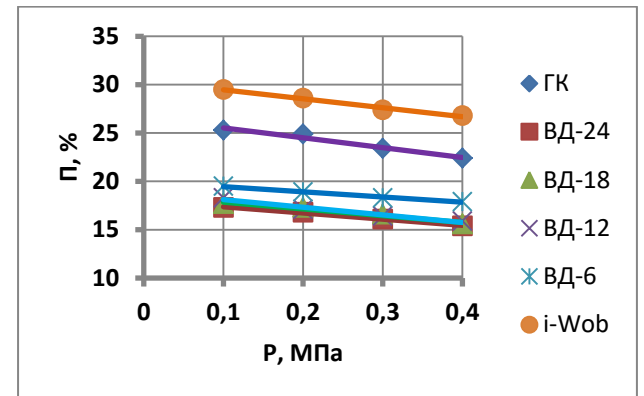
а



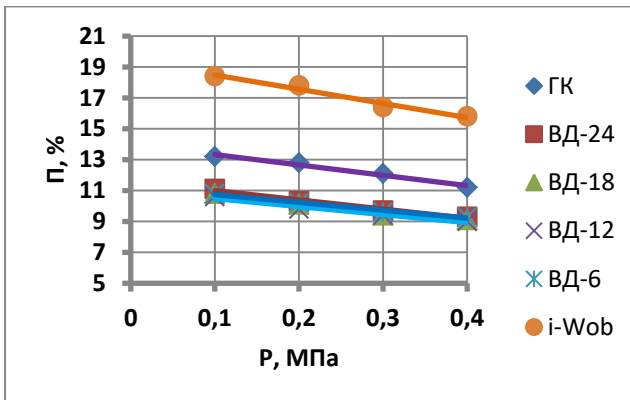
б



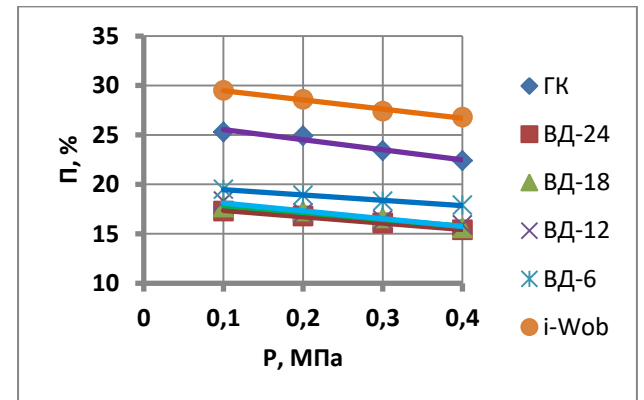
в



г



д



е

Рисунок 4.16 – Влияние давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки на процентное распределение диаметра капель дождя: а – диаметр капель дождя 0,3...0,5 мм; б – 0,6...0,8 мм; в – 1,0...1,5 мм; г – 1,6...2,0 мм; д – 2,1...3,0 мм; е – более 3,0 мм

В ходе математической обработки результатов исследований были получены аппроксимационные зависимости, представленные в приложении Г.

Установлено, что с повышением давления воды, выходящей из сопла дождевальная насадка, с 0,1 до 0,4 МПа происходит увеличение процентного содержания капель диаметром 0,3...0,5 мм для серийной дождевальной насадки, имеющей стационарный дефлектор, на 13,0 %; для серийной насадки Senniger i-Wob – на 7,8 %; для предлагаемой насадки, оснащенной дефлектором с 6 ребрами, – на 8,3 %; 12 ребрами – на 10,5 %; 18 ребрами – на 10,1 % и 24 ребрами – на 7,6 % [133].

Рассматривая распределение капель дождя диаметром 0,6...0,8 мм было установлено, что повышение давления воды с 0,1 до 0,4 МПа приводит к увеличению их количества в дождевом облаке соответственно на 13,6 %; 9,4; 10,7; 12,1; 11,9 и 14,0 %.

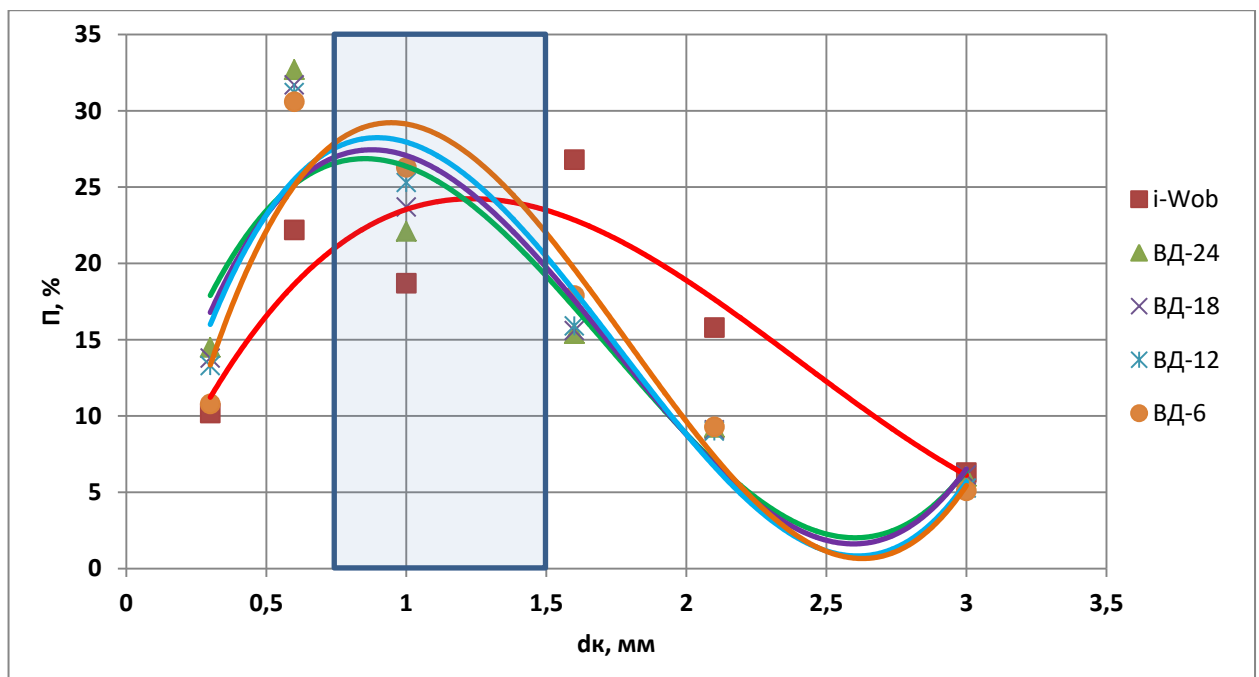
Противоположная ситуация складывается с распределением капель дождя диаметром 1,0...1,5 мм. Установлено, что повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки с 0,1 до 0,4 МПа сопровождается снижением процентного содержания капель данного диаметра в дождевом облаке на 6,7 % для стационарного дефлектора с гладкой поверхностью; на 5,9 % для серийной насадки Senniger i-Wob; на 6,1 % для предлагаемой дождевальной насадки с дефлектором, имеющим 6 ребер; на 5,9 % для дефлектора с 12 ребрами; на 6,0 % для дефлектора с 18 ребрами и на 6,3 % для дефлектора с 24 ребрами.

Аналогичная тенденция наблюдается и с каплями дождя, имеющими больший диаметр. Так, для капель дождя диаметром 1,6...2,0 мм снижение составило соответственно 12,9 %; 10,0; 8,9; 15,0; 13,5 и 12,3 %; 2,1...3,0 мм – 17,8 %; 16,5; 16,1; 17,7; 18,6 и 19,3 %.

Как видно из вышеизложенного, повышение давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки приводит к увеличению количественного состава капель дождя малого диаметра (до 0,6 мм) и уменьшению количества капель дождя диаметром более 1,5 мм.



При сравнении диаметров капель дождя, создаваемого дождевальными насадками при давлении воды 0,2 МПа, было установлено, что по сравнению с серийной дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, у серийной насадки Senniger i-Wob происходит снижение процентного содержания капель дождя диаметром 0,3...0,5 мм до 10 % и до 5,5 % для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 6 ребер, тогда как увеличение количества ребер на конусообразной рифленой поверхности дефлектора приводит к увеличению процентного содержания капель дождя соответственно на 27,5 % для дефлектора, имеющего 24 ребра, на 18,4 % для дефлектора с 18 ребрами и на 16,5 % для дефлектора, имеющего 12 ребер. Наглядно оценить влияние количества ребер на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора предлагаемой насадки на диаметр капель дождя можно по рисунку 4.17.



Senniger i-Wob	$\Pi_k = 3,341d_k^3 - 24,113d_k^2 + 44,296d_k + 0,0132$	$R^2 = 0,8043$
ВД-24	$\Pi_k = 9,2687d_k^3 - 48,018d_k^2 + 61,627d_k + 3,482$	$R^2 = 0,7946$
ВД-18	$\Pi_k = 10,151d_k^3 - 52,892d_k^2 + 69,336d_k + 0,4714$	$R^2 = 0,8423$
ВД-12	$\Pi_k = 10,86d_k^3 - 57,149d_k^2 + 76,274d_k - 2,0371$	$R^2 = 0,8816$
ВД-6	$\Pi_k = 11,994d_k^3 - 64,315d_k^2 + 89,497d_k - 8,0405$	$R^2 = 0,8987$

Рисунок 4.17 – 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 дождевальной насадки 0,4 МПа

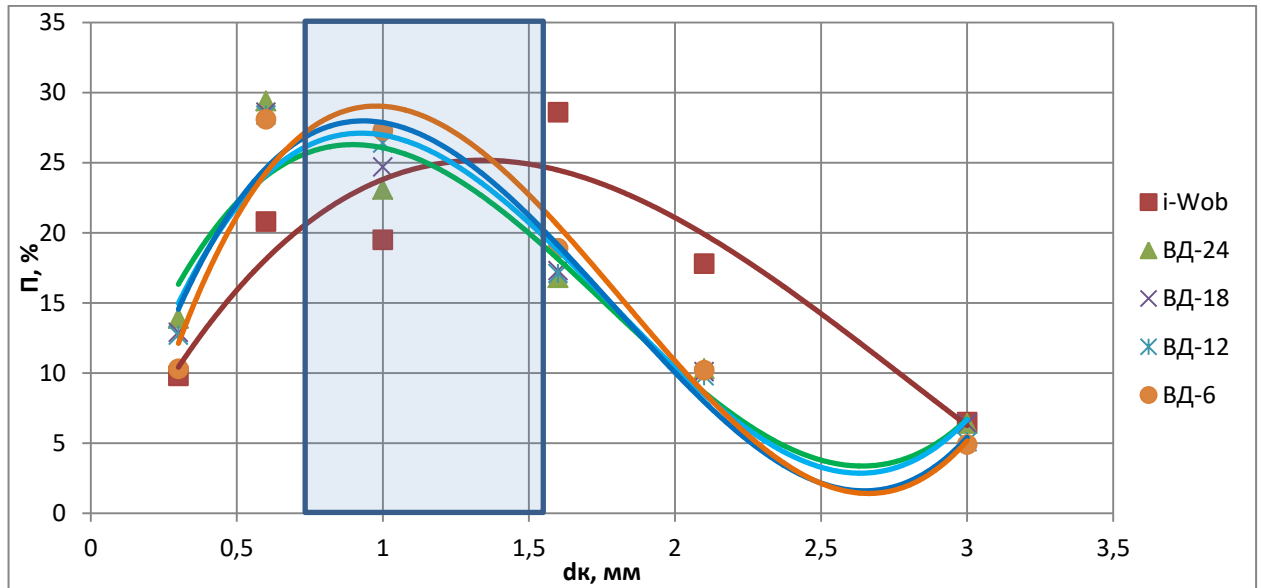
Рассматривая характер изменения процентного содержания в дожде, создаваемом дождевальными насадками при давлении воды 0,2 МПа, капель диаметром 0,6...0,8 мм, можно утверждать, что по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, происходит снижение этого показателя на 14,0 % для серийной насадки Senniger i-Wob и его увеличение для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором на 21,5 % (24 ребра); на 18,2 % (18 ребер); на 17,3 % (12 ребер) и на 16,1 % (6 ребер). Аналогичная ситуация просматривается и для капель дождя диаметром 1,0...1,5 мм – соответственно на 9,3 %; 7,4; 14,8; 22,7 и на 26,9 %.

Другой характер распределения процентного содержания капель дождя, создаваемого дождевальными насадками при давлении воды 0,2 МПа, прослеживается при диаметре 1,6...2,0 мм. Установлено, что по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, процентное содержание капель дождя увеличивается на 14,8 % у серийной насадки Senniger i-Wob и уменьшается при использовании предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором соответственно на 32,5 % (24 ребра); на 30,5 % (18 ребер); на 31,3 % (12 ребер) и на 24,1 % (6 ребер). Аналогичные изменения характерны и для капель дождя диаметром 2,1...3,0 мм – соответственно 39,1 %; 19,5; 21,1; 23,4 и 20,3 %.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что использование вращающегося дефлектора на дождевальной насадке позволяет создавать дождь с более малым диаметром капель, который можно регулировать скоростью вращения дефлектора путем нарезания ребер на его конусообразной рифленой поверхности.

Так, для создания дождевого облака с большим процентным содержанием капель дождя диаметром 0,6...1,5 мм необходимо применять дождевальную насадку с вращающимся дефлектором с конусообразной рифленой поверхностью, на которой выполнено 6 ребер. Создаваемый ею дождь имеет больше на 18,7 % капель диаметром 0,6...1,5 мм по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, при давлении воды на выходе из сопла 0,4 МПа. При снижении давления воды до 0,2 МПа, которое наиболее востребовано в конце трубопровода дождевальной машины, процентное содержания капель такого диаметра увеличивается на 21,2 %. Аналогичная тенденция просматривается и по сравнению с дожде-

вальной насадкой Senniger i-Wob: процентное содержание капель дождя диаметром 0,6...1,5 мм увеличивается соответственно на 23,1 и 29,8 % (рисунок 4.18).



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 4.18 – 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

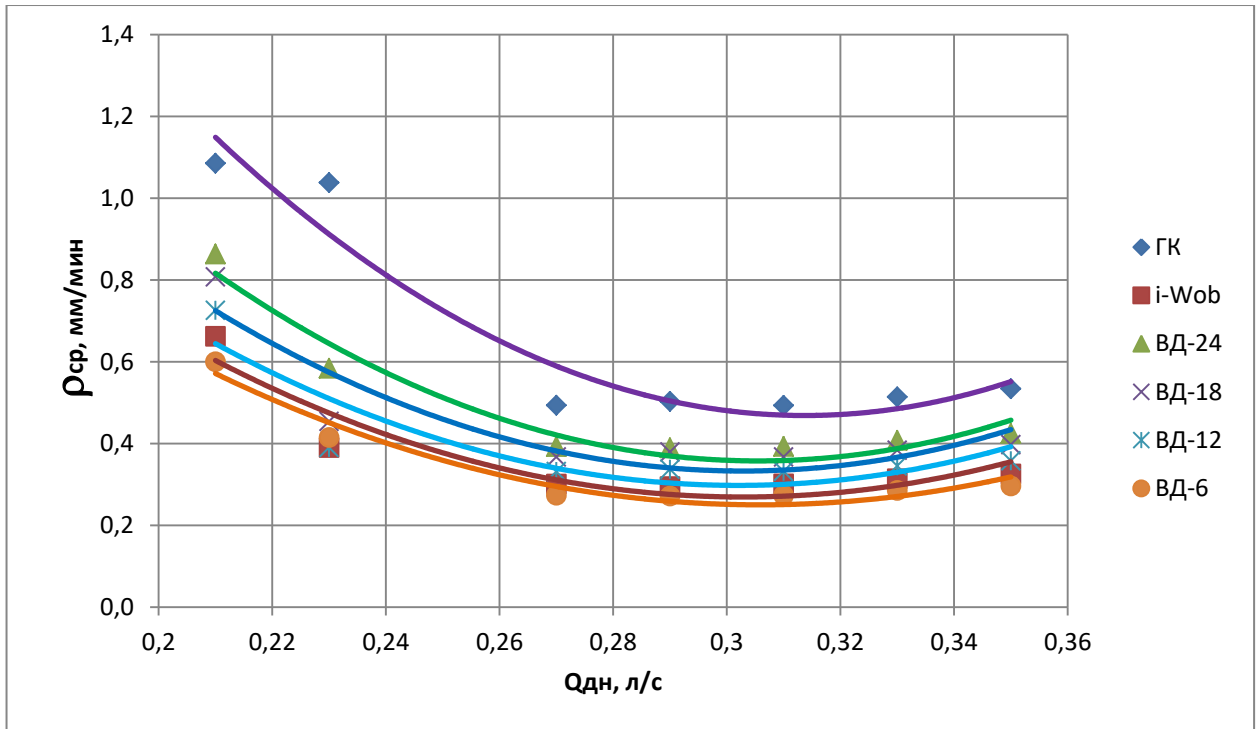
Помимо диаметра капель дождя и их процентного содержания в дождевом облаке другим важным показателем, характеризующим качество дождя, является его интенсивность.

#### 4.1.5 Распределение интенсивности дождя вдоль радиуса полива дождевальными насадками

Для оценки качественных показателей дождя используют его среднюю и мгновенную интенсивности, которые оказывают большое влияние на определение нормы полива до образования стока воды с поверхности поля.

Среднюю интенсивность дождя, создаваемого дождевальными насадками, определяли по формуле (3.5). В ходе исследований было установлено, что на вели-

чину средней интенсивности дождя оказывает влияние расход воды, который зависит от давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки (рисунок 4.19).



ГК	$\rho_{\text{ср}} = 63,211Q_{\text{дн}}^2 - 39,665Q_{\text{дн}} + 6,6911$	$R^2 = 0,9299$
Senniger i-Wob	$\rho_{\text{ср}} = 35,695Q_{\text{дн}}^2 - 21,832Q_{\text{дн}} + 3,5935$	$R^2 = 0,9563$
ВД-24	$\rho_{\text{ср}} = 50,352Q_{\text{дн}}^2 - 30,765Q_{\text{дн}} + 5,0569$	$R^2 = 0,9484$
ВД-18	$\rho_{\text{ср}} = 45,498Q_{\text{дн}}^2 - 27,557Q_{\text{дн}} + 4,5053$	$R^2 = 0,8331$
ВД-12	$\rho_{\text{ср}} = 40,997Q_{\text{дн}}^2 - 24,759Q_{\text{дн}} + 4,0357$	$R^2 = 0,8023$
ВД-6	$\rho_{\text{ср}} = 38,741Q_{\text{дн}}^2 - 23,464Q_{\text{дн}} + 3,822$	$R^2 = 0,8761$

Рисунок 4.19 – Изменение средней интенсивности дождя, образованного дождевальными насадками с диаметром выходного отверстия сопла 3 мм в зависимости от расхода воды

Установлено, что для дождевальной насадки с диаметром отверстия сопла 3 мм, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, происходит снижение средней интенсивности дождя с 1,085 до 0,493 мм/мин при увеличении расхода воды с 0,21 до 0,27 л/с. При дальнейшем увеличении расхода воды с 0,27 до 0,35 л/с средняя интенсивность дождя возрастает до 0,534 мм/мин.

Аналогичная ситуация характерна и для других дождевальных насадок: для Senniger i-Wob средняя интенсивность дождя изменяется от 0,277 до 0,612 мм/мин; для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором,

имеющем 24 ребра, – от 0,389 до 0,863 мм/мин; 18 ребер – от 0,367 до 0,807 мм/мин; 12 ребер – от 0,331 до 0,725 мм/мин; 6 ребер – от 0,294 до 0,662 мм/мин.

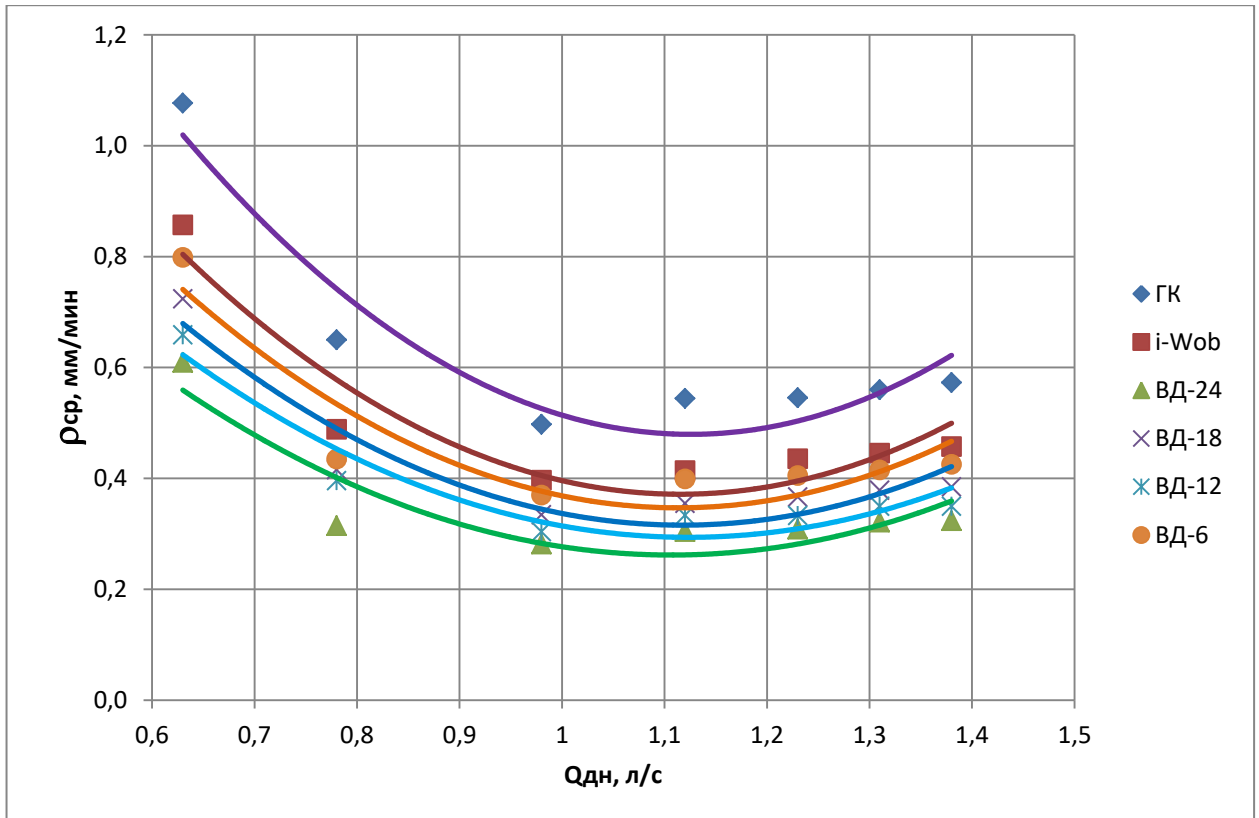
Как видно, наибольшую среднюю интенсивность дождя обеспечивает дождевальная насадка со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность. У дождевальных насадок с вращающимся дефлектором этот показатель меньше на 47,1 % (Senniger i-Wob), 25,8 % (предлагаемая дождевальная насадка с дефлектором с конусообразной рифленой поверхностью, имеющей 24 ребра); 32,2 % (18 ребер); 39,5 % (12 ребер) и 44,4 % (6 ребер).

Несмотря на значительные расхождения средних значений средней интенсивности дождя, создаваемого дождевальными насадками, все же этот показатель находится в оптимальной зоне для многих почв.

Увеличение диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки вызывает повышение расхода воды, что оказывает влияние на среднюю интенсивность дождя (рисунок 4.20). Характер изменения средней интенсивности дождя с увеличением диаметра сопла дождевальной насадки носит идентичный характер, что и для меньших диаметров сопел, только с другими числовыми параметрами.

Так, для дождевальной насадки с дефлектором с гладкой поверхностью средняя интенсивность дождя составляет 0,497...1,077 мм/мин; Senniger i-Wob – 0,281...0,609 мм/мин; для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющей 24 ребра, – 0,303...0,659 мм/мин; 18 ребер – 0,334...0,723 мм/мин; 12 ребер – 0,369...0,798 мм/мин; 6 ребер – 0,396...0,857 мм/мин.

Согласно полученным данным, наибольшую среднюю интенсивность дождя обеспечивает дождевальная насадка со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность. Установка на дождевальную насадку вращающегося дефлектора способствует снижению этого показателя. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что средняя интенсивность дождя зависит от площади полива, а у дождевальных насадок с вращающимся дефлектором радиус полива больше, следовательно, выше площадь полива.

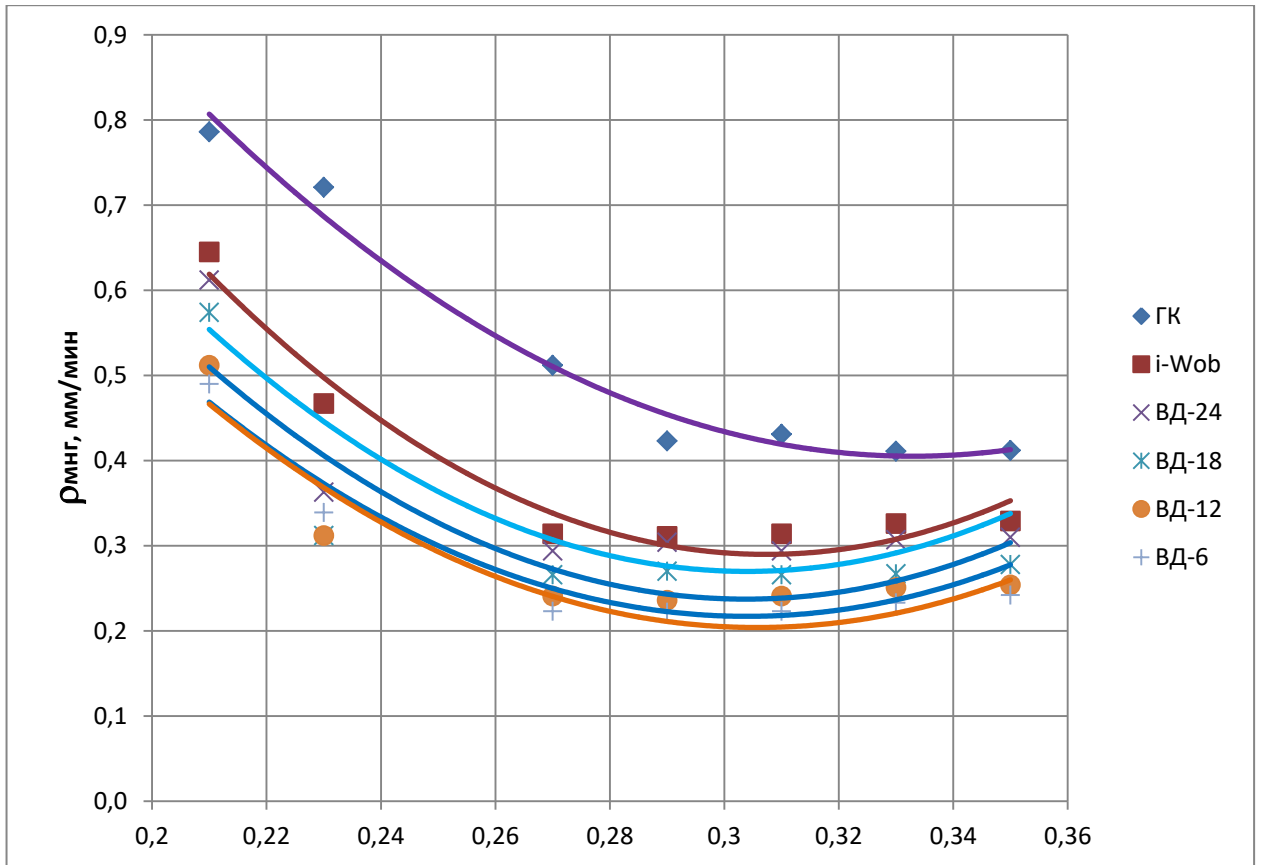


ГК	$\rho_{\text{ср}} = 2,1989Q_{\text{дн}}^2 - 4,9498Q_{\text{дн}} + 3,2649$	$R^2 = 0,9126$
Senniger i-Wob	$\rho_{\text{ср}} = 1,3078Q_{\text{дн}}^2 - 2,8952Q_{\text{дн}} + 1,8641$	$R^2 = 0,8238$
ВД-24	$\rho_{\text{ср}} = 1,3534Q_{\text{дн}}^2 - 3,0404Q_{\text{дн}} + 2,0013$	$R^2 = 0,9082$
ВД-18	$\rho_{\text{ср}}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

Рисунок 4.20 – Изменение средней интенсивности дождя дождевальных насадок с диаметром выходного отверстия сопла 8 мм в зависимости от расхода воды

Аналогичная ситуация прослеживается и относительно мгновенной интенсивности дождя, создаваемого дождевальными насадками разных типов (рисунки 4.21, 4.22).

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что мгновенная интенсивность дождя, создаваемого дождевальной насадкой, имеющей диаметр выходного отверстия сопла 3 мм, меньше средней интенсивности дождя и находится в диапазоне: для дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью – 0,411...0,786 мм/мин; для Senniger i-Wob – 0,311...0,645 мм/мин; для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющей 24 ребра, – 0,294...0,612 мм/мин, 18 ребер – 0,266...0,574 мм/мин, 12 ребер – 0,236...0,512 мм/мин, 6 ребер – 0,222...0,49 мм/мин (см. рисунок 4.21).

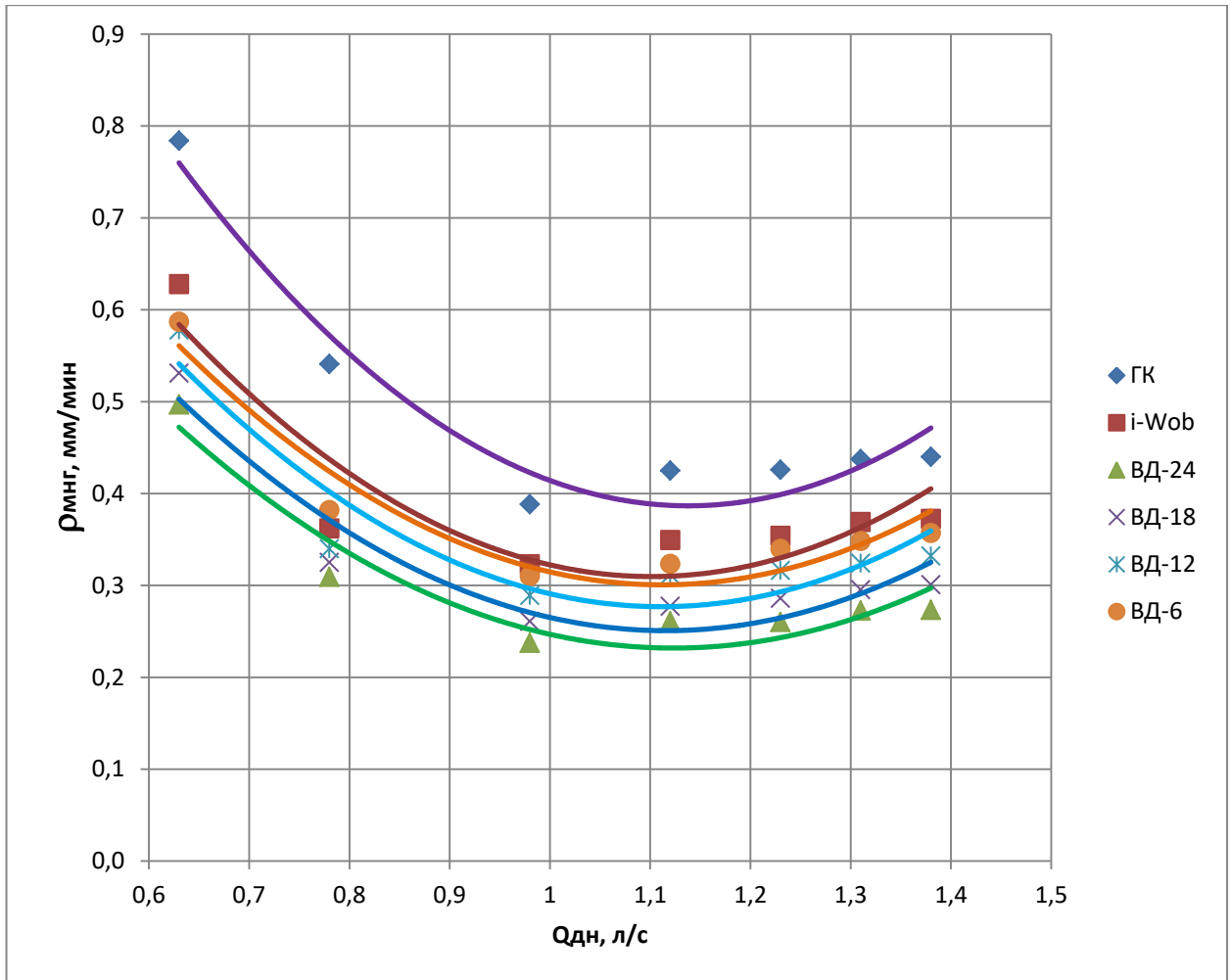


ГК	$\rho_{\text{мнг}} = 26,575Q_{\text{дн}}^2 - 17,697Q_{\text{дн}} + 3,3512$	$R^2 = 0,9819$
Senniger i-Wob	$\rho_{\text{мнг}} = 34,698Q_{\text{дн}}^2 - 21,33Q_{\text{дн}} + 3,5679$	$R^2 = 0,9606$
ВД-24	$\rho_{\text{мнг}} = 32,157Q_{\text{дн}}^2 - 19,552Q_{\text{дн}} + 3,2417$	$R^2 = 0,9515$
ВД-18	$\rho_{\text{мнг}} = 31,012Q_{\text{дн}}^2 - 18,84Q_{\text{дн}} + 3,0989$	$R^2 = 0,9536$
ВД-12	$\rho_{\text{мнг}} = 28,522Q_{\text{дн}}^2 - 17,337Q_{\text{дн}} + 2,8518$	$R^2 = 0,9612$
ВД-6	$\rho_{\text{мнг}} = 28,615Q_{\text{дн}}^2 - 17,499Q_{\text{дн}} + 2,8793$	$R^2 = 0,9565$

Рисунок 4.21 – Изменение мгновенной интенсивности дождя, создаваемого дождевальными насадками с диаметром выходного отверстия сопла 3 мм в зависимости от расхода воды

Аналогичные изменения характерны и для дождевальных насадок, имеющих диаметр выходного отверстия сопла 8 мм (см. рисунок 4.22).

Исходя из вышеизложенного и данных проведенных исследований, можно утверждать, что с увеличением расхода дождевальных насадок лучшими показателями средней и мгновенной интенсивности дождя обладают дождевальные насадки предлагаемой конструкции с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.



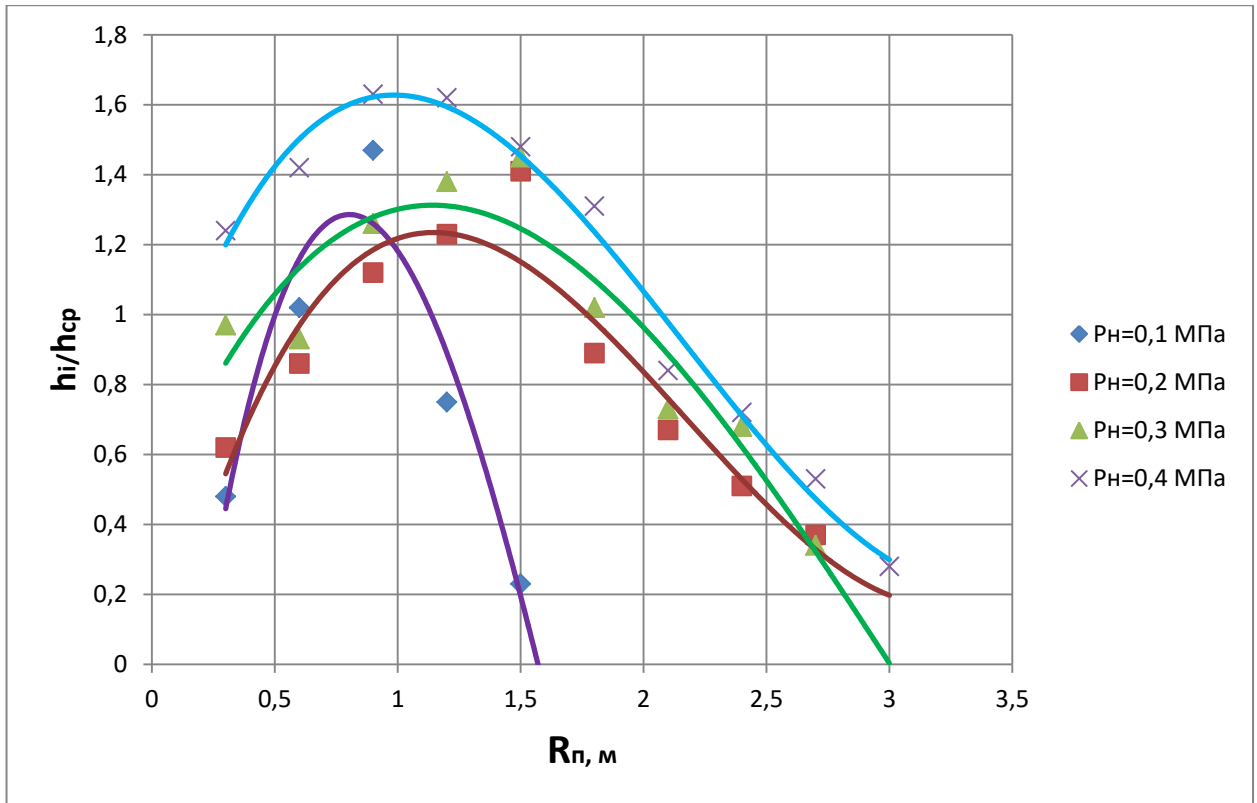
ГК	$\rho_{\text{мнг}} = 1,4461Q_{\text{дн}}^2 - 3,2915Q_{\text{дн}} + 2,2597$	$R^2 = 0,9574$
Senniger i-Wob	$\rho_{\text{мнг}} = 1,2848Q_{\text{дн}}^2 - 2,8437Q_{\text{дн}} + 1,83$	$R^2 = 0,9538$
ВД-24	$\rho_{\text{мнг}} = 1,0564Q_{\text{дн}}^2 - 2,3736Q_{\text{дн}} + 1,5629$	$R^2 = 0,9482$
ВД-18	$\rho_{\text{мнг}} = 1,0676Q_{\text{дн}}^2 - 2,3826Q_{\text{дн}} + 1,5801$	$R^2 = 0,9562$
ВД-12	$\rho_{\text{мнг}} = 1,1424Q_{\text{дн}}^2 - 2,5385Q_{\text{дн}} + 1,6871$	$R^2 = 0,9578$
ВД-6	$\rho_{\text{мнг}} = 1,12Q_{\text{дн}}^2 - 2,4908Q_{\text{дн}} + 1,6856$	$R^2 = 0,9519$

Рисунок 4.22 – Изменение мгновенной интенсивности дождя, создаваемого дождевальными насадками с диаметром выходного отверстия сопла 8 мм в зависимости от расхода воды

Поскольку интенсивность дождя не в полной мере отражает равномерность полива и определяется средними показателями, то необходимо оценить характер распределения слоя осадков вдоль радиуса полива, который даст полную картину происходящего процесса полива при малом давлении воды.

Характер распределения слоя дождя вдоль радиуса полива, создаваемого дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, установленной на высоте 1,0 м, показан на рисунке 4.23.





$P_{н} = 0,1$ МПа	$h_i/h_{cp} = 0,8951R_{п}^3 - 5,0278R_{п}^2 + 6,3444R_{п} - 1,03$	$R^2 = 0,9075$
$P_{н} = 0,2$ МПа	$h_i/h_{cp} = 0,2173R_{п}^3 - 1,4071R_{п}^2 + 2,1386R_{п} - 0,6787$	$R^2 = 0,9818$
$P_{н} = 0,3$ МПа	$h_i/h_{cp} = 0,0954R_{п}^3 - 0,8835R_{п}^2 + 1,6446R_{п} - 0,4448$	$R^2 = 0,8688$
$P_{н} = 0,4$ МПа	$h_i/h_{cp} = 0,245R_{п}^3 - 1,5987R_{п}^2 + 2,6991R_{п} - 0,1276$	$R^2 = 0,888$

Рисунок 4.23 – Характер распределения слоя дождя ( $h_i/h_{cp}$ ) вдоль радиуса полива дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью, имеющей диаметр выходного отверстия сопла 3 мм

Анализируя характер распределения слоя дождя, создаваемого дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью, было установлено, что при давлении воды на выходе из сопла 0,1 МПа происходит наибольшее выпадение осадков в виде капель дождя большого диаметра в конце струи. В середине струи слой выпавших осадков в 3 раза выше по сравнению со слоем осадков в начале и конце струи, но дождь состоит из капель разного диаметра.

При дальнейшем увеличении давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки до 0,4 МПа происходит распад струи на мелкие капли дождя с более равномерным распределением вдоль радиуса полива. Но наибольший слой выпадающих осадков находится примерно в середине радиуса полива, т. е. с увеличением радиуса полива с 0,3 до 1,5 м происходит интенсивный рост слоя выпавших

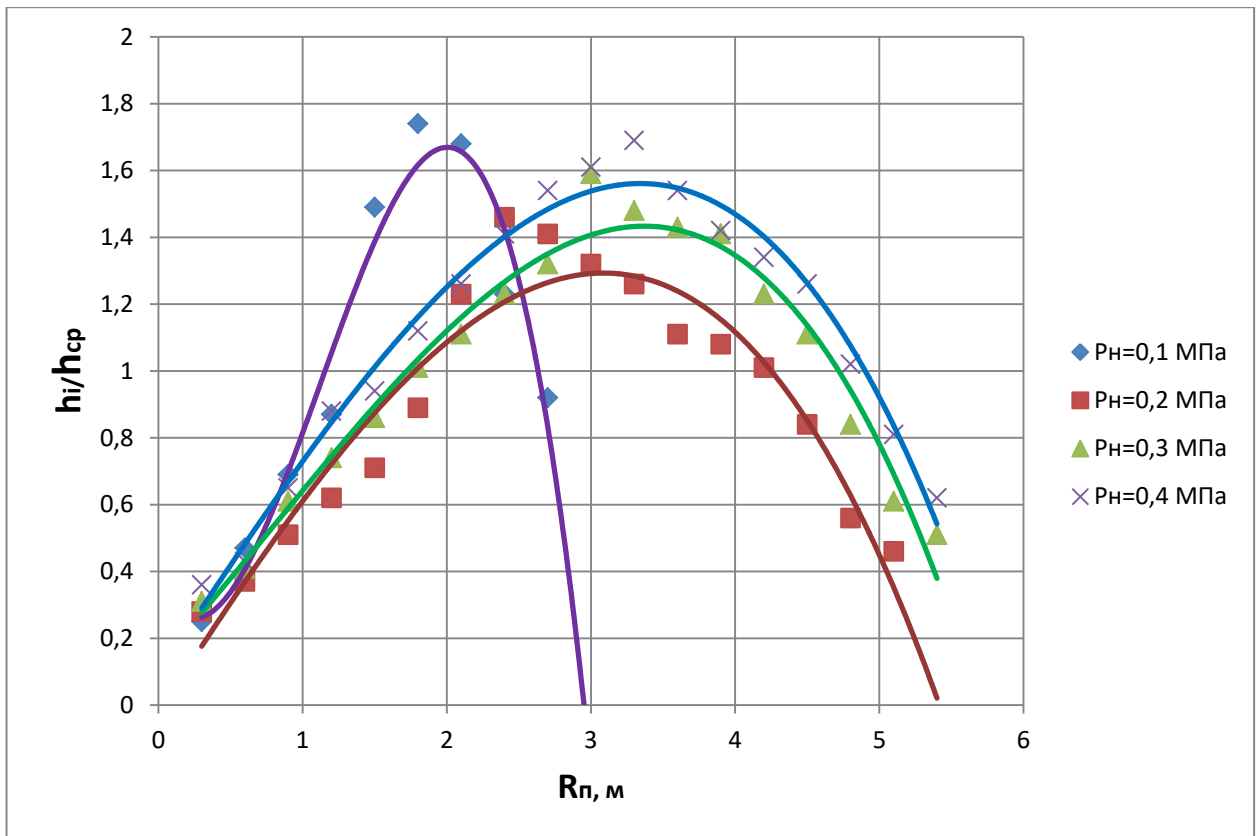
осадков до 56 % при давлении воды 0,2 МПа и до 33,1 % при давлении 0,3 МПа. Дальнейшее увеличение радиуса полива приводит к снижению слоя выпавших осадков. Однако при давлении воды на выходе из дождевальной насадки 0,4 МПа происходит смещение максимального слоя выпавших осадков ближе к началу радиуса полива, наибольшее значение зафиксировано при радиусе полива 0,9 м.

Рассматривая характер распределения слоя выпавшего дождя, создаваемого дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью и диаметром выходного отверстия сопла насадки 8 мм (рисунок 4.24), можно зафиксировать смещение наибольшей величины выпавшего слоя осадков относительно середины радиуса полива в сторону его окончания. Так, при давлении воды на выходе из сопла дождевальной насадки 0,1 МПа происходит 7-кратный рост количества выпавших осадков при увеличении радиуса полива с 0,3 до 1,8 м, затем наблюдается уменьшение этого показателя до минимального значения на конце радиуса полива, равного 2,7 м.

При давлении воды 0,2 МПа происходит 5-кратное возрастание слоя выпавшего дождя при увеличении радиуса полива с 0,3 до 2,4 м, затем этот показатель снижается, но в конце радиуса полива он становится на 39,1 % выше по сравнению с началом радиуса полива.

Аналогичная ситуация наблюдается и при дальнейшем повышении давления воды, выходящей из сопла дождевальной насадки, до 0,4 МПа. Слой выпавшего дождя становится больше, что вызвано увеличением расхода воды, проходящей через насадку. Количество осадков также имеет максимальное значение, смещенное от середины радиуса полива к его концу.

Из полученных результатов исследований видно, что с увеличением давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки и диаметра выходного отверстия сопла происходит более равномерное распределение слоя дождя. Однако имеет место многократное расхождение слоя выпавших осадков в середине и по краям радиуса полива. Все это характеризует высокую неравномерность полива серийной дождевальной насадкой, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью.



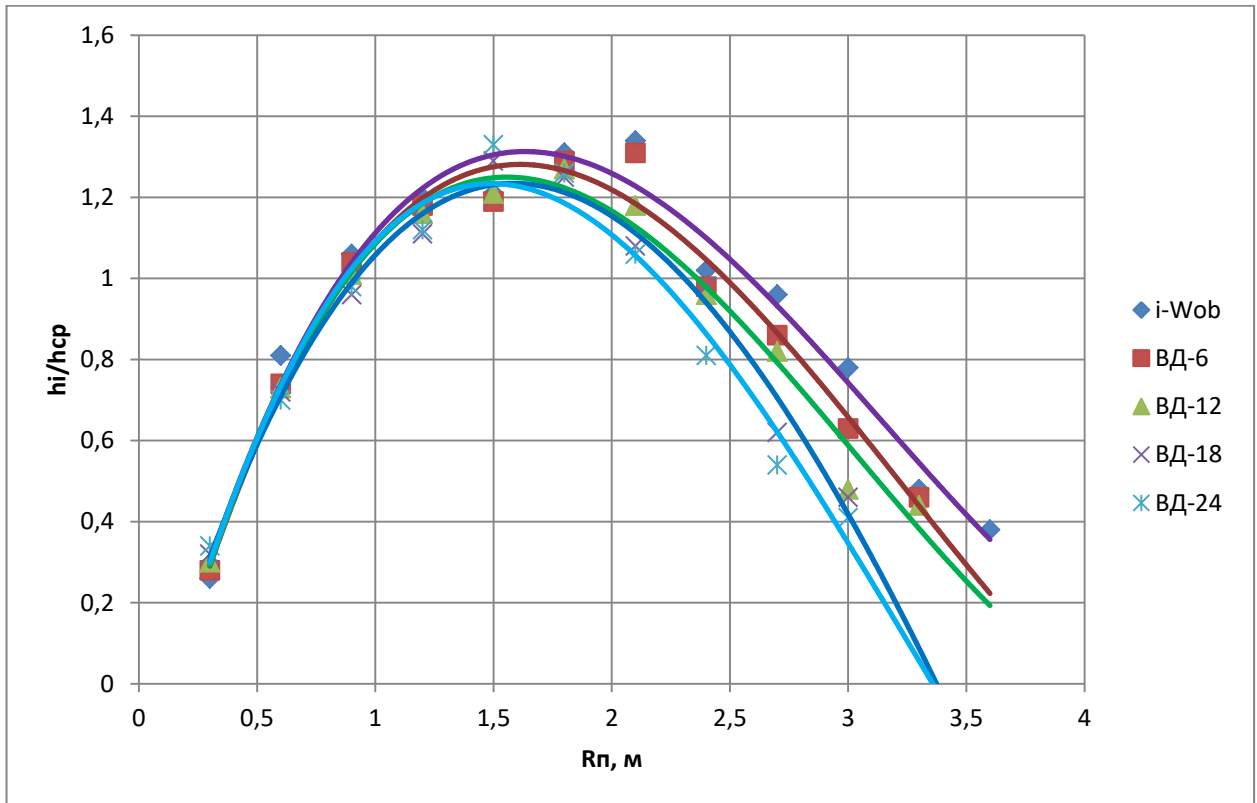
$P_n = 0,1 \text{ МПа}$	$h_i/h_{cp} = -0,5188R_n^3 + 1,7516R_n^2 - 0,7683R_n + 0,3497$	$R^2 = 0,9516$
$P_n = 0,2 \text{ МПа}$	$h_i/h_{cp} = -0,0185R_n^3 - 0,0241R_n^2 + 0,6773R_n - 0,0246$	$R^2 = 0,9513$
$P_n = 0,3 \text{ МПа}$	$h_i/h_{cp} = -0,026R_n^3 + 0,0604R_n^2 + 0,4794R_n + 0,1277$	$R^2 = 0,9686$
$P_n = 0,4 \text{ МПа}$	$h_i/h_{cp} = -0,0203R_n^3 + 0,0047R_n^2 + 0,65R_n + 0,095$	$R^2 = 0,9787$

Рисунок 4.24 – Характер распределения слоя осадков дождя ( $h_i/h_{cp}$ ) вдоль радиуса полива дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью, имеющей диаметр выходного отверстия сопла 8 мм

Проводя анализ слоя дождя, созданного дождевальными насадками с вращающимся дефлектором, можно отметить более ровный характер его распределения вдоль радиуса полива (рисунок 4.25).

Для дождевальных насадок с вращающимся дефлектором, установленных на высоте 1,0 м относительно дневной поверхности (что соответствует приповерхностному поливу) и работающих при давлении воды 0,2 МПа (что соответствует давлению воды в конце трубопровода дождевальной машины), выходящей из сопла насадки диаметром 3 мм, было установлено, что наименьший слой осадков приходится на начало и конец радиуса полива, а наибольший – на середину, за исключением дождевальной насадки Senniger i-Wob, у которой большая часть осадков выпадает ближе к концу радиуса полива.

Наибольшая величина слоя осадков дождя зафиксирована у дождевальной насадки Senniger i-Wob, но она на 7,2 % меньше по сравнению со слоем дождя, сформированного серийной дождевальной насадкой со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью при тех же условиях.



Senniger i-Wob	$h_i/h_{cp} = 0,097R_n^3 - 0,9141R_n^2 + 2,2101R_n - 0,281$	$R^2 = 0,9707$
ВД-24	$h_i/h_{cp} = 0,0995R_n^3 - 0,9854R_n^2 + 2,2757R_n - 0,2983$	$R^2 = 0,9663$
ВД-18	$h_i/h_{cp} = 0,0575R_n^3 - 0,7606R_n^2 + 1,9752R_n - 0,2143$	$R^2 = 0,9798$
ВД-12	$h_i/h_{cp} = 0,1072R_n^3 - 0,9725R_n^2 + 2,2481R_n - 0,2973$	$R^2 = 0,9801$
ВД-6	$h_i/h_{cp} = 0,0931R_n^3 - 0,9034R_n^2 + 2,1873R_n - 0,287$	$R^2 = 0,9743$

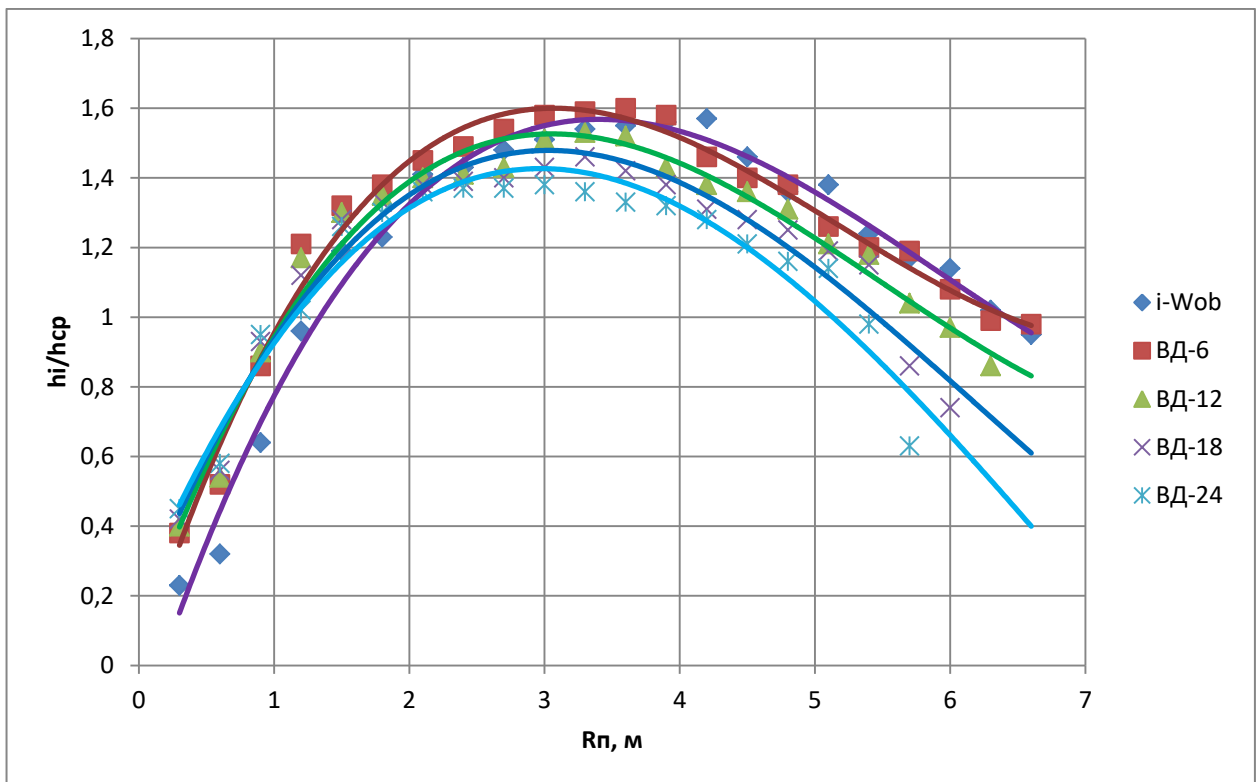
Рисунок 4.25 – Характер распределения слоя осадков дождя ( $h_i/h_{cp}$ ) вдоль радиуса полива дождевальными насадками с вращающимся дефлектором (диаметр выходного отверстия сопла 3 мм, давление воды на выходе из сопла 0,2 МПа)

У предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором снижение максимального слоя выпавших осадков по сравнению с дождевальной насадкой Senniger i-Wob составило для дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющей 6 ребер, – 4,2 %; 12 ребер – 5,5 %; 18 ребер – 7,2 % и для дефлектора, имеющего 24 ребра, – 6,3 %.

Также следует отметить, что равномерное распределения слоя выпавших осадков для дождевальных насадок с вращающимся дефлектором происходит на большей длине радиуса полива по сравнению с серийной дождевальной насадкой,

имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью. С увеличением диаметра выходного отверстия сопла дождевальной насадки равномерность распределения слоя осадков вдоль радиуса полива повышается.

Установлено, что для дождевальных насадок с диаметром выходного отверстия сопла 8 мм, при давлении воды 0,2 МПа и установке на высоте 1,0 м относительно дневной поверхности (рисунок 4.26), слой выпавшего дождя распределяется по длине радиуса полива от 1,2 до 1,6 м для серийной дождевальной насадки со стационарным дефлектором и от 1,5 м до 5,7 м для Senniger i-Wob, что составляет соответственно 70,1 и 68,2 %. Для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 6 ребер на рифленой конусообразной поверхности, равномерность распределения слоя выпавшего дождя вдоль радиуса полива составляет 76,2 %; для дефлектора с 12 ребрами – 71,4 %; с 18 ребрами – 65,1 % и для дефлектора, имеющего 24 ребра, – 57,8 %.



Senniger i-Wob	$h_i/h_{cp} = 0,0138R_n^3 - 0,2451R_n^2 + 1,1892R_n - 0,1843$	$R^2 = 0,983$
ВД-24	$h_i/h_{cp} = 0,0091R_n^3 - 0,1922R_n^2 + 0,901R_n + 0,2076$	$R^2 = 0,9507$
ВД-18	$h_i/h_{cp} = 0,0114R_n^3 - 0,2123R_n^2 + 0,9731R_n + 0,1632$	$R^2 = 0,9551$
ВД-12	$h_i/h_{cp} = 0,0148R_n^3 - 0,2439R_n^2 + 1,0746R_n + 0,0967$	$R^2 = 0,9722$
ВД-6	$h_i/h_{cp} = 0,018R_n^3 - 0,2798R_n^2 + 1,2075R_n + 0,0078$	$R^2 = 0,9788$

Рисунок 4.26 – Характер распределения слоя дождя ( $h_i/h_{cp}$ ) вдоль радиуса полива дождевальными насадками с вращающимся дефлектором (диаметр выходного отверстия сопла 8 мм, давление воды на выходе из сопла 0,2 МПа)

Анализ данных свидетельствует о том, что более равномерным распределением слоя дождя характеризуется предлагаемая дождевальная насадка, у которой на вращающемся дефлекторе конусообразной формы с рифленой поверхностью выполнено 6 или 12 ребер.

Данное обстоятельство можно объяснить тем, что вращение дефлектора способствует формированию дождя с оптимальным количеством капель диаметром 0,6...1,5 мм, которые равномерно распределяются вдоль радиуса полива.

#### **4.2 Расстановка дождевальных насадок на трубопроводе дождевальной машины**

Одним из главных качественных показателей дождя, создаваемого дождевальными насадками, является его равномерное распределение по площади полива. Равномерность полива находится в прямой зависимости с потерями урожая. В связи с этим необходимо решать вопрос, касающийся установки дождевальных насадок на трубопроводе дождевальной машины. При этом следует создавать необходимое перекрытие площадей полива между соседними дождевальными насадками, обеспечивая равномерный полив. При установке нужно учитывать конструктивные особенности дождевальной насадки и дождевальной машины, а также условия их применения (природные факторы в виде скорости и направления ветра, температуры окружающей среды и т. д.).

В связи с вышеизложенным нами рекомендуются оптимальные расстояния размещения дождевальных насадок на трубопроводе широкозахватной дождевальной машины кругового действия, имеющей давление воды на входе в ДМ до 0,2 МПа:

- серийные дождевальные насадки со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность, – 3,0 м;
- дождевальные насадки Senniger i-Wob – 3,5 м;
- дождевальные насадки предлагаемой конструкции с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью – 4,0 м.

С увеличением давления воды на входе в трубопровод дождевальной машины с 0,2 до 0,4 МПа рекомендуется следующее расстояние установки между дождевальными насадками:

- серийные дождевальные насадки со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность, – 3,5 м;
- дождевальные насадки Senniger i-Wob – 4,0 м;
- дождевальные насадки предлагаемой конструкции с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью – 5,0 м.

При длине трубопровода дождевальной машины более 300 м рекомендуется установка дождевальных насадок комбинированным способом: с начала трубопровода до его середины необходимо устанавливать дождевальные насадки со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность, а после середины до окончания трубопровода – предлагаемые дождевальные насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющей 6 и 12 ребер. Это позволит повысить эффективность полива сельскохозяйственных культур дождевальными машинами кругового действия.

#### **4.3 Потери воды на испарение и снос ветром при поливе дождевальными насадками**

В процессе полива сельскохозяйственных культур с помощью дождевальных насадок, установленных на широкозахватных дождевальных машинах кругового действия, происходят потери дождя, связанные с испарением и сносом ветром. На величину испарения и сноса ветром дождя сильное влияние оказывают диаметр капель дождя, высота подъема дождевого облака, температура воздуха, скорость ветра и другие факторы.

Оценить потери воды на испарение и снос ветром  $E_{исв}$  в процессе полива можно с помощью разработанного метода [125] и зависимости [148, 149, 150]:

$$E_{исв} = 1,22 \frac{h_{под}^{0,6}}{d_k^{0,6} \rho_{ср}^{0,2} \rho_{мг}^{0,1}} \left[ \left( 1 - \frac{\omega_B}{100} \right) (v_{вет} + 1) \right]^{0,5} K_{\alpha}, \quad (4.4)$$

где  $h_{\text{под}}$  – высота подъема капель дождя над дневной поверхностью поля, м;

$d_{\text{к}}$  – средний диаметр капель, мм;

$\rho_{\text{ср}}, \rho_{\text{мг}}$  – средняя и мгновенная интенсивность дождя, мм/мин;

$\omega_{\text{в}}$  – относительная влажность воздуха, %;

$u_{\text{вет}}$  – скорость ветра, м/с;

$K_{\alpha}$  – коэффициент зависимости величины испарения и сноса дождя от угла между трубопроводом машины и направлением ветра;

$$K_{\alpha} = 1 - 0,009(90 - \alpha'_0). \quad (4.5)$$

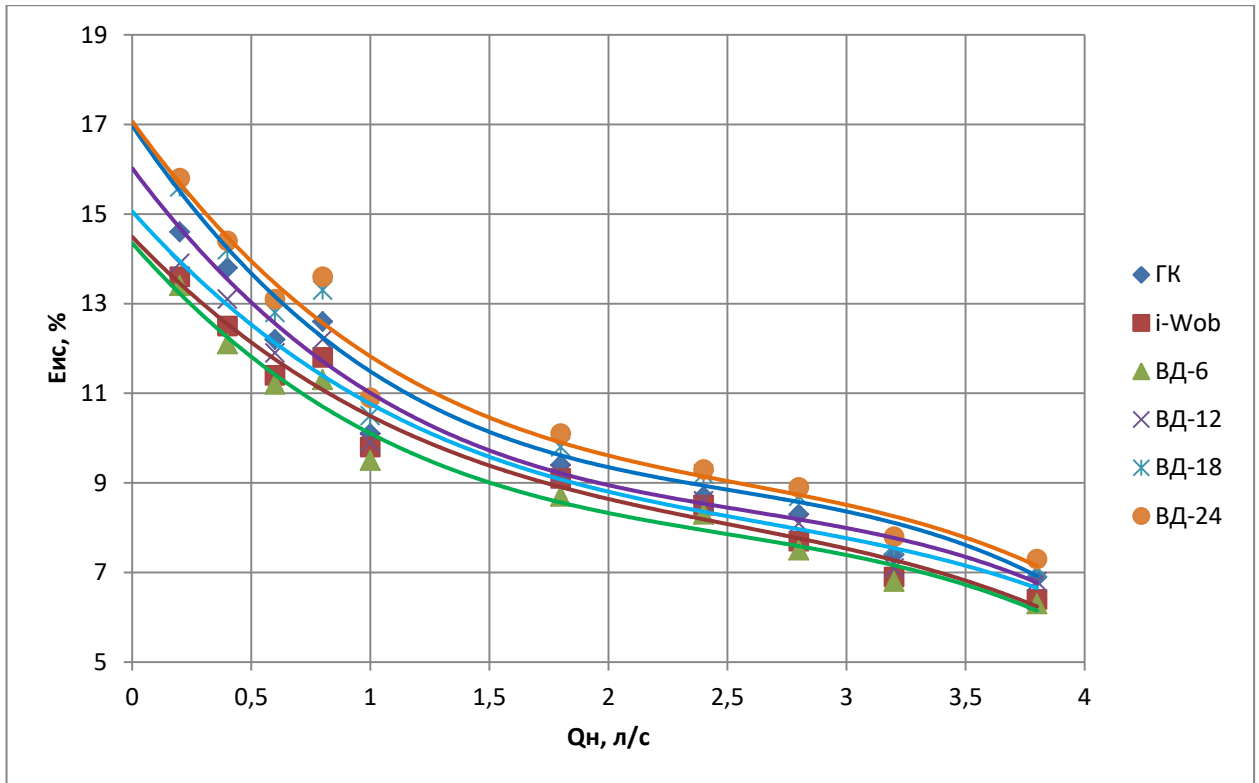
Полевые исследования проводили на полях УНПО «Поволжье» (Саратовская область, Энгельсский район, с. Степное) и ООО «Наше дело» (Саратовская область, Энгельсский район, с. Ленинское).

Дождевальные машины «Каскад» («Кубань-ЛК1») были оборудованы дождевальными насадками со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность, и с вращающимися дефлекторами. По всей длине дождевальной машины устанавливали мерные емкости, с помощью которых замеряли объем воды, вылитой из дождевальных насадок. Метеорологические условия при проведении опытов: температура воздуха – +20,8 °С, относительная влажность воздуха – 59 %, скорость ветра – 1 м/с, коэффициент метеорологической напряженности по В. С. Хабарову – 29.

Анализ полученных данных показал, что при поливе дождевальной машиной «Каскад» («Кубань-ЛК1»), оснащенной дождевальными насадками со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность, потери воды на испарение и снос ветром  $E_{\text{ис}}$  составили 6,9–14,6 % (рисунок 4.27). Наибольшие значения этого показателя зафиксированы в начале трубопровода дождевальной машины. К концу трубопровода наблюдалось снижение потерь воды. При этом в среднем потери воды на испарение снос ветром составили 10,4 %.

Аналогичная ситуация прослеживается и для остальных дождевальных насадок. Так, для Senniger i-Wob средние потери воды на испарение и снос составили 9,8 %, при этом в начале трубопровода ДМ зафиксировано наибольшее их значение 13,6 %, а в конце – 6,4 %.





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

Рисунок 4.27 – 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

Для предлагаемых дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью средние потери воды на испарение и снос дождя ветром составили для дефлектора, имеющего 6 ребер, – 9,5 %; 12 ребер – 9,7 %; 18 ребер – 10,9 %; 24 ребра – 11,1 %.

Таким образом, наибольшие потери воды на испарение и снос ветром зафиксированы у дождевальной насадки, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, а наименьшие – у дождевальной насадки Senniger i-Wob. У предлагаемой дождевальной насадки потери воды на испарение и снос ветром выше по сравнению с дождевальной насадкой Senniger i-Wob при всех вариантах количественного состава ребер, выполненных на конусообразной рифленой поверхно-

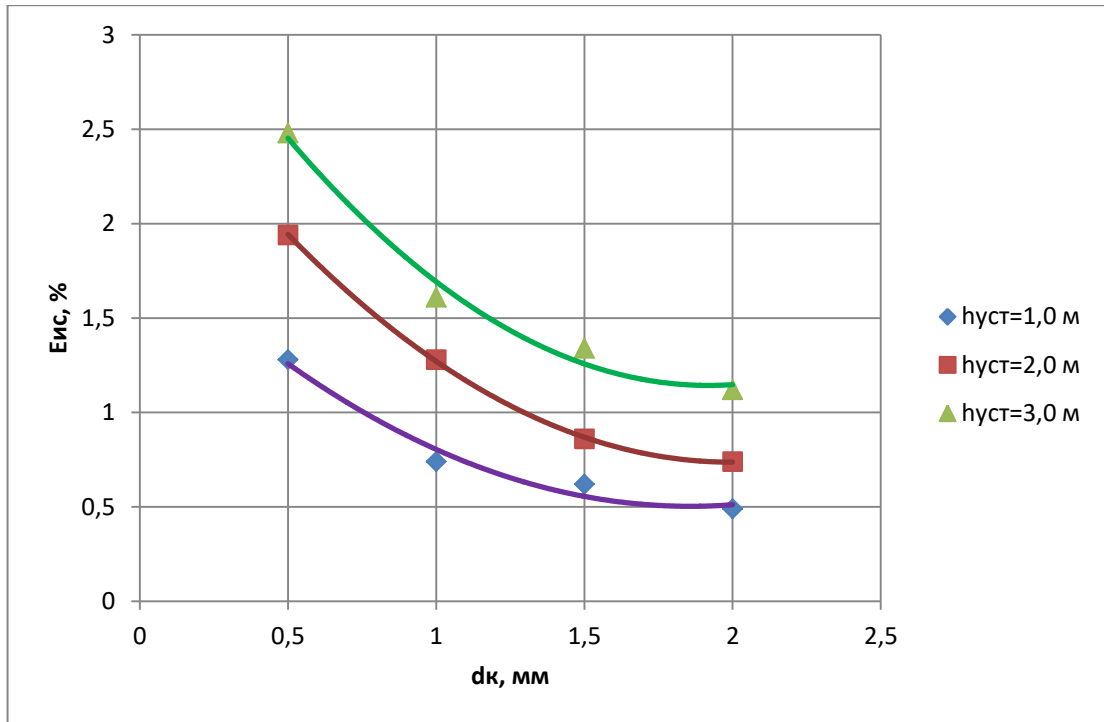
сти дефлектора. Относительно серийной дождевальной насадки, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, только у предлагаемой дождевальной насадки с дефлектором с конусообразной рифленой поверхностью, имеющей 18 и 24 ребра, потери воды на испарение и снос ветром больше. Уменьшение количества ребер до 12 и 6 сокращает потери воды (они становятся меньше по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью).

Данное обстоятельство можно объяснить тем, что вращающийся дефлектор дождевальных насадок создает дождь с малым диаметром капель, который подвержен большему испарению. Чем выше давление в трубопроводе дождевальной машины, тем больше в дождевом облаке создается капель с малым диаметром. Это обуславливает повышение испарения воды в начале трубопровода дождевальной машины. При снижении давления до 0,2 МПа (после середины трубопровода) наблюдается сокращение потерь воды на испарение и снос ветром за счет уменьшения количества капель дождя малого диаметра в дождевом облаке.

В связи с этим было исследовано влияние диаметра капель дождя на величину их испарения и сноса (рисунок 4.28).

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением диаметра капель дождя сокращаются потери на испарение и снос ветром, а увеличение высоты установки дождевальной насадки относительно поверхности поля увеличивает этот показатель.

Увеличение диаметра капель дождя с 0,5 до 1,0 мм приводит к снижению потерь воды на испарение и снос ветром при установке дождевальной насадки на высоте  $h_{\text{уст}} = 1$  м на 42,1 %; при  $h_{\text{уст}} = 2$  м – на 34,1 % и при  $h_{\text{уст}} = 3$  м – на 35,1 %. Дальнейшее увеличение диаметра капель дождя с 1,0 до 1,5 мм сокращает потери воды на испарение и снос ветром при  $h_{\text{уст}} = 1$  м – на 20,9 %; при  $h_{\text{уст}} = 2$  м – на 32,8 % и при  $h_{\text{уст}} = 3$  м – на 18,7 %. Увеличение диаметра капель дождя с 1,5 до 2,0 мм снижает этот показатель соответственно на 16,2 %; 13,9 и 16,4 %.



$h_{уст} = 1,0 \text{ м}$	$E_{исв} = 0,41d_k^2 - 1,523d_k + 1,9175$	$R^2 = 0,9744$
$h_{уст} = 2,0 \text{ м}$	$E_{исв} = 0,54d_k^2 - 2,154d_k + 2,885$	$R^2 = 0,9898$
$h_{уст} = 3,0 \text{ м}$	$E_{исв} = 0,65d_k^2 - 2,495d_k + 3,5375$	$R^2 = 0,9858$

Рисунок 4.28 – Величина испарения и сноса капель дождя в зависимости от диаметра капель дождя и высоты установки дождевальной насадки относительно поверхности поля

Увеличение высоты установки дождевальной насадки с 1 до 2 м вызывает повышение потерь воды на испарение и снос ветром при  $d_k = 0,5$  мм на 34,2 %, при  $d_k = 1,0$  мм – на 42,1 %, при  $d_k = 1,5$  мм – на 27,92 % и при  $d_k = 2,0$  мм – на 33,7 %. Дальнейшее увеличение высоты установки дождевальной насадки относительно поверхности поля с 2 до 3 м приводит к повышению потерь воды на испарение и снос ветром соответственно на 21,7 %; 20,4; 35,8 и 33,9 %.

Как видно, чем выше высота установки дождевальной насадки и больше диаметр капель дождя, тем больше он подвержен ветровому воздействию, как следствие – выше потери воды на испарение и снос ветром.

В связи с вышеизложенным основными направлениями, обеспечивающими снижение потери воды на испарение и снос ветром, являются:

- уменьшение высоты подъема дождевого облака за счет малой высоты установки дождевальных насадок относительно поверхности поля или использование

вращающихся дефлекторов с малым углом наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, к горизонту;

- создание дождевого облака с наибольшим составом капель диаметром 0,6...1,2 мм и наименьшим содержанием капель диаметром менее 0,3 мм, которые подвержены большему испарению.

На основании проведенного анализа результатов исследований можно сделать вывод о том, что оптимальные качественные показатели дождя обеспечивают дождевальные насадки предлагаемой конструкции с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющей 6 или 12 ребер.

#### **4.4 Равномерность полива дождевальной машиной, оборудованной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором**

На равномерность полива, например, дождевальной машиной кругового действия «Каскад» («Кубань-ЛК1») оказывают влияние множество факторов. В первую очередь это скорость и направление движения ветра относительно трубопровода дождевальной машины, а также расстояние между дождевальными насадками и величина перекрытия струй дождя. Другими параметрами являются: радиус полива дождевальной насадкой; равномерность распределения слоя осадков вдоль радиуса полива; средний размер диаметра капель дождя; высота установки дождевальной насадки относительно поверхности поля; рельеф самого поля и вид поливаемой культуры и др.

Для оценки равномерности полива дождевальной машиной «Каскад» («Кубань-ЛК1») были проведены замеры распределения слоя осадков вдоль трубопровода дождевальной машины (рисунок 4.29). Построение графика осуществляли с учетом разбивания длины трубопровода дождевальной машины на равные по длине интервалы и определения поливаемой площади для соответствующего интервала. В результате были получены расчетные значения коэффициентов, характеризующих равномерность полива (таблица 4.1).

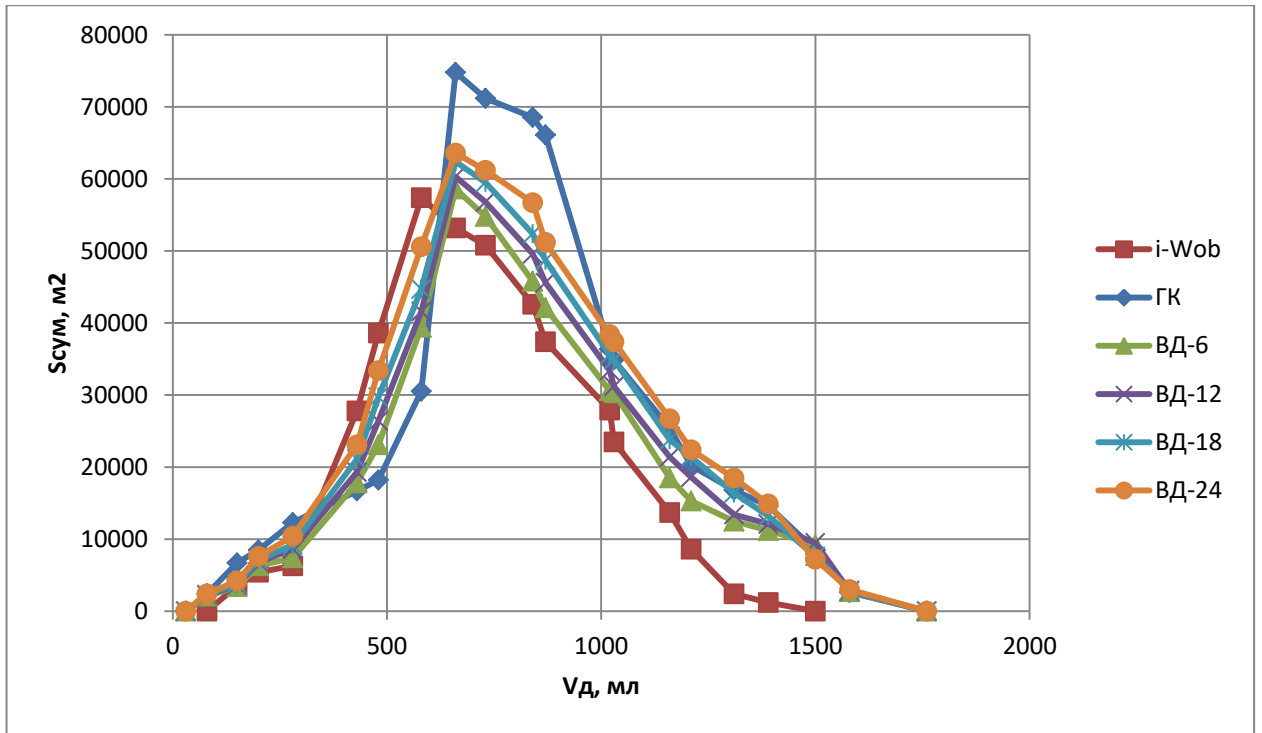


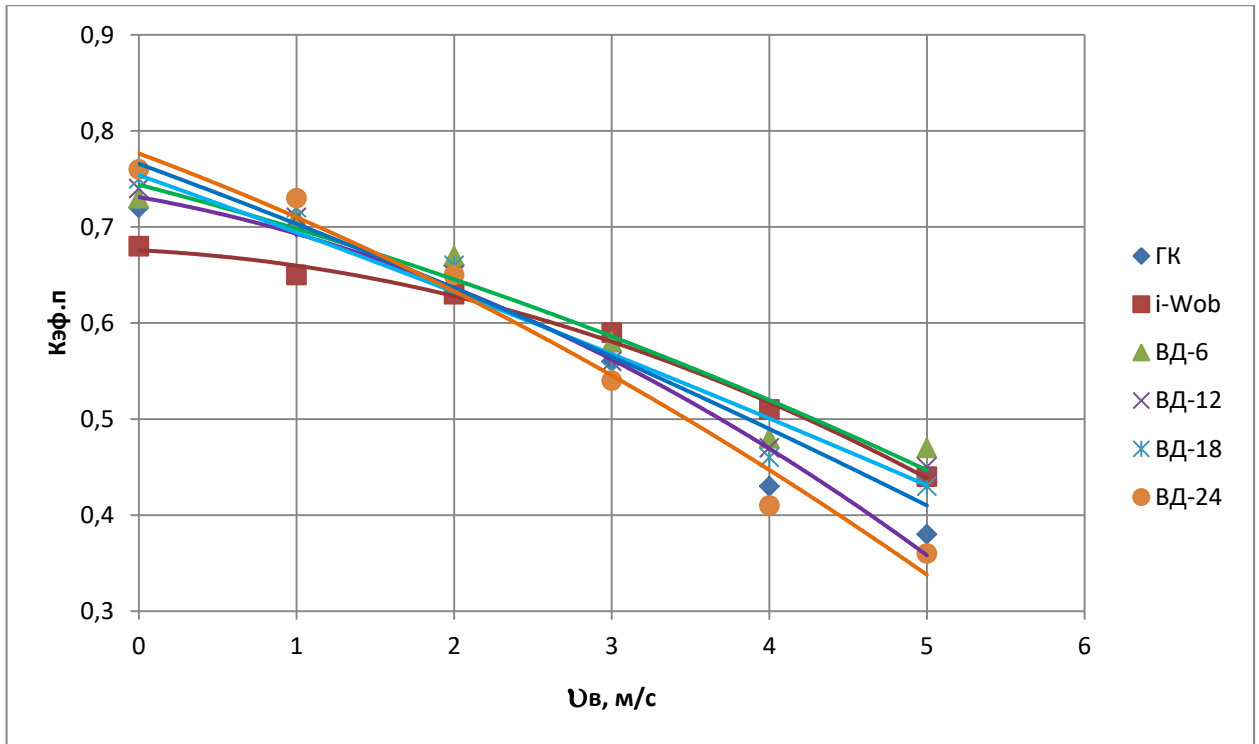
Рисунок 4.29 – Распределение объема воды в дождемерах вдоль длины трубопровода ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1»), оборудованной дождевальными насадками

Таблица 4.1. – 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 результате исследований было установлено, что наибольшую равномерность полива обеспечивают предлагаемые дождевальные насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, а наименьшую – Senniger i-Wob.

Необходимо отметить, что с повышением скорости ветра происходит значительное снижение коэффициента эффективного полива (рисунок 4.30).



ГК	$K_{эф.п} = -0,091 v_{в03}^2 - 0,029 v_{в03} + 0,7311$	$R^2 = 0,9735$
Senniger i-Wob	$K_{эф.п} = -0,0061 v_{в03}^2 - 0,0142 v_{в03} + 0,6779$	$R^2 = 0,9893$
ВД-6	$K_{эф.п} = -0,0043 v_{в03}^2 - 0,0394 v_{в03} + 0,7429$	$R^2 = 0,9611$
ВД-12	$K_{эф.п} = -0,0013 v_{в03}^2 - 0,0583 v_{в03} + 0,7539$	$R^2 = 0,9719$
ВД-18	$K_{эф.п} = -0,0021 v_{в03}^2 - 0,0604 v_{в03} + 0,7657$	$R^2 = 0,9715$
ВД-24	$K_{эф.п} = -0,0054 v_{в03}^2 - 0,0609 v_{в03} + 0,7764$	$R^2 = 0,9795$

Рисунок 4.30 – Изменение коэффициента эффективного полива ДМ Каскад» («Кубань-ЛК1»), оснащенной дождевальными насадками, в зависимости от скорости ветра

Установлено, что с увеличением скорости ветра с 1 до 5 м/с коэффициент эффективного полива снижается для серийной дождевальной насадки, имеющей стационарный дефлектор с гладкой поверхностью, на 89,4 %; для Senniger i-Wob – на 47,8 %; для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющей 6 ребер, – на 58,6 %; 12 ребер – на 64,4 %; 18 ребер – на 74,4 %; 24 ребра – на 111 %.

Исходя из анализа результатов исследований, видно, что наименьшую ветроустойчивость дождя обеспечивает серийная дождевальная насадка со стационарным дефлектором, имеющим гладкую поверхность, вследствие этого получается наибольшее снижение коэффициента эффективного полива. Это можно объяснить

тем, что дождь, создаваемый такой насадкой, содержит больше капель малого и большого диаметра, он более неоднороден и подвержен сносу ветром.

Наибольшей ветроустойчивостью и, как следствие, наименьшим снижением коэффициента эффективного полива обладает дождь, создаваемый дождевальной насадкой Senniger i-Wob. Данное обстоятельство можно объяснить наличием в дождевом облаке большого количества капель большого диаметра.

Также следует отметить, что и дождь, создаваемый предлагаемой дождевальной насадкой с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленной поверхностью, обладает достаточной ветроустойчивостью, хотя с повышением количества ребер на рифленной поверхности дефлектора и увеличением частоты вращения дефлектора создается дождь с каплями малого диаметра. Однако такой дождь более компактный и равномерно распределен, что повышает его плотность и ветроустойчивость.

Несмотря на то, что все дождевальные насадки с вращающимся дефлектором имеют хорошую ветроустойчивость, все же наибольший коэффициент эффективного полива присущ дождевальным насадкам предлагаемой конструкции. Дождь с каплями большого диаметра, создаваемый дождевальной насадкой Senniger i-Wob, обладает высокой удельной мощностью и оказывает негативное воздействие на почву и сельскохозяйственные растения, приводящее к снижению урожая.

#### **4.5 Удельная мощность дождя, создаваемого дождевальными насадками с вращающимся дефлектором**

Основное негативное воздействие дождя, создаваемого дождевальными насадками, на почву и растение обусловлено его удельной мощностью. Большие значения этого показателя способствуют чрезмерному уплотнению верхних слоев почвы, нарушению ее физико-механических свойств и водно-воздушного режима, что приводит к повреждению и увяданию сельскохозяйственных культур и, как следствие, к снижению урожая [92].

Согласно ранее представленным результатам исследований, установка вращающихся дефлекторов на дождевальных насадках способствует повышению начальной скорости полета капли дождя, увеличению радиуса полива и скорости падения капель дождя.

Скорость падения капли дождя  $v_{\text{п}}$  можно определить по формуле [46, 150]

$$v_{\text{п}} = 4,11d_{\text{к}}^{0,5}, \quad (4.6)$$

где  $d_{\text{к}}$  – диаметр капли дождя, м.

В связи с этим удельная мощность дождя  $N_{\text{уд}}$  (Вт/м<sup>2</sup>), создаваемого при поливе дождевальными насадками с вращающимся дефлектором, [46, 150]:

$$N_{\text{уд}} = 0,0083\rho_{\text{ср}} \sum_{i=1}^n (n_i v_{\text{п}i})^2 = 0,14\rho_{\text{ср}} d_{\text{к}}, \quad (4.7)$$

где  $\rho_{\text{ср}}$  – интенсивность дождя, мм/мин;

$n_i$  – доля капель  $i$ -го размера;

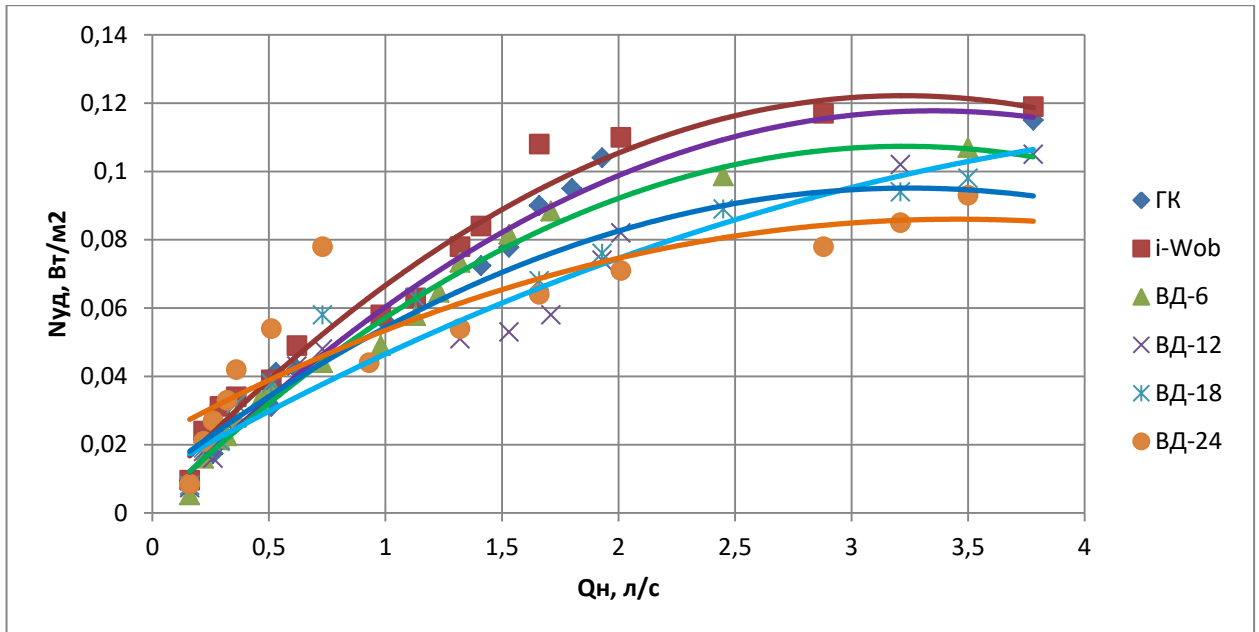
$v_{\text{п}i}$  – скорость падения капель  $i$ -го размера, м/с.

Зависимости, отражающие изменение удельной мощности дождя, создаваемого дождевальными насадками вдоль трубопровода дождевальной машины представлены на рисунке 4.31.

Было установлено, что наибольшую удельную мощность дождя обеспечивает дождевальная насадка Senniger i-Wob, так как создает капли большого диаметра. С увеличением расхода воды с 0,16 до 3,78 л/с происходит повышение этого показателя с 0,0096 до 0,119 Вт/м<sup>2</sup>.

Анализируя изменение удельной мощности дождя для других дождевальных насадок, было установлено, что для дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью максимальное значение удельной мощности дождя составляет 0,115 Вт/м<sup>2</sup>, тогда как для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором – 0,107 Вт/м<sup>2</sup> для дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющего 6 ребер; 0,105 Вт/м<sup>2</sup> для дефлектора с 12 ребрами; 0,098 Вт/м<sup>2</sup> для дефлектора с 18 ребрами и 0,093 Вт/м<sup>2</sup> для дефлектора, имеющего 24 ребра.





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

Для дождевальной насадки со стационарным дефлектором с гладкой поверхностью среднее значение удельной мощности дождя составляет  $0,059 \text{ Вт/м}^2$ , для Senniger i-Wob –  $0,071 \text{ Вт/м}^2$ , для предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором –  $0,063 \text{ Вт/м}^2$  для дефлектора конусообразной формы с рифленой поверхностью, имеющего 6 ребер;  $0,055 \text{ Вт/м}^2$  для дефлектора с 12 ребрами;  $0,051 \text{ Вт/м}^2$  для дефлектора с 18 ребрами и  $0,0573 \text{ Вт/м}^2$  для дефлектора, имеющего 24 ребра.

В ходе исследований установлено, что с увеличением количества ребер, выполненных на конусообразной рифленой поверхности вращающегося дефлектора, происходит снижение удельной мощности дождя за счет уменьшения диаметра капель.

Рассматривая среднее значение удельной мощности дождя создаваемого предлагаемой дождевальной насадкой, нужно отметить, что наименьшим этот показатель зафиксирован у дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 18 ребер.

Необходимо учесть тот факт, что высокая удельная мощность дождя приводит к повышению плотности верхних слоев почвы (рисунок 4.32).

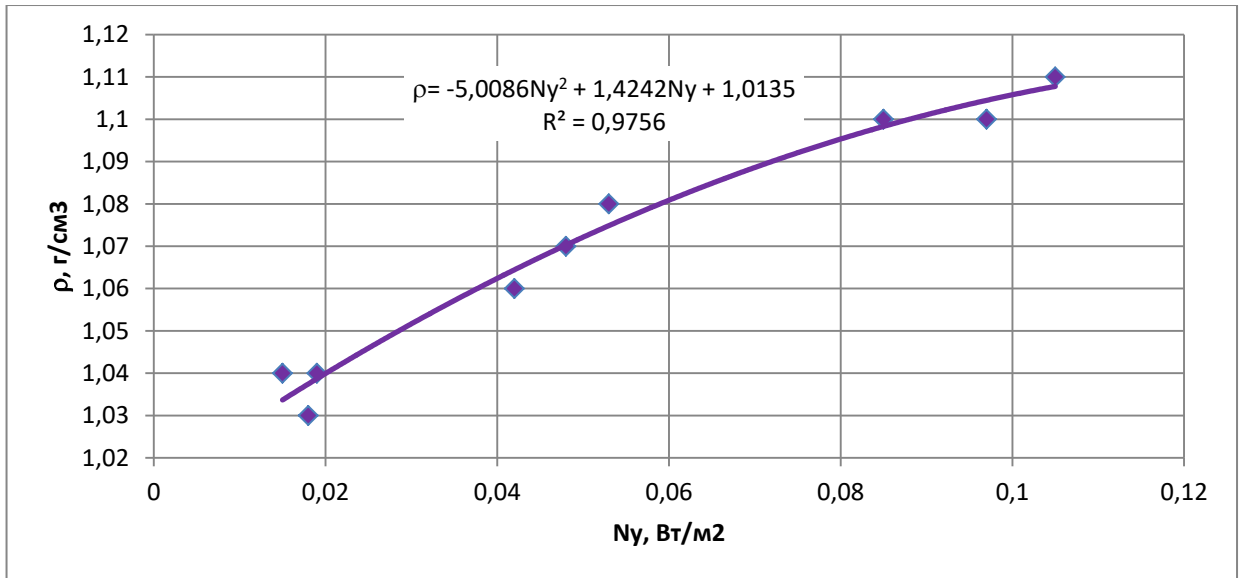


Рисунок 4.32 – Влияние удельной мощности дождя на изменение плотности почвы в слое 0–5 см при поливе дождевальными насадками

Исследованиями установлено, что в верхних слоях почвы оптимальной плотностью для нормального роста сельскохозяйственных растений считается 1,0...1,1 г/см<sup>3</sup> [14, 55, 136]. Полученная экспериментальная зависимость, отражающая изменение плотности почвы от удельной мощности дождя (см. рисунок 4.32), позволяет сделать вывод о том, что с увеличением расстояния установки дождевальной насадки от центральной поворотной колонны ДМ повышается расход воды, проходящей через дождевальную насадку, и, как следствие, возрастают удельная мощность создаваемого дождя и плотность почвы.

Исходя из этого следует, что до середины длины трубопровода дождевальной машины все устанавливаемые дождевальные насадки создают дождь с удельной мощностью, обеспечивающей оптимальную плотность почвы. После середины длины трубопровода установка Senniger i-Wob и дождевальной насадки с дефлектором, имеющим гладкую поверхность, приводит к резкому увеличению удельной мощности дождя и повышению плотности почвы. Предлагаемая дождевальная насадка с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой по-

верхностью способствует созданию дождя меньшей удельной мощности и, как следствие, меньшему воздействию на почву и сельскохозяйственные растения. Данное обстоятельство положительно сказывается на урожае сельскохозяйственных культур, особенно чувствительных к воздействию (например, сои).

На основе результатов исследований можно утверждать, что наименьшее воздействие на почву оказывает дождевальная насадка с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью, на которой выполнено 18 ребер. Однако вследствие сравнения показателей качества дождя рекомендуется использовать дождевальную насадку с 12 ребрами.

#### **4.6 Норма полива до стока дождевальной машиной, оборудованной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором**

Уплотнение почвы, вызванное воздействием капель дождя, снижает впитывающую способность почвы, что влечет за собой сокращение поливной нормы до стока. У современных дождевальных машин кругового действия наибольшее воздействие дождя на почву проявляется в конце трубопровода [34, 85, 148]. Это вызывает создание участков повышенной плотности почвы с образованием поверхностного стока при поливе, что в свою очередь приводит к развитию водной эрозии. Это обусловлено снижением напора воды в конце трубопровода дождевальной машины и формированием капель дождя большого диаметра. А неровный рельеф поверхности поля и тяжелый гранулометрический состав почв усугубляют данный процесс.

В связи с этим нами были проведены исследования по определению досточковой поливной нормы для дождевальных машин, оснащенных серийными и предлагаемой дождевальными насадками, работающими на темно-каштановых почвах. Результаты представлены в таблице 4.2.

Анализ данных показывает, что при эффективной норме полива  $300 \text{ м}^3/\text{га}$  все исследуемые дождевальные насадки способны создавать дождь, обеспечивающий полив без образования стока. Но по мере повышения нормы полива происходит увеличение стока у серийных дождевальных насадок с дефлектором, имеющим гладкую поверхность, и Senniger i-Wob.

Таблица 4.2. – Достоковая норма полива ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1»), оснащенной дождевальными насадками

Тип дождевальной насадки	Норма полива, м <sup>3</sup> /га		Величина стока, м <sup>3</sup> /га
	эффективная	достоковая	
С дефлектором, имеющим гладкую поверхность	300	375	0
	400	380	20
	500	385	115
Senniger i-Wob	300	380	0
	400	375	25
	500	390	110
Предлагаемая дождевальная насадка	300	520	0
	400	535	0
	500	545	0

Таким образом, для снижения напора воды в конце трубопровода дождевальной машины «Каскад» («Кубань-ЛК1») и с целью минимизации негативного воздействия на почву и растения, а также выдачи достоковой поливной нормы необходимо устанавливать предлагаемые дождевальные насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью. Это позволит исключить сток воды с поверхности поля при разных поливных нормах.

#### 4.7 Выводы по главе

1. В результате проведенных экспериментальных исследований было определено влияние на качественные показатели дождя конструктивных параметров предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью.

2. Установлено, что на радиус полива дождевальной насадки с вращающимся дефлектором оказывают влияние высота ее установки над поверхностью поля, давление воды на выходе из сопла дождевальной насадки, угловая скорость вращения дефлектора. Исследования показали, что радиус полива предлагаемой дождевальной насадкой выше в среднем на 12,3 % по сравнению с серийной дождевальной насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, но меньше радиуса полива серийной дождевальной насадкой Senniger i-Wob при одинаковых условиях. Сохранение радиуса полива при уменьшении угла наклона струи воды,

сходящей с основания дефлектора, к горизонту с  $32^\circ$  до  $22^\circ$  позволяет повысить ветроустойчивость дождя и снизить на 9,4 % потери воды на испарение и снос ветром по сравнению с серийными дождевальными насадками.

3. Увеличение угловой скорости вращения дефлектора у предлагаемой дождевальной насадки за счет повышения количества ребер, выполненных на рифленной конусообразной поверхности дефлектора, способствует созданию дождя с высоким процентным содержанием капель диаметром 0,6...1,5 мм, которое на 18,7–29,8 % выше по сравнению с дождевальной насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, и Senniger i-Wob.

4. Наилучшую равномерность распределения слоя дождя вдоль радиуса полива и трубопровода дождевальной машины обеспечивает предлагаемая дождевальная насадка, у которой на конусообразной рифленной поверхности вращающегося дефлектора выполнено 6 или 12 ребер. Коэффициент равномерности полива составляет 0,73–0,76, что выше по сравнению с серийной дождевальной насадкой, имеющей дефлектор с гладкой поверхностью, и Senniger i-Wob.

5. Предлагаемая дождевальная насадка с вращающимся дефлектором обеспечивает наименьшую интенсивность дождя 0,294...0,725 мм/мин, что снижает негативное воздействие 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. Таким образом, создаются условия для выполнения полива с максимально возможными достояемыми поливными нормами и предотвращения образования стока воды с поверхности поля.

## **5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НА ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЕ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ НАСАДОК С ВРАЩАЮЩИМСЯ ДЕФЛЕКТОРОМ**

### **5.1 Производственные испытания дождевальной машины, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором**

Производственные испытания дождевальных машин «Каскад» («Кубань-ЛК1»), оснащенных дождевальными насадками с вращающимся дефлектором, были проведены в УНПО «Поволжье» и ООО «Наше дело» (Саратовская область). В задачи производственных испытаний (рисунок 5.1.) входило:

- подтверждение эффективности применения на дождевальных машинах предлагаемой конструкции дождевальной насадки с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью;
- оценка достоверности предложенных теоретических предпосылок,
- определение оптимальных конструктивных параметров дождевальной насадки и их влияния на качественные показатели дождя;
- определение технико-экономических показателей дождевальной машины кругового действия, оснащенной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором.



Рисунок 5.1 – Производственные испытания дождевальной машины, оборудованной дождевальными насадками с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью

Работу дождевальную машины при поливе сельскохозяйственных культур проводили в соответствии с методикой, представленной в 3-й главе. Подачу воды в ДМ обеспечивала насосная станция СПС 70/80 с расходом 90 л/с, напором 0,4 МПа, мощность электродвигателя 100 кВт·ч. Длина машины – 518 м. Тип почвы – темно-каштановый суглинок. Поливаемая культура – соя. Измерения качественных показателей дождя осуществляли по методике, представленной в 3-й главе.

## 5.2 Расчет технико-экономической эффективности

Экономическая эффективность от применения на дождевальной машине кругового действия предлагаемых дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленой поверхностью обеспечивается за счет:

- снижения потерь воды на испарение и снос ветром и повышения равномерности полива путем увеличения коэффициента эффективного полива на 0,72–0,76;
- создания мелкокапельного дождя с большим содержанием капель дождя диаметром 0,6...1,5 мм, обладающий малой удельной мощностью, что позволяет снизить негативное энергетическое воздействие на почву и сельскохозяйственные растения, обеспечивая максимально возможные величины досточковой нормы полива;
- снижения стоимости и общего количества дождевальных насадок, устанавливаемых на дождевальной машине.

Расчет экономической эффективности применения на дождевальной машине предлагаемых дождевальных насадок с вращающимся дефлектором был проведен согласно инструкции [76], «Методике расчета экономической эффективности внедрения новой техники и технологии» и «Инструкции по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в орошении и осушении земель, обводнении пастбищ и мелиоративном строительстве» [39, 189].

Сначала выполним расчет объема воды  $Q_v$ , необходимый на один полив, выдаваемый дождевальной машиной при поливе сельскохозяйственной культуры (например, сои) с нормой полива 450 м<sup>3</sup>/га [190]:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{дм}} T_{\text{пн}} K_{\text{пот}} + Q_{\text{ст}}, \quad (5.1)$$

где  $Q_{\text{дм}}$  – расход воды дождевальной машиной, м<sup>3</sup>/ч,  $Q_{\text{дм}} = 70$  л/с или 252 м<sup>3</sup>/ч [34];  
 $K_{\text{пот}}$  – коэффициент, учитывающий потери воды на испарение и снос ветром;  
 $T_{\text{пн}}$  – время работы дождевальной машины при выдаче поливной нормы, ч;  
 $Q_{\text{ст}}$  – величина стока воды, м<sup>3</sup>.

Время работы дождевальной машины при выдаче требуемой поливной нормы:

$$T_{\text{пн}} = \frac{m_{\text{пл}} S_{\text{пл}}}{Q_{\text{дм}}}, \quad (5.2)$$

где  $m_{\text{пл}}$  – поливная норма, м<sup>3</sup>/га;

$S_{\text{пл}}$  – площадь полива, га.

Тогда время работы дождевальной машины «Каскад» длиной 497 м, обеспечивающей полив сои с поливной нормой  $m_{\text{пл}} = 450$  м<sup>3</sup>/га:

$$T_{\text{пн}} = 450 \cdot 100/252 = 178 \text{ ч.}$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что потери воды на испарение и снос ветром для дождевальной машины «Каскад» составили 10,4 % ( $K_{\text{пот}} = 1,104$ ) при оснащении дождевальными насадками с дефлектором с гладкой поверхностью; 9,8 % ( $K_{\text{пот}} = 1,098$ ) при оснащении дождевальной насадкой Senniger i-Wob и 9,5 % ( $K_{\text{пот}} = 1,095$ ) при оснащении предлагаемой дождевальной насадкой.

Согласно результатам исследований, величина стока воды при поливной норме 450 м<sup>3</sup>/га для дождевальной машины, оснащенной серийными дождевальными насадками с дефлектором, имеющем гладкую поверхность, –  $Q_{\text{ст}} = 6750$  м<sup>3</sup>; для дождевальной машины, оснащенной серийными дождевальными насадками Senniger i-Wob, –  $Q_{\text{ст}} = 7425$  м<sup>3</sup>; предлагаемые дождевальные насадки обеспечивают полив без стока.

Зная объем воды, выдаваемый за один полив, определим продолжительность работы дождевальной машины:



$$T_{\text{дм}} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{дм}}}. \quad (5.3)$$

Общее потребление энергии, необходимое для одного полива ДМ:

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{уст}} T_{\text{дм}}, \quad (5.4)$$

где  $N_{\text{уст}}$  – мощность насосной установки, Вт.

Экономия электроэнергии за один полив  $\mathcal{E}_{\text{п}}$ :

$$\mathcal{E}_{\text{п}} = N_{\text{об сер}} - N_{\text{об мод}}, \quad (5.5)$$

где  $N_{\text{об сер}}$  и  $N_{\text{об мод}}$  – общее потребление энергии дождевальными машинами, оснащенной соответственно серийными и предлагаемыми дождевальными насадками, при поливе, Вт.

Экономия денежных средств  $\mathcal{E}_{\text{д}}$  за один полив выполненной ДМ:

$$\mathcal{E}_{\text{д}} = \mathcal{E}_{\text{п}} C_{\text{эл}}, \quad (5.6)$$

где  $C_{\text{эл}}$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.,  $C_{\text{эл}} = 1,681$  руб. [111].

Годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{д}} n_{\text{пол}}, \quad (5.7)$$

где  $n_{\text{пол}}$  – количество поливов.

Результаты расчетов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. – Данные расчета экономической эффективности применения на ДМ «Каскад» («Кубань-ЛК1») дождевальных насадок с вращающимся дефлектором

Показатель	Принятое обозначение	Ед. изм.	Сравниваемые варианты		
			ДН с дефлектором с гладкой поверхностью	ДН Senniger i-Wob	предлагаемая ДН с вращающимся дефлектором
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1. Объем внедрения, поливаемая площадь	$S_{\text{пл}}$	га	100	100	100
2. Количество машин	$n$	ед.	1	1	1
3. Количество поливов за сезон	$n_{\text{пол}}$	шт.	12	12	12

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
4. Норма полива	$m_{пл}$	м <sup>3</sup> /Га	450	450	450
5. Коэффициент эффективности полива при скорости ветра 4 м/с	–	–	0,72	0,68	0,76
6. Потери воды на испарение и снос	$E_{исв}$	%	10,4	9,8	9,5
7. Величина стока поливной воды	$Q_{ст}$	м <sup>3</sup>	6750	7425	0
8. Объем воды требуемый на один полив	$Q_{в}$	м <sup>3</sup>	56271	56954	49669
9. Продолжительность работы дождевальной машины	$T_{дм}$	ч	223,3	226,0	197,1
10. Общее потребление энергии	$N_{общ}$	кВт	2229,7	22600,6	19710
11. Экономия электроэнергии за один полив	$\mathcal{E}_{п}$	кВт	270,8	–	2890,6
12. Стоимость электроэнергии	$C_{эл}$	руб.	1,681	1,681	1,681
13. Экономия денежных средств за один полив	$\mathcal{E}_{д}$	руб.	445,3	–	4859,1
14. Годовой экономический эффект	$\mathcal{E}_{год}$	руб.	5463,7	–	58309,7

Таким образом, применение на дождевальной машине «Каскад» («Кубань-ЛК1») предлагаемых дождевальных насадок с вращающимся дефлектором позволит получить годовой экономический эффект в размере 58309,7 руб. на одну машину.

### 5.3 Выводы по главе

1. Проведены производственные испытания ДМ «Каскад» (приложение Д).
2. Осуществлен расчет экономической эффективности применения ДМ «Каскад» с дождевальными насадками предлагаемой конструкции.
3. Установка на дождевальную машину «Каскад» («Кубань-ЛК1») дождевальных насадок с вращающимся дефлектором конусообразной формы с рифленной поверхности за счет снижения потерь воды на испарение и снос ветром, сокращения количества дождевальных насадок позволяет получить годовой экономический эффект в размере 58309,7 руб. на одну машину.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная задача повышения качественных показателей полива дождевальной машиной 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 (фор-

мула (2.7)); диаметр дефлектора (формула (2.16)); высота дефлектора (формула (2.32)); радиус кривизны конусообразной рифленой поверхности дефлектора (формула (2.38)); угловая скорость (формула (2.48)); радиус полива (формула (2.63)). 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 дождевальной 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  $32^\circ$  до  $22^\circ$  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  $0,0053...0,105 \text{ Вт/м}^2$ . 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 достаточными 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Абрамов, А. М.* Определение параметров впитывания воды в почву с учетом энергетических характеристик дождя / А. М. Абрамов // Почвоведение. – 1985. – № 6. – С. 137–143.
2. *Адлер, Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
3. *Акпасов, А. П.* Повышение эффективности дождеобразования с обоснованием конструктивных параметров дефлекторных насадок кругового действия : дис. ... канд. техн. наук / Акпасов Антон Павлович. – Саратов, 2018. – 153 с.
4. Актуальность применения дождевальных машин в зонах рискованного земледелия на примере Саратовской области / Д. А. Соловьев [и др.] // Научная жизнь. – 2022. – Т. 17. – № 4 (124). – С. 507–514.
5. Анализ и обоснование технических предложений по повышению проходимости ДМ «Фрегат» / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Технические, технологические и экологические проблемы орошения земель Поволжья : сб. науч. тр. по матер. юбилейной конференции, посвящ. 40-летию ФГНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов, 2006. – С. 42–49.
6. *Антонюк, А. В.* Основные технико-эксплуатационные показатели многоопорных дождевальных машин Zimmatic / А. В. Антонюк // Мир науки и инноваций. – 2016. – Т. 12. – № 1 (3). – С. 34–40.
7. *Бобрышов, А. В.* / Вопросы применения отечественных широкозахватных дождевальных машин / А. В. Бобрышов, Б. П. Фокин // Вестник АПК Ставрополья. – 2013. – № 2. – С. 132–134.
8. *Бончковский, Н. Ф.* Исследование равномерности распределения искусственного дождя на математических моделях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бончковский Николай Флавиевич. – М., 1970. – 21 с.
9. *Боровиков, В. П.* Statistica : искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. П. Боровиков. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с.

10. *Бородин, В. А.* Распыливание жидкостей / В. А. Бородин. – М. : Машиностроение, 1967. – 262 с.
11. *Веденяпин, Г. В.* Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М. : Колос, 1973. – 159 с.
12. Влияние на качественные показатели дождя конструктивных параметров дождевальнoй насадки с кольцевой канавкой на дефлекторном конусе / В. В. Слюсаренко [и др.] // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IX междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2022. – С. 91–97.
13. *Вуколов, В. В.* Разработка и выбор рабочих органов дождевальных машин для орошения при скорости ветра свыше 3 м/с : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Вуколов Виктор Владимирович. – М., 1992. – 19 с.
14. *Гарифуллин, И. И.* Методика расчета величины оптимальной плотности сложения почвы в любой период вегетации / И. И. Гарифуллин // Сельскохозяйственный журнал. – 2020. – № 5 (13). – С. 12–18.
15. *Городничев, В. И.* К оценке дождевальной техники / В. И. Городничев // Экологически и экономически обоснованные технологии и технические средства полива : сб. науч. тр. / ВНИИГиМ. – М., 1999. – С. 121–127.
16. *Городничев, В. И.* Современные средства контроля для оценки качества работы поливной техники / В. И. Городничев // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования : матер. юбилейной междунар. науч.-практ. конф. – М., 2007. – С. 122–130.
17. *Гринь, Ю. Н.* Вопросы применения низконапорных дождевальных машин «Фрегат» / Ю. Н. Гринь, И. А. Гамрецкий // Экономия энергозатрат и повышение экологической безопасности поливов : сб. науч. тр. СтавНИИГиМ. – Ставрополь, 1994. – С. 10–14.
18. *Гусейн-Заде, С. Х.* Многоопорные дождевальные машины / С. Х. Гусейн-Заде, Л. А. Перевезенцев, В. И. Коваленко. – М. : Колос, 1984. – 191 с.
19. *Гутер, Р. С.* Элементы численного анализа и математической обработки результатов опытов / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. – М. : Физматгиз, 1970. – 432 с.

20. *Джонсон, Н.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке : методы обработки данных : в 2 т. / Н. Джонсон, Ф. Лион ; пер. с англ. ; под ред. Э. К. Лецкого. – М. : Мир, 1980–1981.
21. Дождеватели широкозахватных дождевальных машин : [монография] / Л. А. Журавлева [и др.]. – М. : ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2022. – 140 с.
22. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Москва 2020. – 26 с. Формат: PDF. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/3e5/3e5941f295a77fdcfed2014f82ecf37f.pdf>. Дата обращения 06.10.2022. Загл. с экрана.
23. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М. : УОУО Media, 2012. – 352 с.
24. *Дружинин, В. С.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации / В. С. Дружинин, А. В. Сикан. – СПб. : РГГМУ, 2001. – 169 с.
25. *Евтехина, А. А.* Обоснование применения современной дождевальной техники в нижнем Поволжье / А. А. Евтехина, А. А. Шашлов // Вестник магистратуры. – 2019. – № 10-5 (97). – С. 4–6.
26. *Ерхов, Н. С.* Поливной режим как элемент технологии полива / Н. С. Ерхов // Мелиорация и водное хозяйство. – 1996. – № 4. – С. 16–19.
27. *Жукова, Г. С.* Аналитическая геометрия. Векторная и линейная алгебра : учебное пособие / Г. С. Жукова, М. Ф. Рушайло. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 415 с.
28. *Журавлева, Л. А.* «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) – Российская дождевальная машина нового поколения / Л. А. Журавлева, А. С. Попов // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : матер. Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2016. – С. 123–130.
29. *Журавлева, Л. А.* Возрождение орошения в Саратовской области / Л. А. Журавлева // Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства : сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ» ; под редакцией И. Ф. Сухановой. – Саратов, 2016. – С. 95–97.



30. Журавлева, Л. А. Оценка испарения и сноса дождя при дождевании / Л. А. Журавлева, А. С. Попов // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении : матер. междунар. науч.-практ. конф. / под ред. Ф. К. Абдразакова ; ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2016. – С. 120–123.

31. Журавлева, Л. А. Повышение ветроустойчивости дождеобразующих устройств с поворотным и эластичным дефлекторами / Л. А. Журавлева, А. Н. Ковалев // Основы рационального природопользования : матер. 3-й междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2011. – С. 283–288.

32. Журавлева, Л. А. Повышение равномерности распределения дождя широкозахватных дождевальными машинами при ветре / Л. А. Журавлева // Основы рационального природопользования : сб. науч. трудов / ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2005. – С. 166–170.

33. Журавлева, Л. А. Равномерность распределения воды при орошении дождевальными насадками / Л. А. Журавлева // Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства : сб. статей 6-й междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2016. – С. 100–102.

34. Журавлева, Л. А. Ресурсосберегающие широкозахватные дождевальные машины кругового действия : дис. ... д-ра техн. наук / Журавлева Лариса Анатольевна. – Саратов, 2018. – 409 с.

35. Журавлева, Л. А. Совершенствование технологических приемов полива дождевальными машинами кругового действия «Каскад» / Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев // Мелиорация. – 2019. – № 1 (87). – С. 78–82.

36. Журавлева, Л. А. Состояние земельного фонда и проблемы орошения в Российской Федерации / Л. А. Журавлева, А. С. Балабаев // Фундаментальные и прикладные научные исследования : актуальные вопросы, достижения и инновации : сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2021. – С. 100–112.

37. Журавлева, Л. А. Теоретические исследования влияния геометрических характеристик дождевальных насадок на радиус полива с учетом воздействия ветра / Л. А. Журавлева // Проблемы научного обеспечения сельскохозяйственно-

го производства и образования : сб. науч. работ / Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2008. – С. 52–55.

38. *Зажигаев, Л. С.* Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л. С. Зажигаев, А. А. Кишьян, Ю. И. Романиков. – М. : Атомиздат, 1978. – 230 с.

39. Инструкция по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в орошении и осушении земель, обводнении пастбищ и мелиоративном строительстве / Министерство мелиорации и водного хоз-ва СССР. – М., 1978. – 161 с.

40. Информационно-правовой портал Гарант.ру. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/400773886/#friends>. Дата обращения 06.10.2022. Загл. с экрана.

41. *Исаев, А. П.* Гидравлика дождевальных машин / А. П. Исаев. – М. : Машиностроение, 1973. – 214 с.

42. *Исаев, А. П.* Оценка технологических возможностей дождевальной техники на основе определения допустимых норм полива / А. П. Исаев. – М. : Колос, 1982. – С. 67–78.

43. *Каленюк, Н. М.* Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические передачи : учебное пособие / Н. М. Каленюк, А. В. Скрипник. – Барнаул : Изд-во АГАУ, 2011. – 248 с.

44. *Камышова, Г. Н.* Анализ состояния орошаемых земель Поволжья и направления совершенствования / Г. Н. Камышова, Н. Н. Терехова // Научный альманах. – 2021. – № 7-1 (81). – С. 115–118.

45. *Карпова, О. В.* Потери воды на испарение и унос ветром при поливе ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания / О. В. Карпова, М. А. Ломакин // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 6. – С. 87–92.

46. *Карпова, О. В.* Усовершенствованные устройства приповерхностного дождевания дождевальной машины «Фрегат» : дис. ... канд. техн. наук / Карпова Ольга Валериевна. – Саратов, 2017. – 197 с.

47. Каталог дождевальных насадок Komet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1675481678&tld=ru&lang=ru&name=Catalog-Komet-Pivot-5-Features-Russian-Rif.-265.pdf&text=Komet%203-D%20дождевальная%20насадка&url=https%3A%2F%2Fwww.kometirrigation.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FCatalog-Komet-Pivot-5-Features-Russian-Rif.-265.pdf&lr=194&mime=pdf&l10n=ru&sign=4c398fe2240627917e299a56313ebcf6&keyno=0&nosw=1&serpParams=tm%3D1675481678%26tld%3Dru%26lang%3Dru%26name%3DCatalog-Komet-Pivot-5-Features-Russian-Rif.-265.pdf%26text%3DKomet%2B3-D%2B%25D0%25B4%25D0%25BE%25D0%25B6%25D0%25B4%25D0%25B5%25D0%25B2%25D0%25B0%25D0%25BB%25D1%258C%25D0%25BD%25D0%25B0%25D1%258F%2B%25D0%25BD%25D0%25B0%25D1%2581%25D0%25B0%25D0%25B4%25D0%25BA%25D0%25B0%26url%3Dhttps%253A%2F%2Fwww.kometirrigation.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FCatalog-Komet-Pivot-5-Features-Russian-Rif.-265.pdf%26lr%3D194%26mime%3Dpdf%26l10n%3Dru%26sign%3D4c398fe2240627917e299a56313ebcf6%26keyno%3D0%26nosw%3D1> Дата обращения 20.12.2021 г. Загл. с экрана.

48. Каталог товаров для орошения Nelson [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://nelsonirrigation.com/library/2022%20NIC%20WHOLE%20GOODS%20CATALOG%20no%20\\$.pdf](https://nelsonirrigation.com/library/2022%20NIC%20WHOLE%20GOODS%20CATALOG%20no%20$.pdf). Дата обращения 05.02.2022 г. Загл. с экрана.

49. Каталог широкозахватных дождевальных машин, ирригационного оборудования, систем капельного орошения и насосных станций Российского производства / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации ; Департамент мелиорации ; ФГБНУ ВНИИ «Радуга». – М., 2016.

50. Каталог. I-Wob Senninger. Дождеватель для механизированного орошения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.senninger.com](http://www.senninger.com). Дата обращения 20.12.2021 г. Загл. с экрана.

51. *Кожевникова, Н. Г.* Исследование процесса равномерного распределения оросительной воды по поверхности почвы / Н. Г. Кожевникова, О. В. Ракушина // Международный технико-экономический журнал. – 2011. – № 3. – С. 103–105.

52. *Козинская, О. В.* Влияние скорости и направления ветра на качество полива малогабаритными дождевальными машинами фронтального действия / О. В. Козинская // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса : Наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – № 2 (22). – С. 231–236.

53. *Козинская, О. В.* Факторы качественного орошения при поливе дождевальными машинами фронтального действия / О. В. Козинская, Т. В. Пантюшина, Ю. А. Трофимова // Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий : матер. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию окончания Сталинградской битвы / Волгоградский гос. аграрный ун-т. – Волгоград, 2018. – Т. 4. – С. 90–95.

54. *Колесников, Ф. И.* Новая дождевальная техника и оценка ее эффективности / Ф. И. Колесников // Обзорная информация ЦНИИТЭИ В/О «Сельхозтехника». – М., 1973. – 59 с.

55. *Конищев, А. А.* О методике использования характеристики «оптимальная плотность» в исследованиях по обработке почвы / А. А. Конищев, И. И. Гарифуллин, Е. Н. Конищева // Владимирский земледелец. – 2019. – № 1 (87). – С. 16–20.

56. Концепция федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы». – М., 2010. – 60 с.

57. *Костяков, А. Н.* Основы мелиораций / А. Н. Костяков. – М. : Сельхозиздат, 1960. – 750 с.

58. *Котов, В. П.* Биологические основы получения высоких урожаев овощных культур / В. П. Котов, Н. А. Адрицкая, Т. И. Завьялова. – СПб. : Лань, 2010. – 125 с.

59. *Кравчук, А. В.* 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.

60. *Кузнецов, А. В.* Исследование влияния расположения насадок дождевальных машин на качество полива / А. В. Кузнецов // Вестник Рязанского государ-

ственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2019. – № 4 (44). – С. 136–141.

61. *Кузнецова, Е. И.* Орошаемое земледелие : учебное пособие / Е. И. Кузнецова, Е. Н. Закабунина, Ю. Ф. Снопич. – М., 2012. – 117 с.

62. *Кузнецова, Н. А.* Проблемы повышения эффективности сельскохозяйственного производства Саратовской области / Н. А. Кузнецова, А. В. Ильина, Н. В. Мамаева // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2016. – № 3 (62). – С. 42–47.

63. *Лебедев, Б. М.* Дождевальные машины. Теория и конструкции / Б. М. Лебедев. – М. : Машиностроение, 1965. – 255 с.

64. *Лебедев, Б. М.* Определение оптимальной длины многоопорных дождевальных машин / Б. М. Лебедев, Г. П. Лямперт // Тракторы и сельхозмашины. – 1972. – № 5. – С. 31–32.

65. *Ломакин, М. А.* Современные насадки зарубежной дождевальной техники / М. А. Ломакин, О. В. Карпова // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. II междунар. науч.-практ. конференции. – Саратов : Амирит, 2020. – С. 53–57.

66. *Львовский, Е. Н.* Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.

67. *Ляшков, М. А.* Обоснование распределения дождевальных аппаратов с учетом характеристик дождя / М. А. Ляшков, Ю. Е. Домашенко, С. М. Васильев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2018. – № 1. – С. 122–126.

68. *Макарова, Н. В.* Статистика в Excel : учебное пособие / Н. В. Макарова, В. Я. Трофимец. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 365 с.

69. Математическая статистика : учебник / В. М. Иванова [и др.]. – М. : Высшая школа, 1975. – 398 с.

70. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей СТО АИСТ 11.1. – М., 2010. – 56 с.

71. Мелиорация сельскохозяйственных земель в нечерноземной зоне России / С. А. Максимов [и др.]. – М., 2022. – С. 78–86.

72. Мелихов, В. В. Мелиорация – потенциал и стратегия развития АПК и сельских территорий России / В. В. Мелихов // Мелиорация в России : потенциал и стратегия развития : матер. междунар. науч.-практ. интернет-конф., посвящ. 50-летию масштабной программы развития мелиорации земель. – Волгоград, 2016. – С. 7–14.

73. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Роцин – Л. : Колос, 1980. – 168 с.

74. Методика полевого опыта в условиях орошения : рекомендации. – Волгоград : ВНИИОЗ, 1983. – 149 с.

75. Методика расчета эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива дефлекторных насадов / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 4. – С. 63–66.

76. Методические рекомендации по комплексным технологическим и техническим решениям, обеспечивающим снижение энергоемкости эксплуатации мелиоративных систем. – Коломна : ИП Воробьев О. М., 2015. – 164 с.

77. Механизация полива : справочник / Б. Г. Штепа [и др.] – М. : Агропромиздат, 1990. – 336 с.

78. Михайлов, А. К. Лопастные насосы. Теория, расчет и конструирование / А. К. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1977. – 289 с.

79. Мищенко, Н. А. Использование среднеструйных дождевальных аппаратов в инновационных проектах оросительных систем / Н. А. Мищенко, А. А. Алдошкин, Л. К. Козлова // Вестник мелиоративной науки. – 2021. – № 3. – С. 11–18.

80. Модернизация ДМ «Фрегат» на низкий напор и результаты внедрения / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Роль мелиорации земель в реализации государственной научно-технической политики в интересах устойчивого развития сельского хозяйства : матер. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Всероссийского

научно-исследовательского института орошаемого земледелия. – Волгоград, 2017. – С. 423–427.

81. *Мухамадрасулов, Ш. Х.* Улучшение мелиоративного состояния и повышение плодородия сильно увлажненных гидроморфных почв / Ш. Х. Мухамадрасулов, Т. Т. Бердиев // Сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Севостьянова. – М., 2020. – С. 252–256.

82. *Нагорный, В. А.* Использование ДМ «Фрегат» с дефлекторными насадками / В. А. Нагорный, Н. Ф. Рыжко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 1. – С. 85–90.

83. *Нагорный, В. А.* Экспериментальное исследование агротехнических характеристик полива дефлекторных насадок ДМ «Фрегат» / В. А. Нагорный, Н. Ф. Рыжко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 1. – С. 46–48.

84. *Надежкина, Г. П.* Результаты исследований устройств приповерхностного дождя на ДМ «Фрегат» / Г. П. Надежкина // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 192–197.

85. *Надежкина, Г. П.* Совершенствование устройств приповерхностного полива дождевальными машинами «Фрегат» : дис. ... канд. техн. наук / Надежкина Галина Петровна. – Саратов, 2014. – 167 с.

86. *Надежкина, Г. П.* Энергетические показатели дождя ДМ «Фрегат» / Г. П. Надежкина, В. В. Слюсаренко, А. П. Акпасов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 3. – С. 20–22.

87. *Напрасников, А. Т.* Современная мелиорация земель в России и за рубежом / А. Т. Напрасников, Н. Д. Киселева // Современные проблемы биологии, экологии и почвоведения : матер. междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию высшего биологического образования в Восточной Сибири / Иркутский государственный университет. – Иркутск, 2019. – С. 307–309.

88. *Наумова, Т. В.* Анализ технического состояния оросительных систем южного региона европейской части России / Т. В. Наумова // Эффективное использование мелиорируемых земель и водных ресурсов в агропромышленном комплексе России : сб. науч. тр. – М., 2021. – С. 281–285.

89. *Наумова, Т. В.* Проблемы технического состояния оросительных систем юга России и переход управления орошением на новый технологический уровень / Т. В. Наумова // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 1. – С. 2–5.

90. Научно обоснованные системы земледелия Саратовской области на 1981–1985 годы : [рекомендации] / НИИ сел. хоз-ва Юго-Востока, Произв. упр. сел. хоз-ва Саратов. обл. исполкома. – Саратов : Приволж. кн. изд-во, 1982. – 194 с.)

91. *Новицкий, П. В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 288 с.

92. Обоснование эффективности короткоструйной дефлекторной насадки для получения малоэнергоёмкого искусственного дождя / М. И. Филимонов [и др.] // Мелиорация в России : потенциал и стратегия развития : матер. междунар. науч.-практ. интернет-конф., посвящ. 50-летию масштабной программы развития мелиорации земель. – Волгоград, 2016. – С. 174–176.

93. Обтекание конического дефлектора потоком вязкой несжимаемой жидкости / А. И. Есин [и др.] // Научная жизнь. – 2018. – № 4. – С. 14–20.

94. *Овчаров, В. А.* Потери воды на испарение при дождевании широкозахватными машинами в Поволжье / В. А. Овчаров, В. И. Шигаев // Вопросы орошения в Поволжье : сб. науч. тр. / ВолжНИИГиМ. – М., 1980. – С. 88–92.

95. *Ольгаренко, Г. В.* Аналитические исследования перспектив развития техники орошения в России : информационно-аналитическое издание / Г. В. Ольгаренко, С. С. Турапин. – Коломна : ИП Лавренов А. В., 2020. – 128 с.

96. *Ольгаренко, Г. В.* Реализация программы импортозамещения в области производства техники полива в Российской Федерации / Г. В. Ольгаренко // Мелиорация и водное хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 44–47.



97. *Ольгаренко, Г. В.* Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения / Г. В. Ольгаренко. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 264 с.

98. *Ольгаренко, Г. В.* Совершенствование технологического процесса орошения и конструкции шланго-барабанных дождевальных машин с плоскосворачиваемым шлангом / Г. В. Ольгаренко, А. И. Рязанцев, А. А. Терпигорев // Экология и строительство. – 2020. – № 1. – С. 32–41.

99. *Ольгаренко, Д. Г.* Экономическая оценка широкозахватных дождевальных машин / Д. Г. Ольгаренко // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования : матер. юбилейной междунар. науч.-практ. конф. (Костяковские чтения). – М., 2007. – Т. 2. – С. 384–395.

100. Определение потерь воды на испарение при поливе сельскохозяйственных культур / В. В. Слюсаренко [и др.] // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. VII междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : Амирит, 2020. – С. 68–77.

101. Отчет по опытно-конструкторской работе по теме «Выполнение опытно-конструкторских работ по разработке дождевальной технике нового поколения». Государственный контракт №188/20-ГК от 15.07.2018. – Коломна. 2018. – 229 с.

102. Официальный сайт Senniger [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.senninger.com/ru/product/i-wobr2>. Дата обращения 20.12.2021 г. Загл. с экрана.

103. Официальный сайт Verum по продаже ДМ «Кубань-С» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://verum-agro.ru/katalog/orositel-noe-oborudovanie/dozhdeval-nye-mashiny/dmek-kuban-s-dmek-kuban-s-a429-73-03-dmek-kuban-s-a429-73-03/>. Дата обращения 18.12.2021 г. Загл. с экрана.

104. Официальный сайт Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://ru.wikipedia.org/wiki/Поверхностное\\_натяжение](https://ru.wikipedia.org/wiki/Поверхностное_натяжение). Дата обращения 05.02.2022 г. Загл. с экрана.

105. Официальный сайт департамента мелиорации Министерства сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://vniiraduga.ru/wp-content/uploads/2020/07/katalog-17.06.pdf>. Дата обращения 20.12.2021 г. Загл. с экрана.

106. Официальный сайт информационного агентства Регион 64 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://sarnovosti.ru/news/v-saratovskoy-oblasti-vyroslaploshchad-oroshaemykh-zemel/>. Дата обращения 02.12.2022 г. Загл. с экрана.

107. Официальный сайт компании Senninger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.senninger.com/>. Дата обращения 05.02.2022 г. Загл. с экрана.

108. Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/33c/33cb65f42ba0914d4b19c0859bf32c08.pdf>. Дата обращения 15.10.2022 г. Загл. с экрана.

109. Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Саратовской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.minagro.saratov.gov.ru/>. Дата обращения 18.10.2022 г. Загл. с экрана.

110. Официальный сайт Министерства сельского хозяйства Саратовской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://mcx.gov.ru/press-service/news/valeriy-zhukov-otsenil-razvitie-melioratsii-v-saratovskoy-oblasti/#:~:text=Всего%20в%20Саратовской%20области%20площадь,орошение%20–%2031%2C5%20тыс.%20га>). Дата обращения 18.10.2022 г. Загл. с экрана.

111. Официальный сайт Саратовэнерго. Тарифы юридическим лицам [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.saratovenergo.ru/yuridicheskim-litsam/tarify/>. Дата обращения 30.04.2023 г. Загл. с экрана.

112. *Пажи, Г. Д.* Основы техники распыливания жидкостей / Г. Д. Пажи, В. С. Галустов. – М. : Химия, 1984. – 256 с.

113. Пат. 150373 Российская Федерация, МПК А 01G 25/00. Дождевальная насадка / Безруков А. С., Слюсаренко В. В., Русинов А. В., Русинова И. Н., Хизов А. В., Леончук И. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Саратовский

государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2014122815/13 ; заявл. 04.06.2014 ; опубл. 20.01.2015, Бюл. № 5.

114. Пат. 2034446 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/02 В 05 В 3/06. Среднеструйный дождевальнй аппарат Чубикова / Чубиков Н. Е. ; заявитель и патентообладатель НПО «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации». – № 92005742/15 ; заявл. 20.11.1992 ; опубл. 10.05.1995, Бюл. № 16.

115. Пат. 2038755 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/02 В 05 В 3/06. Среднеструйный дождевальнй аппарат кругового действия / Чубиков Н. Е., Кучинский В. Ю. ; заявитель и патентообладатель НПО «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации». – № 5067022/15 ; заявл. 17.09.1992 ; опубл. 10.05.1995, Бюл. № 16.

116. Пат. 2257051 Российская Федерация, МПК А 01 G 25/02 В 05 В 1/26. Дождевальнй аппарат турбинного типа / Хабаров В. Е., Земцев А. М. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ставропольский аграрный университет». – № 2004104503/12 ; заявл. 16.02.2004 ; опубликован 27.07.2005, Бюл. № 21.

117. Пат. 2305603 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/18 В 05 В 1/26. Дождевальнй насадок / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Карпунин В. В., Семенов С. Я ; заявитель и патентообладатель ГНУ «Поволжский научно-исследовательский институт эколого-мелиоративных технологий Российской академии сельскохозяйственных наук». – № 2006105564/12 ; заявл. 22.02.2006 ; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25.

118. Пат. 2313405 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/18. Насадок дождевального агрегата / Зволинский В. П., Салдаев А. М. ; заявитель и патентообладатель ГНУ «Прикаспийский научно-исследовательский институт аридного земледелия российской академии сельскохозяйственных наук» . – № 2006123857/12 ; заявл. 03.07.2006 ; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.

119. Пат. 2317153 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/26. Дождевальная насадка / Журавлева Л. А., Кузнецов Р. Е., Соловьев Д. А., Краев С. Г. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный уни-

верситет им. Н. И. Вавилова». – № 2006109774/12 ; заявл. 27.03.2006 ; опубликован 20.02.2008, Бюл. № 5.

120. Пат. 2317862 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/18. Насадок дождевального агрегата / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Салдаев А. М. ; заявитель и патентообладатель ГНУ «Поволжский научно-исследовательский институт эколого-мелиоративных технологий российской академии сельскохозяйственных наук». – № 2006126435/12 ; заявл. 20.07.2006 ; опубликован 27.02.2008, Бюл. № 6.

121. Пат. 2324544 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/18. Дождевальная насадка / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Гостищев Д. П., Гильденберг Е. Ю., Полосин В. Д. ; заявитель и патентообладатель ГНУ «Поволжский научно-исследовательский институт эколого-мелиоративных технологий российской академии сельскохозяйственных наук». – № 2006136324/12 ; заявл. 13.10.2006 ; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14.

122. Пат. 2539513 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/26 А 01 G 25/00. Дождевальная насадка / Соловьев Д. А., Карпова О. В., Колесников А. Н. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова». – № 2013133345/13 ; заявл. 17.07.2013 ; опубл. 20.01.2015. Бюл. № 2.

123. 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., Затинацкий 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.

124. 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., Затинацкий 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.

125. Пат. 2670454 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/00. Способ определения потерь воды на испарение в воздухе при дождевании / Слюсаренко В. В., Ру-

синов 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.

126. Пат. 2691569 Российская Федерация, МПК А 01G 25/02. Дождевальная аппарат / Черноволов В. А., Кравченко Л. В., Несмиян А. Ю., Протасов Д. Н. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Донской ГАУ. – № 2018139964 ; заявл. 12.11.2018 ; опубл. 14.06.2019, Бюл. № 17.

127. *Петрашев, А. И.* Гидравлическое сопротивление движению консервационных жидкостей по шлангу / А. И. Петрашев // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 1. – С. 25–27.

128. Практикум по статистике : учебное пособие / А. П. Зинченко [и др.] ; под ред. А. П. Зинченко. – М. : Колос, 2001. – 392 с.

129. *Прошкин, С. С.* Математика для решения физических задач : учебное пособие / С. С. Прошкин. – СПб. : Лань, 2022. – 384 с.

130. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России : [монография] / А. В. Колганов [и др.] ; под ред. В. Н. Щедрина.– Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. – 222 с.

131. Распыливание жидкостей / Ю. Ф. Дитякин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.

132. РД 70.11.1–89. Машины и установки дождевальные. Программа и методика испытаний. – 68 с.

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

134. *Руднев, М. Ю.* Проблемы и перспективы орошения при выращивании кукурузы в Саратовской области / М. Ю. Руднев, О. Н. Руднева, А. И. Василенко

// Проблемы и перспективы развития сельского хозяйства и сельских территорий : сб. статей IX междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2020. – С. 231–236.

135. *Русинов, А. В.* Определение негативного воздействия дождевальных машин на почву / А. В. Русинов, В. В. Слюсаренко // Вестник Учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. – 2016. – № 9. – С. 145–149.

136. *Русинов, А. В.* Определение степени воздействия пневматических колесных движителей машинно-тракторных агрегатов при работе на орошаемых полях / А. В. Русинов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 3. – С. 42–46.

137. *Русинов, А. В.* Снижение эрозионных процессов орошаемых почв путем минимизации воздействия машинно-тракторных агрегатов и дождевальных машин / А. В. Русинов // Техногенная и природная безопасность : сб. науч. тр. V междунар. науч.-практ. конф. / под ред. С. М. Рогачевой, А. С. Жутова, И. М. Учаевой. – Саратов : Амирит, 2019. – С. 234–237.

138. *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.

139. *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.

140. *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.

141. Рыжаков, А. Н. К вопросу об использовании современной дождевальной техники в России и Ростовской области / А. Н. Рыжаков, Д. В. Мартынов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2022. – № 2 (86). – С. 4–12.

142. Рыжко, Н. Ф. Методика оценки равномерности полива дефлекторных насадок / Н. Ф. Рыжко, А. В. Аверичев, О. В. Карпова // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. трудов по матер. науч.-практ. конф. с международным участием, посвящ. 50-летию образования ФГБНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов, 2016. – С. 97–103.

143. Рыжко, Н. Ф. Моделирование полета струй дождевальных аппаратов и дефлекторных насадок / Н. Ф. Рыжко // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 198–203.

144. Рыжко, Н. Ф. Оценка и расчет равномерности полива дождевальных аппаратов и дефлекторных насадок / Н. Ф. Рыжко, Е. И. Гуркин, Ю. А. Емельянов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2009. – № 3. – С. 41–45.

145. Рыжко, Н. Ф. Повышение равномерности полива ДМ «Фрегат» при ветре / Н. Ф. Рыжко // Нива Поволжья. – 2011. – № 2 (19). – С. 80–83.

146. Рыжко, Н. Ф. Полив многоопорными дождевальными машинами орошаемых участков сложного рельефа и урожайность сои / Н. Ф. Рыжко, Н. В. Рыжко, С. В. Ботов // Мелиорация и водное хозяйство. Пути повышения эффективности и экологической безопасности мелиораций земель Юга России : матер. Всерос. науч.-практ. конф. (Шумаковские чтения) / Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А. К. Кортунова. – Новочеркасск, 2017. – С. 184–192.

147. Рыжко, Н. Ф. Результаты работы по внедрению ДМ «Фрегат» пониженного напора в ОПХ «Красный боец» Ершовского района / Н. Ф. Рыжко, В. Л. Угнавый, И. А. Шушпанов // Актуальные проблемы мелиорации земель Поволжья : сб. науч. тр. / ГУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов, 2002. – С. 133–140.

148. Рыжко, Н. Ф. Совершенствование дождеобразующих устройств для многоопорных дождевальных машин : [монография] / Н. Ф. Рыжко. – Саратов, 2009. – 176 с.

149. Рыжко, Н. Ф. Совершенствование поливной техники и повышение качества дождя на примере низконапорной ресурсосберегающей дождевальной машины «Фрегат» : дис. ... канд. техн. наук / Рыжко Николай Федорович. – Саратов, 2002. – 166 с.

150. Рыжко, Н. Ф. Совершенствование технических средств и технологии орошения в Поволжье: [монография] / Н. Ф. Рыжко. – Саратов: Саратовский источник, 2007. – 110 с.

151. Рыжко, С. Н. Качественные показатели полива дефлекторных насадок / С. Н. Рыжко, А. В. Аверичев, О. В. Карпова // Проблемы и перспективы развития мелиорации в современных условиях : сб. науч. тр. по матер. науч.-практ. конф. с международным участием, посвященной 50-летию образования ФГБНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов, 2016. – С. 103–108.

152. Сайт Всероссийского агрономического совещания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.nsss-russia.ru/wp-content/uploads/2022/01/1.-Nekrasov-Minselhoz-VAS\\_27.01.2022.pdf](https://www.nsss-russia.ru/wp-content/uploads/2022/01/1.-Nekrasov-Minselhoz-VAS_27.01.2022.pdf). Дата обращения 25.10.2022. Загл. с экрана.

153. Салахутдинов, Ш. А. Сопротивление материалов : учебное пособие / Ш. А. Салахутдинов, С. А. Одинцова, Д. В. Шейкман. – М. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 192 с.

154. Слюсаренко, В. В. Влияние конструктивных параметров дефлекторной насадки с кольцевой канавкой на качество дождя / В. В. Слюсаренко, А. В. Русинов, А. П. Акпасов // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2019. – № 1 (18). – С. 211–216.

155. Слюсаренко, В. В. Влияние толщины пограничного слоя при истечении воды в сходящемся сопле на характеристики распыла дождевальной насадкой / В.



В. Слюсаренко, Л. А. Журавлева // Основы рационального природопользования : матер. 2-й междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2009. – С. 282–286.

156. Слюсаренко, В. В. Совершенствование дождевальной техники / В. В. Слюсаренко, Л. А. Журавлева // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2003. – № 2. – С. 50–53.

157. Слюсаренко, В. В. Сохранение плодородия сельскохозяйственных почв за счет снижения негативного воздействия дождя дождевальными машинами / В. В. Слюсаренко, А. В. Русинов, А. П. Акпасов // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды : матер. I Национальной науч.-практ. конф. с международным участием. – Саратов, 2019. – С. 588–594.

158. Слюсаренко, В. В. Формирование дождя дефлекторной насадкой, имеющей кольцевую канавку на конусе дефлектора / В. В. Слюсаренко, А. В. Русинов, А. П. Акпасов // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: матер. IV междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2018. – С. 71–77.

159. Снижение потерь воды при поливе дождеванием / В. В. Слюсаренко [и др.] // Научное обозрение. – 2015. – № 19. – С. 49–52.

160. Снопич, Ю. Ф. Совершенствование технических средств орошения дождеванием / Ю. Ф. Снопич. – Новочеркасск : ООО «Геликон», 2007. – 110 с.

161. Совершенствование дождеобразующих устройств для дождевальных машин «Фрегат» / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Проблемы повышения эффективности использования водных и земельных ресурсов Поволжья : сб. науч. тр., посвящ. 45-летию ФГНУ «ВолжНИИГиМ». – Саратов, 2011. – С. 68–77.

162. Совершенствование технологии полива дождевальными машинами кругового действия «Каскад» / Д. А. Соловьев [и др.] // Научная жизнь. – 2019. – № 1. – С. 57–65.

163. Совершенствование технологии приповерхностного дождевания на ДМ «Фрегат» / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 12. – С. 74–77.

164. Совершенствование устройств приповерхностного дождевания для ДМ «Фрегат» / Д. А. Соловьев [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2016. – № 3. С. 65–68.

165. Совершенствование шкалы оценки мелиоративного состояния орошаемых земель / В. М. Янюк [и др.] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2018. – № 1 (29). – С. 15–30.

166. Современные технические средства полива сельскохозяйственных культур дождеванием / Д. П. Гостищев [и др.] // Природообустройство. – 2008. – № 5. – С. 5–9.

167. *Степанов, П. М.* Справочник по гидравлике для мелиораторов / П. М. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. – М. : Колос, 1984. – 207 с.

168. *Строков, А. С.* Необходимость развития мелиорации для увеличения урожайности в засушливых регионах / А. С. Строков // Аграрная наука. – 2023. – № 1. – С. 61–64.

169. *Таланов, Н. Н.* Влияние скорости ветра на равномерность полива ДМ «Волжанка», оснащенной дефлекторными насадками / Н. Н. Таланов // Инновации, наука и образование : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Саратов: КУ-БиК, 2010. – С. 184–186.

170. Теоретическое и экспериментальное обоснование параметров дефлекторной насадки / Ю. Ф. Снопич [и др.] // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2019. – № 2 (34). – С. 104–120.

171. Техническая модернизация системы мелиорации как резерв повышения эффективности сельского хозяйства / А. К. Субаева [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2017. – Т. 12. – № 3 (45). – С. 124–127.

172. Улучшение качественных показателей полива многоопорными дождевальными машинами / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. IX междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2022. – С. 83–88.

173. Урожайность сортов сои в условиях орошения сухостепной зоны Поволжья / В. О. Пешкова [и др.] // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. – 2016. – № 3 (167). – С. 59–63.

174. *Фокин, Б. П.* Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин : [монография] / Б. П. Фокин, А. К. Носов. – Ставрополь, 2011. – 80 с.

175. *Хабаров, В. Е.* Исследования влияния метеорологических факторов на зону формирования искусственного дождя при орошении : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Хабаров Василий Евгеньевич. – Новочеркасск, 1982. – 20 с.

176. *Хабаров, В. Е.* Потери воды на испарение и снос ветром при дождевании / В. Е. Хабаров // Рациональное использование и охрана природных ресурсов : сб. науч. тр. / ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1980. – С. 28–36.

177. *Хаджиди, А. П.* Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России / А. П. Хаджиди, Д. Д. Кобылешный // Климатические изменения и «зеленые» технологии в ландшафтной среде : матер. междунар. науч.-практ. конф. / ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова». – Грозный, 2022. – С. 155–157.

178. *Черноволов, В. А.* Моделирование процесса дождевания машинами фронтального действия с секторными насадками / В. А. Черноволов, Л. В. Кравченко, В. А. Луханин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 100. – С. 670–680.

179. *Четыркин, Н. В.* Статистические методы прогнозирования / Н. В. Четыркин. – М. : Статистика, 1975. – 184 с.

180. *Чучкалов, С. И.* Определение момента начала стока воды на склонах при поливе / С. И. Чучкалов, В. П. Филиппов, И. И. Максимов // Экология и мелиорация агроландшафтов : перспективы и достижения молодых ученых : матер. VII междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, посвящ. 120-летию со дня рождения Альбенского Анатолия Васильевича. – Волгоград, 2019. – С. 161–162.

181. *Шадских, В. А.* Концептуальное обоснование рационального использования орошаемых земель Заволжья в условиях импортозамещения / В. А. Шадских, В. Е. Кижяева, Б. Н. Бельтиков // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2022. – № 4 (388). – С. 429–434.

182. *Шадских, В. А.* Эффективность освоения адаптивной ресурсосберегающей технологии сои в Саратовском Заволжье / В. А. Шадских, В. Е. Кижяева // Орошаемое земледелие. – 2021. – № 3. – С. 23–26.

183. *Шепелев, А. Е.* Дождеобразующие устройства зарубежной широкозахватной многоопорной дождевальнoй техники / А. Е. Шепелев, В. Э. Завалюев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2015. – № 3. – С. 191–195.

184. *Штангей, А. И.* Испарение воды с дождевального облака при поливе машиной «Фрегат» / А. И. Штангей // Метеорология и гидрология. – 1977. – № 10. – С. 72–76.

185. *Штеренлихт, Д. В.* Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. – М. : КолосС, 2004. – 656 с.

186. *Щедрин, В. Н.* Оросительные системы России : от поколения к поколению : [монография] / В. Н. Щедрин, А. В. Колганов. – Новочеркасск, 2013. – 283 с.

187. *Щедрин, В. Н.* Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин. – М. : Росиформагротех, 2005. – 388 с.

188. Экологическая и экономическая оптимизация эксплуатационного режима орошения современными дождевальными машинами / В. Ф. Василенков [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. – 2015. – № 4 (28). – С. 85–92.

189. Экономическая эффективность технических решений : учебное пособие / С. Г. Баранчикова [и др.] ; под общ. ред. проф. И. В. Ершовой. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 140 с.

190. *Юркова, Р. Е.* Влияние режимов орошения на водопотребление, развитие и урожайность сои / Р. Е. Юркова, С. А. Селицкий, Л. М. Докучаева / Мелиорация и гидротехника. – 2022. – Т. 12. – № 4. – С. 204–217.

191. *Яковлев, В. Б.* Статистика. Расчеты в Microsoft Excel / В. Б. Яковлев. – М. : Колос, 2005. – 352 с.

192. Assessing Low-Pressure Solid-Set Sprinkler Irrigation in Maize / O. Robles [et al.] // Agricultural Water Management. – Vol. 191. – September 2017. – P. 37–49.

193. *Bradley, A. King*. Optimal Performance from Center Pivot / A. King Bradley, C. Dennis // Copyright © 1997 University of Idaho College of Agriculture . Cooperative Extension System | Agricultural Experiment Station. – 1997. – P. 20.

194. Catalog–Komet–Pivot–5–Features. Komet Austria GmbH. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.kometirrigation.com](http://www.kometirrigation.com). Дата обращения 20.12.2021 г. Загл. с экрана.

195. Characteristics of Rotary Sprinklers Using an Experimental Irrigation Machine / E. Playan [et al.] // *Agricultural Water Management*. – Vol. 70. – Issue 3. – 25 December, 2004. – P. 177–193.

196. Characterizing Pivot Sprinklers Using an Experimental Irrigation Machine / E. Playán [et al.] // *Agricultural Water Management*. – Vol. 70. – Issue 3. – 25 December, 2004. – P. 177–193.

197. Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems / Jian Jiao [et al.] // Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University. Published: 21 April, 2017 – P. 1–17.

198. *Jiang, Y*. Droplet Distribution Characteristics of Impact Sprinklers with Circular and Noncircular Nozzles : Effect of Nozzle Aspect Ratios and Equivalent Diameters. / Y. Jiang, J. Liu // *Biosystems Engineering*. – Vol. 212. – December 2021. – P. 200–214.

199. *Kisambuli, E. K*. The Effects of Windbreaks on the Effectiveness of Sprinkler Irrigation Systems / E. K. Kilaka // Waterways Centre for Freshwater Management University of Canterbury Christchurch, New Zealand. – 2015. – P. 169.

200. Quantifying Winter Wheat Evapotranspiration and Crop Coefficients under Sprinkler Irrigation Using Eddy Covariance Technology in the North China Plain / F. Xuyu [et al.] // *Agricultural Water Management*. – 2023. – 277. – 108131.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## Результаты обработки

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $d_{отв}$ , мм

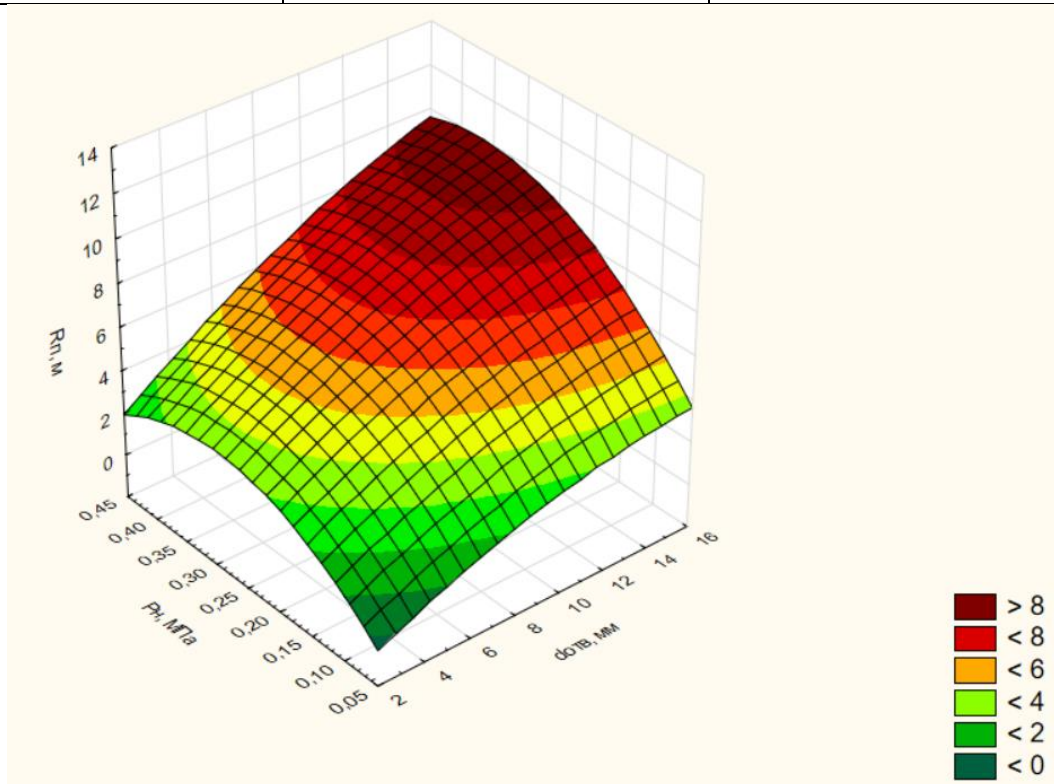
$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$d_{отв}$ , мм
2,54	0,1	3
4,55	0,2	3
4,59	0,3	3
4,68	0,4	3
2,92	0,1	4
5,17	0,2	4
5,49	0,3	4
5,54	0,4	4
3,58	0,1	5
5,98	0,2	5
6,39	0,3	5
6,56	0,4	5
4,05	0,1	6
6,6	0,2	6
7,21	0,3	6
7,42	0,4	6
4,24	0,1	7
7,58	0,2	7
7,86	0,3	7
8,2	0,4	7
4,43	0,1	8
8,3	0,2	8
8,68	0,3	8
8,98	0,4	8
4,71	0,1	9
8,75	0,2	9
9,67	0,3	9
9,84	0,4	9
4,91	0,1	10

9,1	0,2	10
10,32	0,3	10
10,42	0,4	10
5,47	0,1	11
9,64	0,2	11
10,49	0,3	11
10,62	0,4	11
5,84	0,1	12
9,73	0,2	12
10,98	0,3	12
11,23	0,4	12
6,41	0,1	13
10,26	0,2	13
11,39	0,3	13
11,54	0,4	13
6,98	0,1	14
10,8	0,2	14
11,72	0,3	14
11,94	0,4	14
7,17	0,1	15
11,51	0,2	15
12,13	0,3	15
12,42	0,4	15
2,31	0,1	3
4,14	0,2	3
4,17	0,3	3
4,25	0,4	3
2,65	0,1	4
4,7	0,2	4
4,99	0,3	4
5,04	0,4	4
3,25	0,1	5



5,44	0,2	5
5,81	0,3	5
5,96	0,4	5
3,68	0,1	6
6,01	0,2	6
6,55	0,3	6
6,75	0,4	6
3,85	0,1	7
6,89	0,2	7
7,15	0,3	7
7,45	0,4	7
4,03	0,1	8
7,55	0,2	8
7,89	0,3	8
8,16	0,4	8
4,28	0,1	9
7,96	0,2	9
8,79	0,3	9
8,95	0,4	9
4,46	0,1	10
8,27	0,2	10
9,38	0,3	10
9,47	0,4	10
4,97	0,1	11
8,76	0,2	11
9,54	0,3	11
9,65	0,4	11
5,31	0,1	12
8,85	0,2	12
9,98	0,3	12
10,21	0,4	12
5,83	0,1	13

9,33	0,2	13
10,35	0,3	13
10,49	0,4	13
6,35	0,1	14
9,82	0,2	14
10,65	0,3	14
10,85	0,4	14
6,52	0,1	15
10,46	0,2	15
11,03	0,3	15
11,29	0,4	15



$$R_n = -3,0202 + 0,5291d_{отв} + 35,1845P_n - 0,0154d_{отв}^2 + 0,6593P_n d_{отв} - 61,5615P_n^2$$

R= 0,9864 Корреляция между вычисленными и опытными данными

R2= 0,9749 достоверность (очень высокая)

s= 125,57 среднеквадратичное (стандартное) отклонение

Оптимума нет

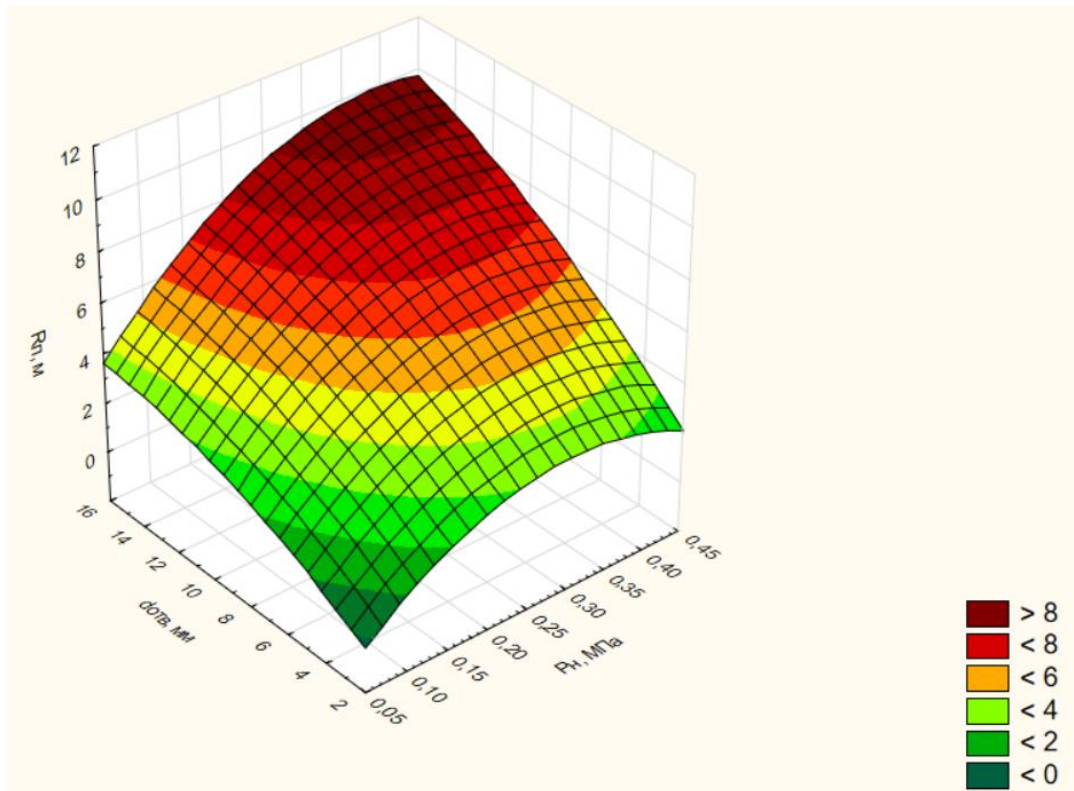
**Влияние диаметра выходного отверстия и давления воды на выходе из сопла предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 12 ребер, установленной на высоте 1,0 м над поверхностью поля, на радиус полива**

Результаты обработки:

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $d_{отв}$ , мм,  $h=1$  м

$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$d_{отв}$ , мм
1,92	0,1	3
3,22	0,2	3
3,45	0,3	3
3,53	0,4	3
2,2	0,1	4
3,59	0,2	4
4,14	0,3	4
4,17	0,4	4
2,7	0,1	5
4,16	0,2	5
4,81	0,3	5
4,94	0,4	5
3,05	0,1	6
4,71	0,2	6
5,43	0,3	6
5,59	0,4	6
3,2	0,1	7
5,4	0,2	7
5,92	0,3	7
6,17	0,4	7
3,33	0,1	8
6,11	0,2	8
6,54	0,3	8
6,76	0,4	8
3,55	0,1	9

6,25	0,2	9
7,28	0,3	9
7,41	0,4	9
3,7	0,1	10
6,39	0,2	10
7,77	0,3	10
7,84	0,4	10
4,12	0,1	11
7,03	0,2	11
7,91	0,3	11
8	0,4	11
4,39	0,1	12
7,19	0,2	12
8,27	0,3	12
8,45	0,4	12
4,83	0,1	13
7,47	0,2	13
8,58	0,3	13
8,69	0,4	13
5,26	0,1	14
7,6	0,2	14
8,82	0,3	14
8,99	0,4	14
5,4	0,1	15
8,27	0,2	15
9,14	0,3	15
9,36	0,4	15



$$R_{\Pi} = -2,7562 + 31,4048P_{\text{H}} + 0,5284d_{\text{отв}} - 53,6538P_{\text{H}}^2 + 0,6659P_{\text{H}}d_{\text{отв}} - 0,0158d_{\text{отв}}^2$$

R2= 0,98472 достоверность (очень высокая)

Оптима нет

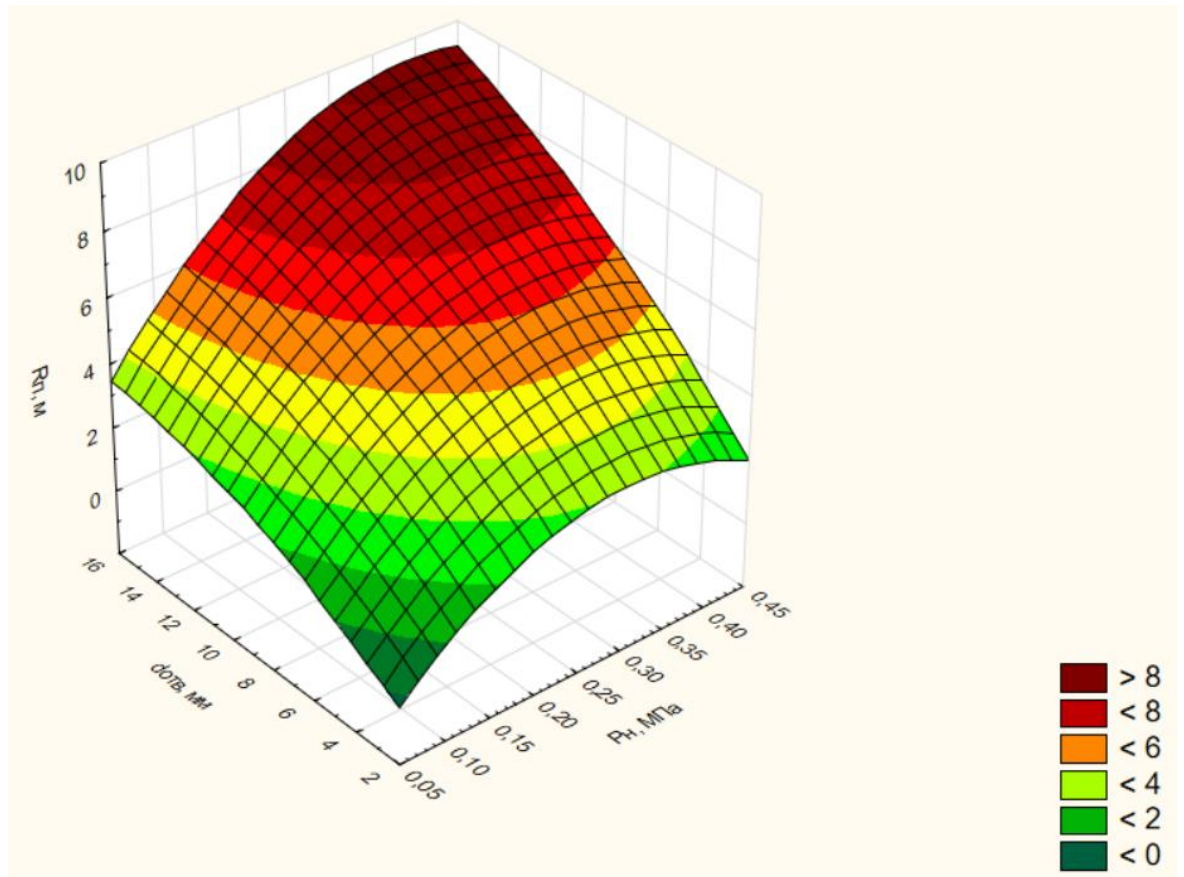
**Влияние диаметра выходного отверстия и давления воды на выходе из сопла предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 18 ребер, установленной на высоте 1,0 м над поверхностью поля, на радиус полива**

Результаты обработки:

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $d_{отв}$ , мм,  $h=1$  м

$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$d_{отв}$ , мм
1,82	0,1	3
3,06	0,2	3
3,28	0,3	3
3,35	0,4	3
2,09	0,1	4
3,41	0,2	4
3,93	0,3	4
3,97	0,4	4
2,56	0,1	5
3,96	0,2	5
4,57	0,3	5
4,7	0,4	5
2,9	0,1	6
4,48	0,2	6
5,16	0,3	6
5,31	0,4	6
3,04	0,1	7
5,14	0,2	7
5,63	0,3	7
5,87	0,4	7
3,17	0,1	8
5,81	0,2	8
6,22	0,3	8
6,43	0,4	8

3,38	0,1	9
5,94	0,2	9
6,93	0,3	9
7,04	0,4	9
3,51	0,1	10
6,08	0,2	10
7,39	0,3	10
7,46	0,4	10
3,92	0,1	11
6,68	0,2	11
7,52	0,3	11
7,61	0,4	11
4,18	0,1	12
6,83	0,2	12
7,86	0,3	12
8,04	0,4	12
4,59	0,1	13
7,1	0,2	13
8,15	0,3	13
8,26	0,4	13
5	0,1	14
7,23	0,2	14
8,39	0,3	14
8,55	0,4	14
5,14	0,1	15
7,86	0,2	15
8,69	0,3	15
8,9	0,4	15



$$R_{\Pi} = -2,6279 + 29,8532P_{\text{H}} + 0,504d_{\text{отв}} - 50,9808P_{\text{H}}^2 + 0,6324P_{\text{H}}d_{\text{отв}} - 0,0151d_{\text{отв}}^2$$

R2= 0,97283 достоверность (очень высокая)

Оптима нет



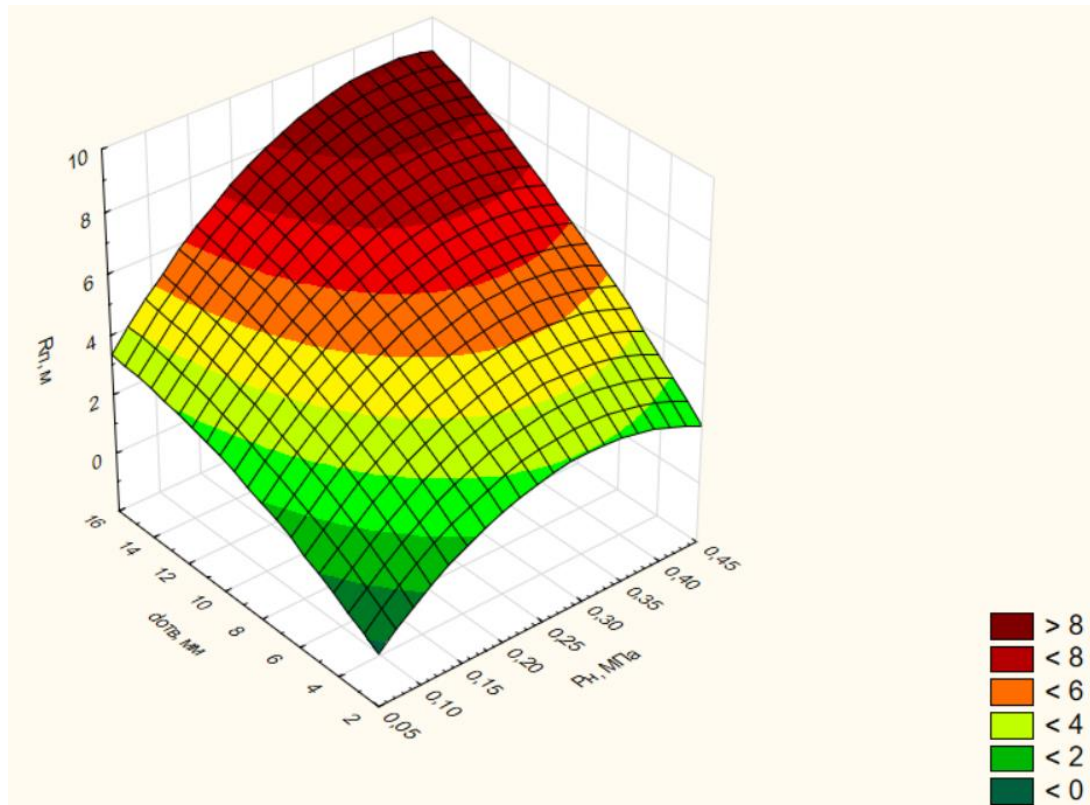
**Влияние диаметра выходного отверстия и давления воды на выходе из сопла предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором, имеющим 24 ребра, установленной на высоте 1,0 м над поверхностью поля, на радиус полива**

Результаты обработки:

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $d_{отв}$ , мм,  $h=1$  м

$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$d_{отв}$ , мм
1,76	0,1	3
2,96	0,2	3
3,17	0,3	3
3,24	0,4	3
2,02	0,1	4
3,29	0,2	4
3,8	0,3	4
3,83	0,4	4
2,48	0,1	5
3,82	0,2	5
4,41	0,3	5
4,54	0,4	5
2,8	0,1	6
4,32	0,2	6
4,98	0,3	6
5,13	0,4	6
2,93	0,1	7
4,96	0,2	7
5,43	0,3	7
5,67	0,4	7
3,06	0,1	8
5,61	0,2	8
6	0,3	8

6,2	0,4	8
3,26	0,1	9
5,73	0,2	9
6,69	0,3	9
6,8	0,4	9
3,39	0,1	10
5,87	0,2	10
7,13	0,3	10
7,2	0,4	10
3,79	0,1	11
6,45	0,2	11
7,26	0,3	11
7,35	0,4	11
4,03	0,1	12
6,6	0,2	12
7,59	0,3	12
7,76	0,4	12
4,44	0,1	13
6,85	0,2	13
7,87	0,3	13
7,97	0,4	13
4,83	0,1	14
6,98	0,2	14
8,1	0,3	14
8,25	0,4	14
4,96	0,1	15
7,59	0,2	15
8,39	0,3	15
8,59	0,4	15



$$R_{\Pi} = -2,5297 + 28,8063P_{\text{H}} + 0,4853d_{\text{отв}} - 49,1731P_{\text{H}}^2 + 0,6092P_{\text{H}}d_{\text{отв}} - 0,0145d_{\text{отв}}^2$$

R2= 0,981671 достоверность (очень высокая)

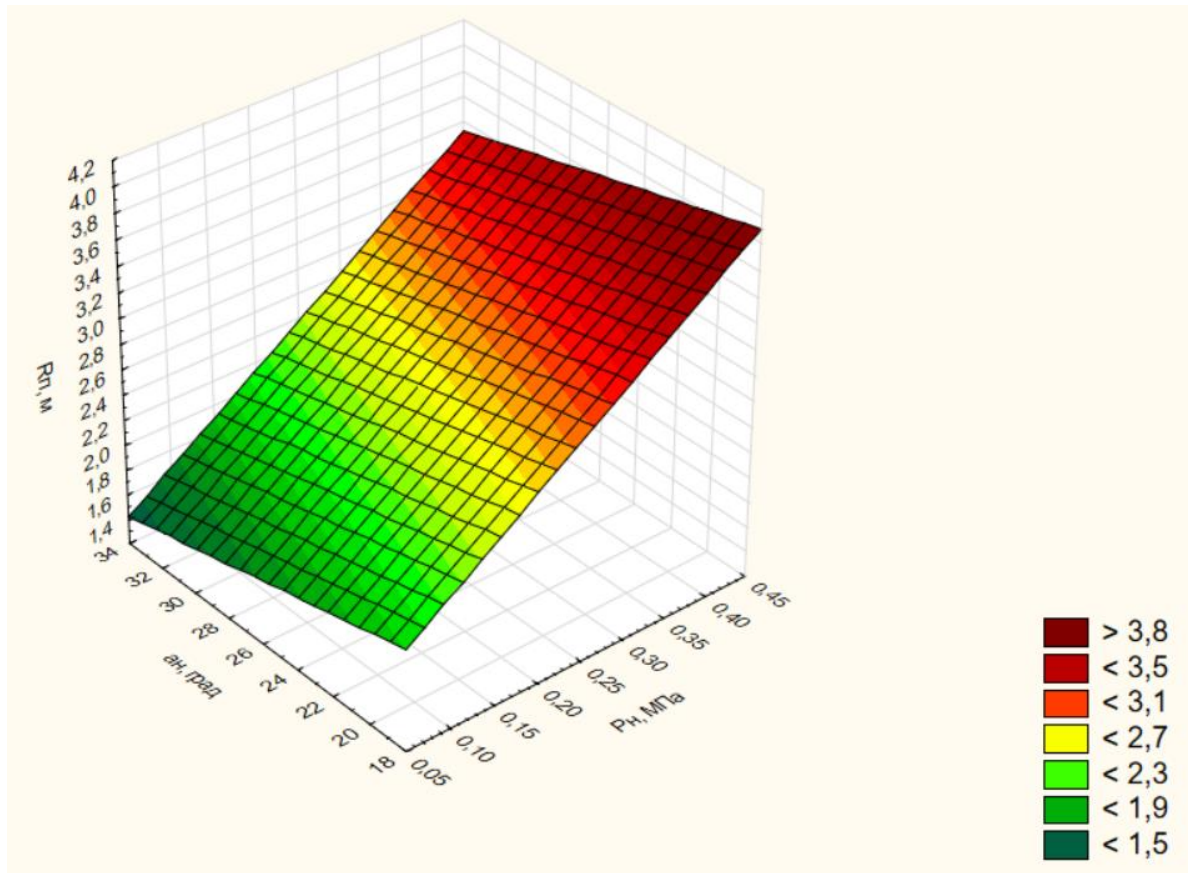
Оптимума нет

**Влияние на радиус полива предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором с 12 ребрами величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, относительно поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)**

Результаты обработки:

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $\alpha_{н}$ , град,  $d_{отв}=3\text{мм}$ ,  $h=1\text{ м}$

$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$\alpha_{н}$ , град
1,82	0,1	20
2,61	0,2	20
3,18	0,3	20
3,35	0,4	20
1,66	0,1	24
2,36	0,2	24
2,87	0,3	24
3,01	0,4	24
1,64	0,1	28
2,31	0,2	28
2,78	0,3	28
2,87	0,4	28
1,56	0,1	32
2,18	0,2	32
2,63	0,3	32
2,76	0,4	32



$$R_n = 0,24179 + 4,7775P_n - 0,0363\alpha_n$$

R2= 0,97348 достоверность (очень высокая)

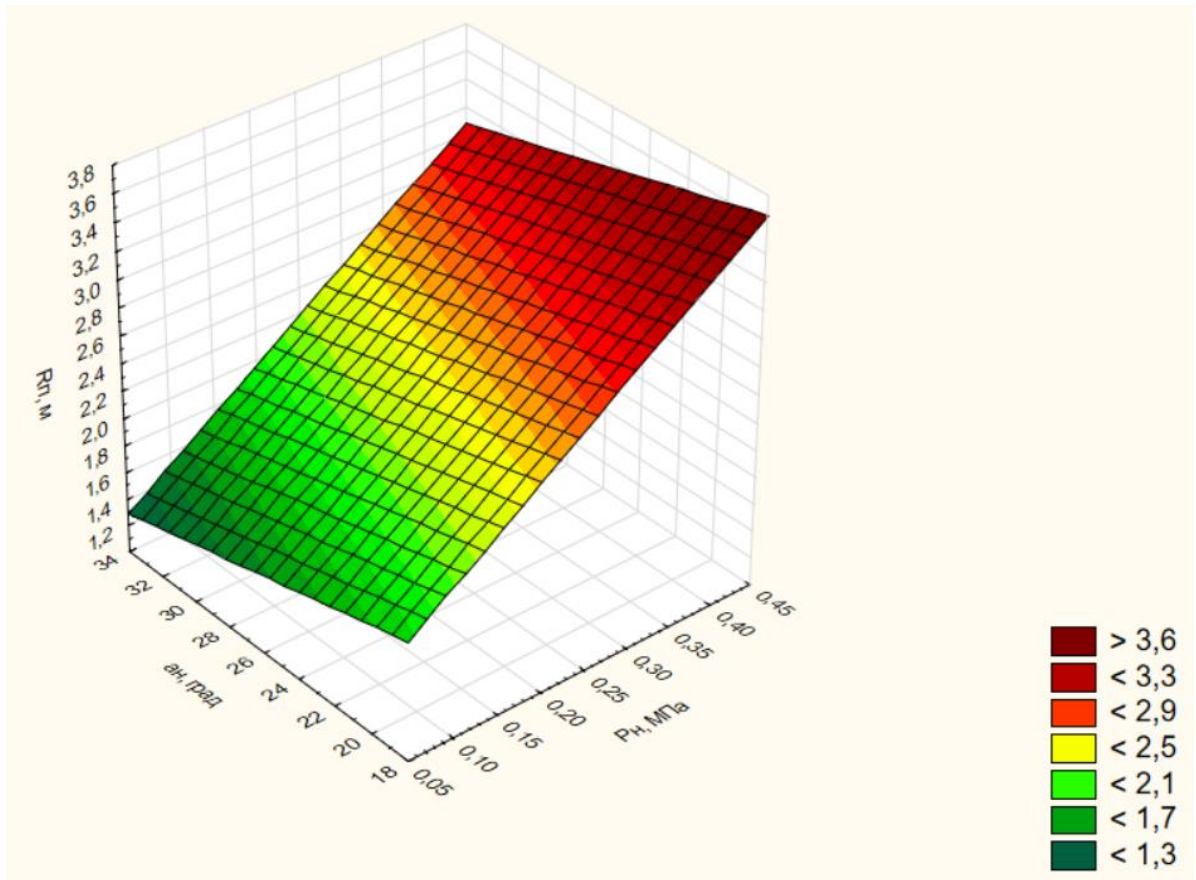
Оптimuma нет

**Влияние на радиус полива предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором с 18 ребрами величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, относительно поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)**

Результаты обработки:

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $\alpha_{н}$ , град,  $d_{отв}=3\text{мм}$ ,  $h=1\text{ м}$

$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$\alpha_{н}$ , град
1,76	0,1	20
2,57	0,2	20
3,08	0,3	20
3,24	0,4	20
1,59	0,1	24
2,31	0,2	24
2,76	0,3	24
2,9	0,4	24
1,58	0,1	28
2,26	0,2	28
2,66	0,3	28
2,76	0,4	28
1,5	0,1	32
2,13	0,2	32
2,53	0,3	32
2,64	0,4	32



$$R_n = 2,2946 + 4,4825P_n - 0,0362\alpha_n$$

$R^2 = 0,98276$  достоверность (очень высокая)

Оптима нет

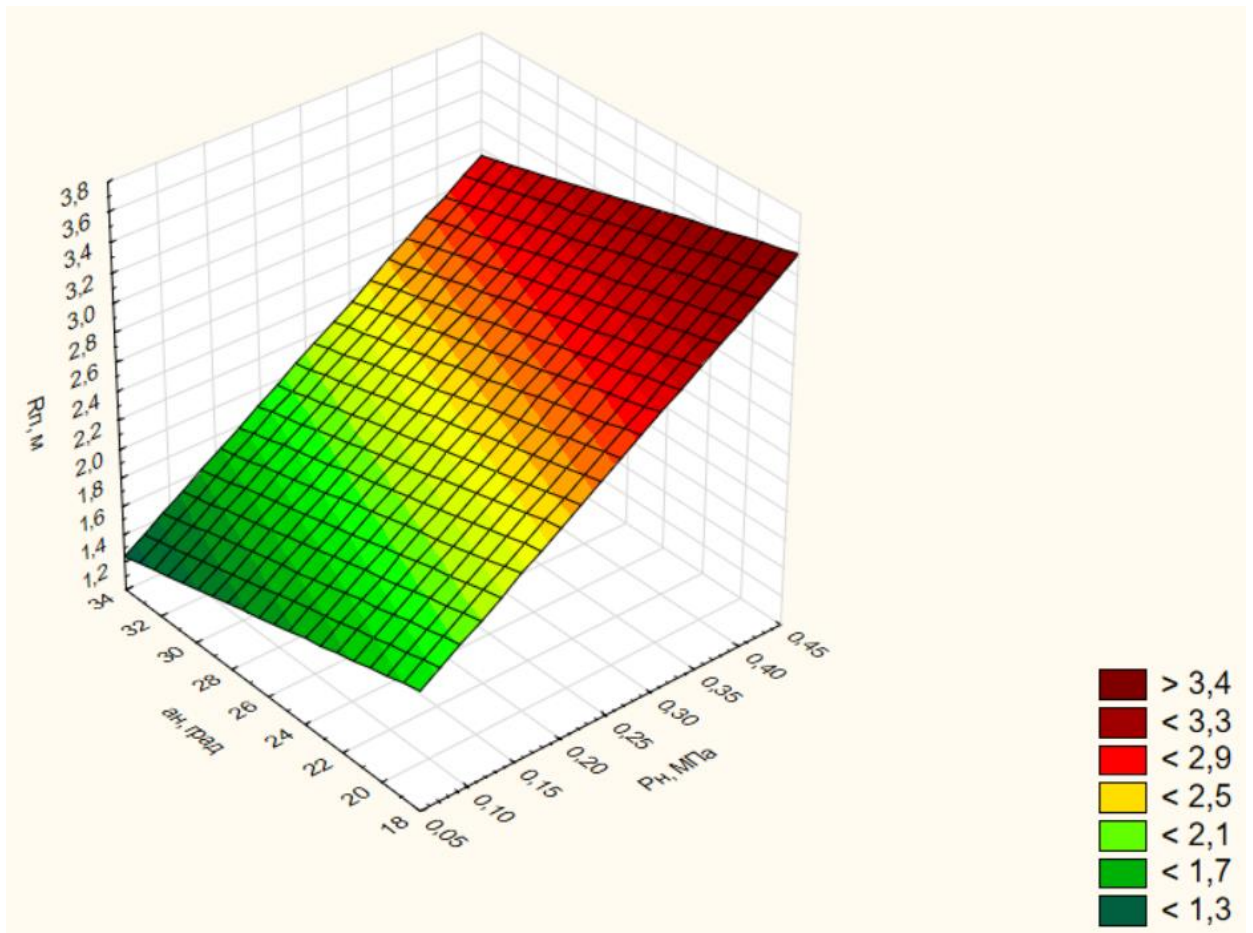
**Влияние на радиус полива предлагаемой дождевальной насадки с вращающимся дефлектором с 24 ребрами величины угла наклона струи воды, сходящей с основания дефлектора, относительно поверхности поля (высота установки дождевальной насадки 1 м, диаметр сопла выходного отверстия 3 мм)**

Результаты обработки:

1.  $R_{п}$ , м от  $P_{н}$ , МПа и  $\alpha_{н}$ , град,  $d_{отв}=3\text{мм}$ ,  $h=1\text{ м}$

$R_{п}$ , м	$P_{н}$ , МПа	$\alpha_{н}$ , град
1,96	0,1	20
2,91	0,2	20
3,43	0,3	20
3,62	0,4	20
1,83	0,1	24
2,68	0,2	24
3,13	0,3	24
3,28	0,4	24
1,78	0,1	28
2,59	0,2	28
3,03	0,3	28
3,15	0,4	28
1,71	0,1	32
2,49	0,2	32
2,91	0,3	32
3,05	0,4	32





$$R_n = 2,2744 + 4,2725P_n - 0,0366\alpha_n$$

$R^2 = 0,98437$       достоверность (очень высокая)

Оптима нет

**Аппроксимационные зависимости, описывающие влияние давления воды на выходе из сопла дождевальной насадки на процентное распределение диаметра капель дождя**

$$\text{ГК} - \Pi = 5,3P_{\text{H}} + 10 \quad R^2 = 0,9515$$

$$\text{ВД-24} - \Pi = 3,7P_{\text{H}} + 13,1 \quad R^2 = 0,9675$$

$$\text{ВД-18} - \Pi = 4,9P_{\text{H}} + 11,95 \quad R^2 = 0,9623$$

$$\text{ВД-12} - \Pi = 4,6P_{\text{H}} + 11,6 \quad R^2 = 0,9523$$

$$\text{ВД-6} - \Pi = 2,9P_{\text{H}} + 9,65 \quad R^2 = 0,9836$$

$$\text{i-Wob} - \Pi = 2,7P_{\text{H}} + 9,2 \quad R^2 = 0,9606$$

**Диаметр капель дождя**

**от 0,3 мм до 0,5 мм**

$$\text{ГК} - \Pi = -4,4P_{\text{H}} + 22,5 \quad R^2 = 0,968$$

$$\text{ВД-24} - \Pi = -4,7P_{\text{H}} + 24 \quad R^2 = 0,9973$$

$$\text{ВД-18} - \Pi = -4,7P_{\text{H}} + 25,6 \quad R^2 = 0,9973$$

$$\text{ВД-12} - \Pi = -4,8P_{\text{H}} + 27,35 \quad R^2 = 0,9521$$

$$\text{ВД-6} - \Pi = -5,6P_{\text{H}} + 28,4 \quad R^2 = 0,9561$$

$$\text{i-Wob} - \Pi = -3,6P_{\text{H}} + 20,2 \quad R^2 = 0,9818$$

**Диаметр капель дождя**

**от 1,0 мм до 1,5 мм**

$$\text{ГК} - \Pi = -6,7P_{\text{H}} + 14 \quad R^2 = 0,9727$$

$$\text{ВД-24} - \Pi = -6P_{\text{H}} + 11,6 \quad R^2 = 0,9783$$

$$\text{ВД-18} - \Pi = -5,8P_{\text{H}} + 11,3 \quad R^2 = 0,9723$$

$$\text{ВД-12} - \Pi = -5,2P_{\text{H}} + 11 \quad R^2 = 0,9657$$

$$\text{ВД-6} - \Pi = -5,1P_{\text{H}} + 11,25 \quad R^2 = 0,9797$$

$$\text{i-Wob} - \Pi = -9,2P_{\text{H}} + 19,4 \quad R^2 = 0,9706$$

**Диаметр капель дождя**

**от 2,1 мм до 3,0 мм**

$$\text{ГК} - \Pi = 12,8P_{\text{H}} + 22 \quad R^2 = 0,9776$$

$$\text{ВД-24} - \Pi = 15,8P_{\text{H}} + 26,45 \quad R^2 = 0,9922$$

$$\text{ВД-18} - \Pi = 13,5P_{\text{H}} + 26,35 \quad R^2 = 0,9645$$

$$\text{ВД-12} - \Pi = 13,2P_{\text{H}} + 26 \quad R^2 = 0,9855$$

$$\text{ВД-6} - \Pi = 11,5P_{\text{H}} + 26,05 \quad R^2 = 0,9826$$

$$\text{i-Wob} - \Pi = 7,1P_{\text{H}} + 19,4 \quad R^2 = 0,9972$$

**Диаметр капель дождя**

**от 0,6 мм до 0,8 мм**

$$\text{ГК} - \Pi = -10,2P_{\text{H}} + 26,55 \quad R^2 = 0,9598$$

$$\text{ВД-24} - \Pi = -6,4P_{\text{H}} + 18 \quad R^2 = 0,9942$$

$$\text{ВД-18} - \Pi = -7,0P_{\text{H}} + 18,55 \quad R^2 = 0,9646$$

$$\text{ВД-12} - \Pi = -7,9P_{\text{H}} + 18,9 \quad R^2 = 0,9609$$

$$\text{ВД-6} - \Pi = -5,4P_{\text{H}} + 20 \quad R^2 = 0,9918$$

$$\text{i-Wob} - \Pi = -9,3P_{\text{H}} + 30,4 \quad R^2 = 0,9856$$

**Диаметр капель дождя**

**от 1,6 мм до 2,0 мм**

$$\text{ГК} - \Pi = 4,8P_{\text{H}} + 4,35 \quad R^2 = 0,9846$$

$$\text{ВД-24} - \Pi = -5,2P_{\text{H}} + 7,35 \quad R^2 = 0,9869$$

$$\text{ВД-18} - \Pi = -4,2P_{\text{H}} + 7,2 \quad R^2 = 0,9692$$

$$\text{ВД-12} - \Pi = 1,7P_{\text{H}} + 4,75 \quad R^2 = 0,9797$$

$$\text{ВД-6} - \Pi = 1,3P_{\text{H}} + 4,65 \quad R^2 = 0,9657$$

$$\text{i-Wob} - \Pi = -1,3P_{\text{H}} + 6,8 \quad R^2 = 0,9657$$

**Диаметр капель дождя**

**более 3,0 мм и менее 0,3 мм**

СОГЛАСОВАНО:

Ректор  
ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
Д.А. Соловьев  
«15» ноября 2022 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО «Наше дело»  
С.В. Ботов  
«16» ноября 2022 г.

**АКТ**  
**о внедрении законченной научно-исследовательской  
и опытно-конструкторской работы**

Мы, ниже подписавшиеся, представители ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» в декана факультета инженерии и природообустройства Шишурина Сергея Александровича, научного руководителя НИР, профессора кафедры «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» Кравчука Алексея Владимировича и представители ООО «Наше дело» в лице директора Ботова Сергея Васильевича, главного гидротехника Мещенкова Василия Николаевича, составили настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской работы по теме «Внедрение дождевальных насадок с вращающимся дефлектором на электрофицированных дождевальных машинах кругового действия», выполненных ФГБОУ ВО Вавиловский университет в 2020-2022 г.г. внедрены на орошаемых землях в ООО «Наше дело» (с. Ленинское Энгельского района Саратовской области, Гагаринская оросительная система Энгельского филиала ФГБУ «Управление Саратовмелиоводхоз») путем непосредственного использования результатов НИР.

Основные результаты НИР: Разработана, изготовлена и испытана новая конструкция дождевальной насадки с вращающимся дефлектором для дождевальной машины «КАСКАД». Оборудование ДМ «КАСКАД» разработанными дождевальными насадками обеспечило более качественное распределение слоя осадков по длине машины и радиусу полива, что позволило повысить коэффициент равномерности полива до 0,76. Снизить среднюю интенсивность дождя до  $0,294 \pm 0,725$  мм/мин при диаметре его капель в пределах  $0,6 \div 1,2$  мм. Повысить ветроустойчивость дождя и уменьшить до 16 % потери дождя на испарение и снос ветром. Обеспечивать до стокую норму полива. Повысить урожай сельскохозяйственных культур до 9 %.

Дождевальные насадки с вращающимся дефлектором хорошо зарекомендовали себя в процессе всего периода эксплуатации, эффективно работали, выходов из строя по причине поломок не обнаружено.

От ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
Декан факультета инженерии и  
природообустройства, д.т.н.  
\_\_\_\_\_/Шишурина С.А./

От ООО «Наше дело»  
Гл. гидротехник  
\_\_\_\_\_/Мещенков В.Н./

Исполнитель: д.т.н., профессор  
\_\_\_\_\_/Кравчук А.В./

Аспирант  
\_\_\_\_\_/Русинов Д.А./



СОГЛАСОВАНО:

Директор  
 ООО «Мелиоративные машины»  
 Соловьева В.А.  
 «03» \_\_\_\_\_ 20 23 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор  
 ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
 Соловьев Д.А.  
 «04» \_\_\_\_\_ 20 23 г.

АКТ

**о внедрении законченной научно-исследовательской  
 и опытно-конструкторской работы**

Мы, представители ООО «Мелиоративные машины», в лице директора Соловьева Владимира Александровича и сервисного инженера Маркова Кирилла Денисовича настоящим актом подтверждаем, что результаты Научно-исследовательской работы (НИР) по внедрению дождевальных насадок с вращающимся дефлектором для дождевальных машин кругового действия «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД), выполненных кафедрой «Гидромелиорация, природообустройство и строительство в АПК» ФГБОУ ВО Вавиловский университет, внедрены в 2020-2023 г.г. на орошаемых полях УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Вавиловский университет и ООО «Наше дело» (с. Ленинское Энгельсского района Саратовской области). Количество внедренных машин оснащенных дождевальными насадками с вращающимся дефлектором – 5 шт.

Начало работы – ноябрь 2020 г.

Завершение работы – апрель 2023 г.

Вид внедрения результатов: разработка, изготовление и установка дождевальных насадок с вращающимся дефлектором на дождевальных машинах работающих на орошаемых полях ООО «Наше дело». Проведение испытаний и научных исследований.

Область внедрения: современная мелиоративная техника.

Основные результаты: установка на дождевальные машины кругового действия дождевальных насадок с вращающимся дефлектором позволяет повысить равномерность полива по всей длине машины и радиусу полива насадки; снизить потери дождя на испарение и снос ветром до 16 %; обеспечить агротехнические показатели дождя с большим содержанием капель дождя с диаметром в пределах 0,6÷1,2 мм и средней интенсивностью дождя 0,294÷0,725 мм/мин; обеспечивать полив с до стоковыми нормами и повысить урожай сельскохозяйственных культур.

Технический уровень НИР: создание новых конструкций дождевальных насадок с вращающимся дефлектором (патенты на изобретение и полезную модель).

Срок окупаемости вложений: в течении 1-го поливного сезона (при использовании на сельскохозяйственной культуре – соя).


От ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
Декан факультета инженерии и  
природообустройства, д.т.н.

 /Шишурин С.А./

Д.т.н., профессор

 /Кравчук А.В./

Аспирант

 /Русинов Д.А./


От ООО «Мелиоративные машины»

Сервисный инженер

 /Марков К.Д./

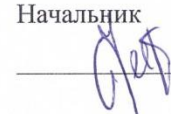
От ООО «Наше дело»

Гл. гидротехник

 /Мещенков В.Н./

От УНПО «Поволжье»

Начальник

 /Четвериков Ф.П./

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 615 574** (13) **C1**(51) МПК  
A01G 25/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015148623, 12.11.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
12.11.2015Дата регистрации:  
05.04.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.11.2015

(45) Опубликовано: 05.04.2017 Бюл. № 10

Адрес для переписки:

410012, Саратовская обл., г. Саратов, пл.  
Театральная, 1, ФГБОУ ВО "Саратовский ГАУ",  
патентный отдел

(72) Автор(ы):

Русинов Алексей Владимирович (RU),  
Слюсаренко Владимир Васильевич (RU),  
Хизов Андрей Викторович (RU),  
Русинов Дмитрий Алексеевич (RU),  
Акпасов Антон Павлович (RU),  
Рыжко Николай Федорович (RU),  
Надежкина Галина Петровна (RU),  
Затинацкий Сергей Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Саратовский государственный  
аграрный университет им Н.И. Вавилова"  
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2313404 C1, 27.12.2007. SU  
1613179 A2, 15.12.1990. IL 73960 A, 19.03.1990.  
RU 2174876 C1, 20.10.2001.

(54) Дождевальная дефлекторная насадка

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике полива дождеванием и может быть использовано в дождевальных машинах и установках для орошения сельскохозяйственных культур. Дождевальная дефлекторная насадка содержит корпус с выходным отверстием и резьбой для присоединения. На кронштейне-держателе во втулке на оси расположен дефлектор. Дефлектор имеет криволинейно вогнутую поверхность. В центре дефлектора расположен бульб выпуклой эллипсоидной формы. Большая ось бульбы совпадает с осью дефлектора. На дефлекторе

выполнены уступы треугольной формы переменного сечения. Сечение попеременно увеличивается и уменьшается к периферии. Высота уступов равна не менее толщины водяной пленки. Каждая лежащая в радиальной плоскости к оси вращения дефлектора грань каждого предыдущего уступа является началом каждой последующей вертикально расположенной границы уступа. Обеспечивается получение мелкодисперсного дождя с более равномерными каплями и их равномерное распределение в дождевом облаке. 4 ил.

RU 2 615 574 C1

RU 2 615 574 C1

RU 2 615 574 C1

Изобретение относится к технике полива мелкодисперсным и капельным дождеванием и может быть использовано в дождевальных машинах и установках для орошения широкого спектра возделываемых сельскохозяйственных культур.

5 Известна насадка, содержащая корпус, закрепленный на стойке дефлектор и сопло с центральным отверстием, при этом сопло и корпус выполнены единой деталью, при этом центральное отверстие сопла сопряжено с полостью корпуса и выполнено с сужением в направлении среза сопла, а установленный на стойке дефлектор выполнен в виде тела вращения переменного сечения, нижняя резьбовая часть стойки смонтирована в полости корпуса посредством кронштейна. В насадке на верхнем срезе дефлектора выполнено фасонное углубление под размер торца шестигранного воротка  
10 (пат. РФ №2174876, МПК В 05 В 1/18, 1/26, опубл. 20.10.2001 г.).

Недостатком данной насадки является сложность конструкции, невысокая надежность.

Известна также насадка, содержащая цилиндрический корпус с осевым каналом  
15 подачи жидкости и выпускными отверстиями в торце корпуса, размещенный на торце корпуса посредством хвостовика дефлектор и узел регулировки выпускных отверстий, при этом он снабжен жестко соединенным с хвостовиком дефлектора многвинтовым шнекообразным сердечником, установленным с возможностью свободного вращения вокруг своей оси, при этом дефлектор выполнен с криволинейными лопастями (а.с.  
20 СССР №1613179, МКИ В 05 В 1/26, 3/04, опубл. 15.12.90).

Недостатками данной насадки являются невысокая производительность и сложность конструкции.

Прототипом дождевальной насадки является роторная насадка Senninger UP3, содержащая корпус с выходным отверстием и резьбой для присоединения, держатель-  
25 кронштейн с дефлектором, совершающим качательно-вращательное движение, опирающийся на упор, при этом на криволинейно вогнутой поверхности дефлектора, обращенной к выходному отверстию, выполнены чередующиеся впадины и выступы. (сайт <http://rainfineirrigation.ru/7-12-sprinkler-parts/195085>)

Недостатками дождевальной насадки Senninger UP3 являются значительные  
30 энергетические затраты ввиду повышенного дробления потока, уже в центре с переходом на периферию дефлектора потоки воды имеют сильную турбулентность, предшествующую формированию потоков, обеспечивающих равномерность по площади полива. Чрезмерная турбулизация потока ограничивает диаметр полива и увеличивает разность между мелкими и крупными каплями дождя, что естественно приводит к  
35 неравномерности полива по площади и радиусу.

Технической задачей предлагаемого изобретения является получение мелкодисперсного равномерного дождя с более равномерными каплями и их распределение в дождевом облаке, упрощение конструкции и повышение надежности насадки.

40 Поставленная задача решается с помощью дождевальной дефлекторной насадки, содержащей корпус с выходным отверстием и резьбой для присоединения, кронштейн-держатель с установленным дефлектором, имеющим криволинейно-вогнутую поверхность и совершающим качательно-вращательное движение, в кронштейне-держателе дефлектор расположен на оси со втулкой, вращающейся относительно  
45 корпуса, причем ось втулки не совпадает с осью дефлектора, пересекаясь в вершине бульба выпуклой эллипсоидной формы, расположенного в центре дефлектора с большей осью, направленной в сторону подачи жидкости, по образующей которого выполнены криволинейные уступы треугольной формы переменного сечения, попеременно

RU 2 615 574 C1

увеличивающиеся и уменьшающиеся к периферии, а каждая лежащая в радиальной плоскости к оси вращения дефлектора грань каждого предыдущего уступа является началом каждого последующего вертикально расположенного уступа, выполненного с кривизной как в продольной, так и в поперечной плоскости; кроме того, уступы на дефлекторе начинаются на дуге, образующей бульб на расстоянии, равном длине малой полуоси эллипса от вершины бульба; расстояние от вершины бульба до выходного отверстия насадки составляет не менее 2 и не более 5 диаметров выходного отверстия насадки; а малая ось эллипса образующей бульб составляет 0,5–0,75 диаметра выходного отверстия насадки.

На фиг. 1. показана дождевальная дефлекторная насадка, на фиг. 2 показан дефлектор вращающийся, на фиг. 3 – дефлектор в разрезе, на фиг. 4 – дефлектор, вид сверху.

Дождевальная дефлекторная насадка (фиг. 1) имеет корпус 2, присоединяемый к водоподводящему трубопроводу дождевальной машины с помощью резьбы 1, в нижней части корпуса 2 выполнено сопло 3 с выходным калиброванным отверстием, а в верхней части установлен кронштейн-держатель 4, состоящий из двух стоек, установленных напротив друг друга и соединенных между собой пластиной круглой формы, в центре которой сделано отверстие для установки втулки 6, необходимой для крепления и вращения дефлектора 5 с осью, закрепленной во втулке 6 посредством резьбового соединения гайкой 7, шайбой 8 и контргайкой 9. Полость сопла 3 выполнена в виде усеченного конуса, диаметр которого уменьшается в сторону дефлектора 5. Стойка кронштейна-держателя 4 выполнена кашевидной формы переменного сечения, увеличивающегося в сторону дефлектора 5. Дефлектор 5 расположен на оси, установленной во втулке 6 и вращающейся относительно корпуса 2, причем ось втулки не совпадает с осью дефлектора и их пересечение в вершине дефлектора бульба 10 образует угол  $\alpha$  (фиг. 3), что приводит к наклону дефлектора относительно собственной оси на такой же угол  $\alpha$ . Бульб 10 выпуклой эллипсоидной формы расположен в центре дефлектора 5 и направлен в сторону сопла 3, по образующей которого выполнены криволинейные уступы 11 треугольной формы переменного сечения попеременно увеличивающегося и уменьшающегося к периферии (фиг. 2), а каждая лежащая в радиальной плоскости к оси вращения дефлектора грань каждого предыдущего уступа является началом каждого последующего вертикально расположенного уступа, выполненного с кривизной радиусами R1, R2 и R3 как в продольной, так и в поперечной плоскости. Уступы 11 на дефлекторе 5 начинаются на дуге образующей бульб 10 на расстоянии, равном длине малой полуоси эллипса от вершины бульба 10. При диаметре дефлектора 50 мм уступы 11 начинаются через 15 мм. Расстояние от вершины бульба 10 до выходного отверстия насадки составляет не менее 2 и не более 5 диаметров выходного отверстия насадки. Малая ось эллипса образующей бульб 10 составляет 0,5–0,75 диаметра выходного отверстия насадки. Большая полуось эллипса, образующая бульб 10, составляет не менее 2-х и не более 4-х диаметров выходного отверстия насадки. При диаметре выходного отверстия насадки 8 мм вершина бульба 10 находится на расстоянии 40 мм от сопла, малая ось – 4 мм, большая полуось – 24 мм. Корпус 2 и кронштейн-держатель 4 выполнены единой деталью.

Дождевальная дефлекторная насадка работает следующим образом.

Выполняется монтаж дождевальной насадки, корпус насадки 2 с помощью резьбового соединения 1 крепится на трубопровод дождевальной машины, в который подается вода. Поток воды из трубопровода попадает в корпус насадки и, проходя через сопло 3 (фиг. 1), в виде струи поступает на бульб 10 (фиг. 2). Так как бульб выполнен в виде выпуклой эллипсоидной формы, то струя воды равномерно распределяется по корпусу



RU 2 615 574 C1

дефлектора 5 с криволинейно вогнутой поверхностью, заставляет его вращаться относительно оси, закрепленной с помощью гайки 7, шайбы 8 и контргайки 9 во втулке 6, установленной в кронштейне-держателе 4. Вращение дефлектора 5 выполняется за счет энергии струи воды, подаваемой на криволинейные уступы 11 треугольной формы, выполненные по образующей дефлектора. За счет формы уступов дефлектора и сопротивления воздуха, струи воды, сходящие с дефлектора, разбиваются на мелкие капли дождя, которые не приводят к повреждению культур, значительному вымыванию и водной эрозии почвы, а также способствуют равномерному распределению дождя по всей площади орошения.

10

## (57) Формула изобретения

Дождевальная дефлекторная насадка, содержащая корпус с выходным отверстием и резьбой для присоединения, кронштейн-держатель с имеющим криволинейно-вогнутую поверхность дефлектором, совершающим качательно-вращательные движения, отличающаяся тем, что дефлектор расположен на оси со втулкой, вращающейся относительно корпуса, причем ось втулки не совпадает с осью дефлектора, пересекаясь в вершине бульба выпуклой эллипсоидной формы, расположенного в центре дефлектора с большей осью, направленной в сторону подачи жидкости, по образующей которого выполнены криволинейные уступы треугольной формы переменного сечения, попеременно увеличивающиеся и уменьшающиеся к периферии, а каждая лежащая в радиальной плоскости к оси вращения дефлектора грань каждого предыдущего уступа является началом каждого последующего вертикально расположенного уступа, выполненного с кривизной как в продольной, так и в поперечной плоскости; кроме того, уступы на дефлекторе начинаются на дуге, образующей бульб на расстоянии, равном длине малой полуоси эллипса от вершины бульба; расстояние от вершины бульба до выходного отверстия насадки составляет не менее 2 и не более 5 диаметров выходного отверстия насадки; а малая ось эллипса образующей бульб составляет 0,5–0,75 диаметра выходного отверстия насадки.

30

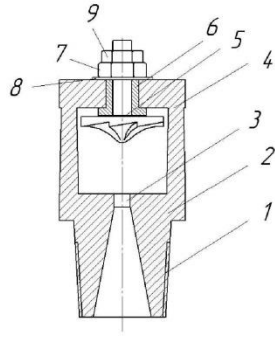
35

40

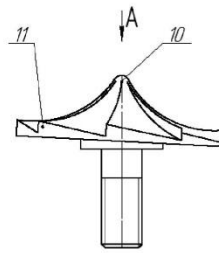
45

RU 2 615 574 C1

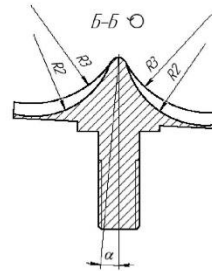
1



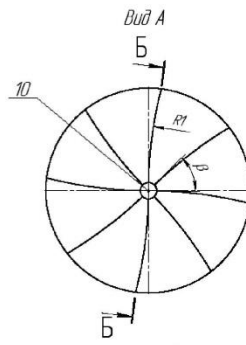
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4